

DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIO DE HIDRELÉTRICA NO SUL DO BRASIL

Damião Maciel Guedes¹, Lucia Ribeiro Rodrigues¹, David da Motta Marques¹, José Rafael Cavalcanti¹, Juan Martín Bravo¹, Carlos Ruberto Fragoso Jr.²

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, 91501-970, RS, Brazil. Damiao.guedes2@gmail.com

2 Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Centro de Tecnologia (CTEC)

Resumo – Monitoramento de qualidade da água foi realizado no reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Grande. O objetivo deste trabalho foi identificar padrões temporais e espaciais de qualidade da água do reservatório e definir quais variáveis tem maior influência sobre essa qualidade. A qualidade da água foi analisada por meio de amostragem em três pontos, dois em ambiente lacustre e outro em ambiente de transição, em amostragens de superfície e fundo, com dados coletados no período de 2005 a 2012. Foram utilizadas 11 variáveis físico-químicas de qualidade da água nas amostragens de superfície e 09 variáveis nas amostragens de fundo. Foi observada a importância das variáveis: turbidez, transparência Secchi, tempo de residência e temperatura. Foi evidenciada a tendência de um gradiente temporal de acordo com a temperatura (meses frios e meses quentes) e de um gradiente longitudinal (trechos à montante e jusante). Os gradientes observados estão especialmente relacionados aos processos de circulação, sedimentação e ressuspensão (variáveis turbidez, transparência Secchi, tempo de residência) e permitiram a caracterização do sistema, que pode ser muito útil para a definição de um modelo de monitoramento para reservatórios.

Palavras-Chave – Reservatório, gradiente longitudinal, sazonalidade.

SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF THE WATER QUALITY IN A HYDROELECTRIC RESERVOIR IN THE SOUTH OF BRAZIL

Abstract – Monitoring of water quality parameters was carried out in the reservoir of the Barra Grande Hydroelectric Power Plant. The objective of this work was to identify temporal and spatial patterns of reservoir water quality and to define which parameters have most influence on this quality. The water quality was analyzed in three-point sampling, two in a lacustrine environment and another in a transitional environment, in surface and bottom samplings, with data collected from 2005 to 2012. Eleven physical-chemical variables were used in surface samplings and 09 variables in the bottom samplings. It was possible to observe the importance of the variables turbidity, Secchi transparency, residence time and temperature. It was evidenced a tendency of a temporal gradient according to temperature (cold months and hot months) and a longitudinal gradient (upstream and downstream stretches). The gradients are especially related to the circulation, sedimentation and resuspension processes (variables turbidity, Secchi transparency, residence time) and it was possible to define the dynamic of the system, which can be very useful for the definition of a monitoring model for reservoirs.

Keywords – Reservoir, longitudinal gradient, seasonality.

1. INTRODUÇÃO

A obstrução do fluxo natural dos rios para formação de reservatórios, especialmente para produção de energia, traz mudanças em processos ecológicos, muitas vezes, resultante da alteração das condições físicas (Mirza *et al.* 2013). Vários fatores determinam a qualidade da água desses reservatórios, que inclui a precipitação sazonal, ação do vento, origem geológica da bacia de captação e o padrão do ciclo hidrológico prevalente na barragem (Straskraba e Tundisi, 1999), o transporte de nutrientes por rios afluentes (Tufford e McKellar, 1999; Friedl e Wüest, 2002), as mudanças climáticas sazonais, o desmatamento e uso da terra na área de influência (Dar e Romshoo, 2008).

Em reservatórios, com frequência é observada uma heterogeneidade longitudinal formada a partir dos rios formadores do reservatório até a barragem, com um gradiente de condições físico-químicas, que promove uma heterogeneidade transversal, determinada pela proximidade com a terra e diferenças na profundidade e uma heterogeneidade sazonal, determinada por variações no fluxo da água, temperatura e carreamento sólidos nutrientes e organismos (Beghelli e Santos, 2014).

Neste sentido, é importante a realização de programas de monitoramento para acompanhar a dinâmica destes complexos ecossistemas aquáticos, como foco na qualidade da água (Pinto *et al.* 2013). Esses programas de monitoramento também incluem a necessidade de acompanhamento da evolução do sistema durante as fases de operação do empreendimento, permitindo a elaboração de estudos e prognósticos e definindo intervenções necessárias à mitigação de impactos indesejáveis na qualidade das águas durante as fases de pré-enchimento, enchimento, estabilização e operação.

Deste modo, o objetivo deste estudo foi identificar potenciais padrões temporais e espaciais da dinâmica da qualidade da água do reservatório da UHE Barra Grande e definir quais variáveis tem maior influência sobre essa dinâmica, no sentido de subsidiar a definição de um modelo de monitoramento para reservatórios.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo e delineamento amostral

A Usina Hidrelétrica Barra Grande, SC está localizada no Rio Pelotas, a aproximadamente 43 km à montante de sua confluência com o Rio Canoas, na divisa entre os municípios de Anita Garibaldi, SC e Pinhal da Serra, RS. O empreendimento abrange cinco municípios em Santa Catarina (Anita Garibaldi, Campo Belo do Sul, Cerro Negro, Capão Alto e Lages) e quatro no Rio Grande do Sul (Pinhal da Serra, Esmeralda, Vacaria e Bom Jesus).

O reservatório possui 92km² de área inundada e cerca de 5.000·10⁶m³ de volume acumulado no nível máximo normal. A barragem tem altura máxima de 185m e profundidade média de 100m. A altitude do nível máximo operacional é de 647,00m; a cota máxima: 650,14m; cota mínima operacional: 617,00m; o deplecionamento máximo previsto é de 30m.

O reservatório foi inundado em setembro de 2005 e no monitoramento limnológico foram utilizados os dados coletados entre novembro de 2005 e dezembro de 2012. A qualidade da água do reservatório da UHE Barra Grande foi avaliada por meio de amostragens em três pontos no reservatório, sendo um ponto mais à montante (PCA), um ponto na região central (PCE) e outro próximo à barragem (PAC) (Figura 1 – Mapa com a localização dos pontos monitorados na UHE Barra Grande, SC). Amostragens nestes três pontos foram realizadas nas profundidades superfície e fundo, sendo que na superfície as amostras foram coletadas em até 70 cm de profundidade e no fundo a uma profundidade de 100 metros.

2.2 Análise dos dados

Para identificação de possíveis padrões espaciais e temporais das variáveis limnológicas foram utilizadas análises estatísticas univariadas e multivariadas. Na ANOVA *two way* os fatores utilizados foram o local de coleta no reservatório e a estação do ano, ambos fixos. Esta análise foi utilizada para comparar os dados considerando os fatores espaço e tempo. Já a Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada para ordenação das variáveis e descrição de gradientes temporais e espaciais, com logaritmização dos dados ($\log x + 1$) através do software PC-ORD, versão 5.0 (McCune e Mefford 2006).

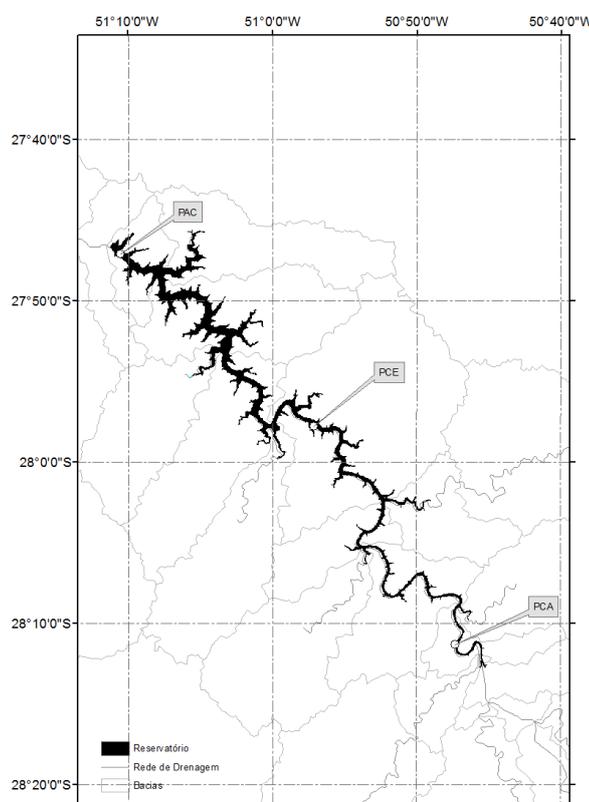


Figura 1- Mapa com a localização dos pontos monitorados na UHE Barra Grande, SC.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 apresenta, entre outras variáveis, a dinâmica do tempo de residência do reservatório. Esta variável apresentou grande amplitude de variação; de 38,7 dias em setembro de 2009 a 2739,6 dias em maio de 2012 (Figura 2 - Valores médios mensais do nível de montante (metros), vazão afluente (m^3/s) e tempo de residência (dias) no reservatório da UHE Barra Grande, SC no período entre novembro de 2005 e dezembro de 2012).

Observa-se ainda na figura 2, que na variação na dinâmica da vazão afluente e do tempo de residência ao longo dos anos, parece que não há um padrão anual, no período de sete anos de estudo. Foram observados três picos de tempo de residência no reservatório, todos no final do outono (maio de 2006, 2009 e 2012), quando o volume do reservatório estava muito baixo. Também foram observados picos de vazão afluente associados aos anos mais chuvosos (agosto de 2007, 2008 e 2009 e maio de 2010 e agosto de 2011).

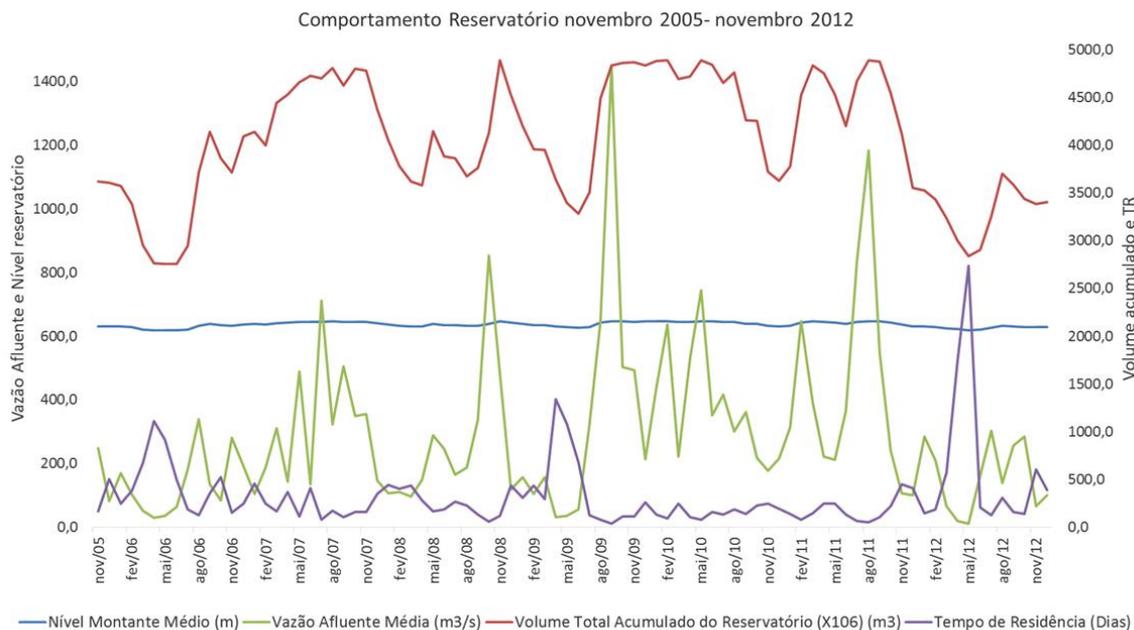


Figura 2 - Valores médios mensais do nível de montante (metros), vazão afluente (m³/s) e tempo de residência (dias) no reservatório da UHE Barra Grande, SC no período entre novembro de 2005 e dezembro de 2012.

Em nosso estudo, as variáveis tempo de residência, clorofila *a*, pH e oxigênio dissolvido apresentaram aumento nos valores no período de outono/inverno. Já variável transparência Secchi evidenciou aumento no verão, enquanto a turbidez, aumento no outono, como era de se esperar, tendo em vista as vazões afluentes obtidas. Como característica geral, a transparência aumentou ao longo do reservatório, à medida que se aproxima da barragem, que parece funcionar como uma grande estrutura de decantação de sólidos, também promovendo um aumento do oxigênio dissolvido na superfície.

Os resultados das variáveis de qualidade da água observados neste estudo são compatíveis com outros estudos desenvolvidos em reservatórios. Estes estudos têm demonstrado, assim como o nosso, um gradiente sazonal nos reservatórios quanto aos parâmetros físico-químicos e dinâmica de sedimentos (Pagioro *et al.* 2005; Vieira *et al.* 2005; Rodgher *et al.* 2005; Pinto-Coelho *et al.* 2006; Soares e Mozeto, 2006; Ribeiro-Filho *et al.* 2006)

Também na UHE Barra Grande foi identificado um gradiente temporal na organização nas unidades amostrais, que prevalece para as amostragens de superfície e fundo, enquanto a variação espacial foi especialmente significativa para as amostragens de fundo.

A análise de variância (ANOVA *two way*) evidenciou que os valores de turbidez na superfície, apresentaram uma diferença significativa ($p < 0,001$) entre o ponto na cabeceira do reservatório e os outros dois pontos. Um efeito temporal significativo ($p < 0,001$) também foi identificado nas variáveis temperatura da água, condutividade, pH, transparência Secchi e turbidez. Já nas amostragens de fundo foi evidenciado esse gradiente espacial significativo ($p < 0,001$) entre a cabeceira e o ponto na barragem do reservatório para as variáveis temperatura, oxigênio dissolvido, fósforo total e condutividade. Um efeito temporal significativo ($p < 0,001$) foi observado para as variáveis oxigênio dissolvido, temperatura e condutividade, além do tempo de residência, tanto nas

amostragens de superfície quanto de fundo (Tabela 2 - Análise de variância (Anova *two way*) para as amostragens de superfície (a) e fundo (b) no reservatório da UHE Barra Grande, SC).

Portanto, no gradiente longitudinal do reservatório da cabeceira em direção à barragem, temos o aumento da concentração de nutrientes e transparência na superfície. Já na dinâmica de fundo, um efeito espacial que destaca a porção inicial do reservatório, onde a água de superfície carrega mais sólidos em suspensão não biogênicos e no fundo a água mais quente e mais oxigenada, tem menos nutrientes N e P e menor condutividade (menos íons e matéria orgânica).

Tabela 2 – Análise de variância (Anova *two way*) para as amostragens de superfície (a) e fundo (b) no reservatório da UHE Barra Grande, SC.

a	Variável	Efeito espacial	Efeito temporal	b	Variável	Efeito espacial	Efeito temporal
	Temperatura da água	0,281	< 0,001		Temperatura da água	< 0,001	< 0,001
	Oxigênio dissolvido	0,647	0,246		Oxigênio dissolvido	< 0,001	0,039
	Condutividade	0,586	< 0,001		Condutividade	< 0,001	0,016
	pH	0,613	0,001		pH	0,063	0,628
	Nitrogênio total	0,902	0,490		Nitrogênio total	0,054	0,282
	Fósforo total	0,631	0,542		Fósforo total	< 0,001	0,190
	Turbidez	< 0,001	< 0,001		Turbidez	0,780	0,356
	Sólidos totais	0,244	0,146		Sólidos totais	0,174	0,978
	Tempo de residência	-	0,001		Tempo de residência	-	0,001
	Transparência Secchi	0,457	< 0,001				
	Clorofila <i>a</i>	0,138	0,512				

Para as amostragens de superfície, a análise conjunta dos três pontos amostrais, através da análise de componentes principais (ACP), foi explicada 37,0% da variabilidade dos dados nos eixos 1 e 2 (eixo 1 = 23,3%; eixo 2 = 13,7%) ($p=0,001$). As variáveis mais importantes na ordenação do eixo 1 foram turbidez (-0,89), transparência Secchi (0,83), temperatura (0,63) e tempo de residência (0,58). Na ordenação do eixo 2, as variáveis mais representativas foram pH (0,79), clorofila *a* (0,56) e oxigênio dissolvido (0,53) (Figura 3a - Resultados da análise de componentes principais (ACP) aplicada às variáveis ambientais nos pontos PCA, PCE e PAC, na superfície do Reservatório da UHE Barra Grande, SC. Turbidez = turb, Transparência Secchi = Secchi, Tempo de residência = Tr, temperatura = temp.).

Nas amostragens de fundo, na análise conjunta dos três pontos amostrais, a ACP explicou 42,9% da variabilidade dos dados nos eixos 1 e 2 (eixo 1 = 27,7% e eixo 2 = 15,2%) ($p=0,001$). As variáveis mais importantes na ordenação do eixo 1 foram oxigênio dissolvido (-0,72), temperatura (-0,63), fósforo total (0,66) e condutividade (0,62). Na ordenação do eixo 2, as variáveis mais representativas foram turbidez (0,70) e sólidos totais (0,70) (Figura 3b - Resultados da análise de componentes principais (ACP) aplicada às variáveis ambientais nos pontos PCA, PCE e PA, no fundo do Reservatório da UHE Barra Grande, SC. Turbidez = turb, Sólidos Totais = ST, Oxigênio Dissolvido = OD, temperatura = temp. (b)).

Nossos resultados evidenciaram que as variáveis temperatura, oxigênio dissolvido, turbidez e condutividade apresentaram grande importância na dinâmica da qualidade da água do reservatório e permitiram identificar tendências espaciais e temporais, tanto em superfície quanto no fundo do reservatório.

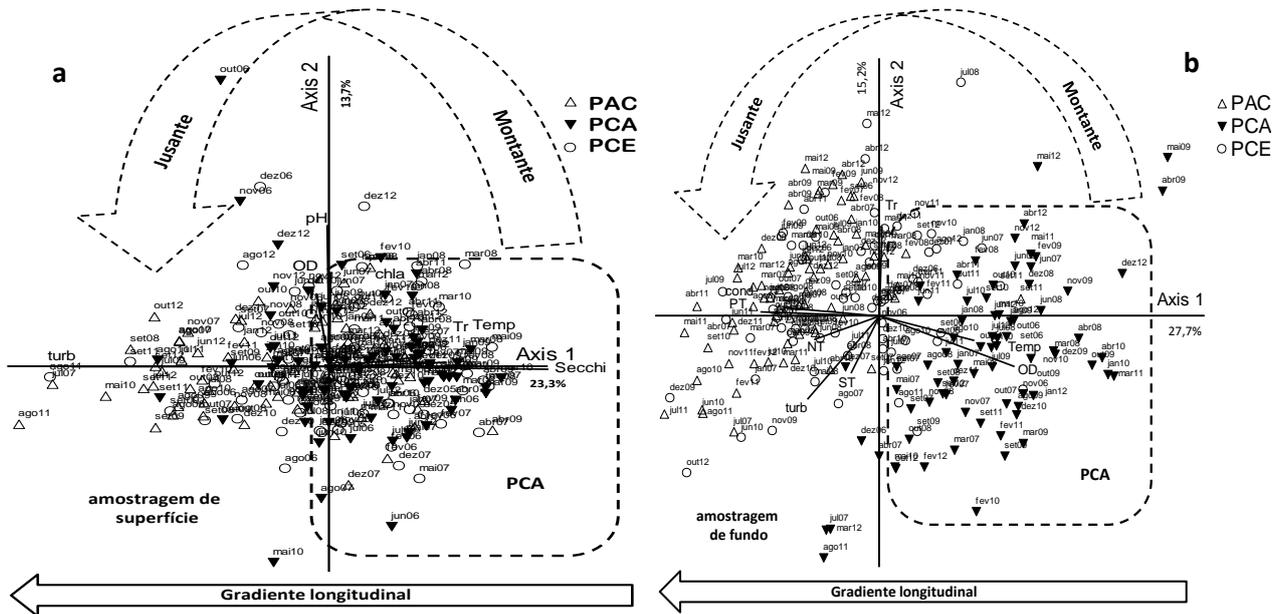


Figura 3 – (a) Resultados da análise de componentes principais (ACP) aplicada às variáveis ambientais nos pontos PCA, PCE e PAC, na superfície do Reservatório da UHE Barra Grande, SC. Turbidez = turb, Transparência Secchi = Secchi, Tempo de residência = Tr, temperatura = temp. (b) Resultados da análise de componentes principais (ACP) aplicada às variáveis ambientais nos pontos PCA, PCE e PA, no fundo do Reservatório da UHE Barra Grande SC. Turbidez = turb, Sólidos Totais = ST, Oxigênio Dissolvido = OD, temperatura = temp.

A primeira tendência evidencia um gradiente temporal no sistema, agrupando as unidades amostrais de acordo com a temperatura (meses frios e meses quentes). A segunda, um gradiente longitudinal, distinguindo os trechos à montante e à jusante do sistema, através de uma maior similaridade entre os pontos que abrangem a parte central do reservatório (PCE) e a região próxima à barragem (PAC).

O gradiente longitudinal na superfície está especialmente relacionado a processos de circulação, sedimentação e ressuspensão, com relevância para as variáveis turbidez e transparência Secchi. No fundo, o gradiente também está relacionado à circulação e sedimentação, com relevância para as variáveis turbidez e condutividade, onde se observa concentração de formas iônicas dissolvidas, principalmente inorgânicas, decorrente do acúmulo e decomposição de matéria orgânica oriunda de montante (aumento dos valores de condutividade) e aos potenciais aportes de fósforo, decorrente da contribuição dos tributários ao longo do sistema, especialmente no ponto próximo à barragem da UHE Barra Grande (PAC).

Esse gradiente temporal e espacial, tanto longitudinal quanto horizontal no reservatório, afetam diretamente os seus processos físico-químicos e biológicos, podendo ter implicações na produtividade primária, regeneração e depleção de nutrientes, organismos planctônicos (Wang *et al.* 2011) e padrões de migração de peixes.

REFERÊNCIAS

- BEGHELLI, F.G.S.; SANTOS, A.C.A.; URSO-GUIMARÃES, M.V.; CALIJURI, M.C. (2014). Spatial and temporal heterogeneity in a subtropical reservoir and their effects over the bentic macroinvertebrate community. *Acta Limnologica Brasiliensia*, vol. 26, no 3, pp. 306-317.
- DAR, A.A.; ROMSHOO, S.A. (2008). Assessing the Hydrologic Characteristics of Dal Lake Catchment Using GIS. Sengupta, M. and Dalwani, R. (Editors). 2008 Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference, pp. 659-667.
- FRIEDL, G.; A.WÜEST. (2002). Disrupting biogeochemical cycles – consequences of damming. *Aquatic Sciences* 64, pp. 55–65.
- McCUNE, B.; MEFFORD, M.J. (2006). PC-ORD, version 5.0, Multivariate analysis of ecological data. MjM Software Desing, Glaneden Beach.
- MIRZA, S.Z.; NADEEM, M.S.; BEG, M.A.; Malik, I. U. (2013). Spatial and temporal fluctuations in the physico-chemical limnology of Mangla Dam (Pakistan). *Pakistan J. Zool.*, vol 45 (3), pp 679-686.
- PAGIORO, T.A.; ROBERTO, MC.; THOMAZ, SM.; PIERINI, SA.; TAKA, M. (2005). Zonação longitudinal das variáveis limnológicas abióticas em reservatórios. In RODRIGUES, L., THOMAZ, SM., AGOSTINHO, AA., GOMES, LC. org. Biocenoses em reservatórios: padrões espaciais e temporais. São Carlos: RIMA. pp. 39-46.
- PINTO, U.; MAHESHWARI, B.L.; OLLERTON, R.L. (2013). Analysis of long-term water quality for effective river health monitoring in peri-urban landscapes - a case study of the Hawkesbury-Nepean river system in NSW, Australia. *Environ Monit Assess*, 185, pp. 4551–4569.
- PINTO-COELHO, R.M.; AZEVEDO, L.M.A.; RIZZI, P.E.V.; BEZERRA-NETO, J.F.; ROLLA, ME. (2006). Origens e efeitos do aporte de nutrientes em um reservatório tropical de grande porte: reservatório de São Simão (MG/GO). In NOGUEIRA, MG., HENRY, R., JORCIN, A. (2006). Ecologia de reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata. São Carlos: Rima. pp. 127-164.
- RODGHER, S.; ESPÍNDOLA, E.L.G.; ROCHA, O.; FRACÁCIO, R.; PEREIRA, R.H.G.; RODRIGUES, M.H.S. (2005). Limnological and Ecotoxicological Studies In the Cascade of Reservoirs in the Tietê River (São Paulo, Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, vol. 65, no. 4, pp. 697-710. PMID:16532194. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842005000400017>.

- RIBEIRO-FILHO, R.A. (2006). Relações tróficas e limnológicas no reservatório de Itaipu: uma análise do impacto da biomassa pesqueira nas comunidades planctônicas. São Carlos: Universidade de São Paulo. 139 p. [Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental].
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J.G. (1999). Guidelines of Lake Management. In: Reservoir Water Quality Management, vol. 9. International Lake Environment Committee.
- SOARES, A.; MOZETO, A.A. (2006). Water Quality in the Tietê River Reservoirs (Billings, Barra Bonita, Bariri e Promissão, SP- Brazil) and nutrient fluxes across the sediment-water interface (Barra Bonita). *Acta Limnologica Brasiliensia*, vol. 18, no. 3, pp. 247- 266.
- TUFFORD, D.L.; MCKELLAR, H.N. (1999). Spatial and temporal hydrodynamic and water quality models of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain. *Ecological Modelling* 114(2/3): 137-173.
- VIEIRA, M.S.; MOURA, M.A.M.; FERREIRA, J.R. (2005). Estudo das variações sazonais e espaciais dos íons dominantes na água e no sedimento da represa de Ibitinga (São Paulo, Brasil- 21°45'S e 48°50'W). *Arquivos do Instituto Biológico*, vol. 72, no. 4, pp. 523-534.
- WANG, L.; CAI, Q.; ZHANG, M.; TAN, L.; KONG, L. (2011). Longitudinal Patters of Phytoplankton distribution in a tributary bay under reservoir operation. *Quaternary International*, vol.244, pp. 280-288.