



AVALIAÇÃO DO ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS: ANÁLISE CRÍTICA COM BASE EM RESERVATÓRIO DE ABASTECIMENTO PÚBLICO EM REGIÃO URBANIZADA

William B. Rauen^{1,2}; Matheus G. da Silva¹; Stephan Hilgert³; Kladji Sotiri³; Heloise G. Knapik²; Cristóvão V. S. Fernandes²; Maurício Dziedzic^{1,5}; Maurício B. Scheer⁴; Tobias B. Bleninger²

ABSTRACT – Passauna is one of four reservoirs of the integrated public water supply system for Curitiba and metropolitan region, providing water to around half a million inhabitants. This study aimed to quantify and critically assess siltation in this reservoir between 1990 and 2016 – the years of lake formation and realisation of a bathymetric campaign, respectively. Stage-area and stage-volume curves were updated for the reservoir, from which key areas and volumes were determined and contrasted between the two historical scenarios. With emphasis on the minimum normal volume (MNV, located below the barrage weir crest), an analysis was conducted of uncertainties and relative importance of parameters involved in the siltation process, such as the total fluvial sediment load, bulk reservoir bed density, internal plankton production and data uncertainty of the bathymetric (for 2016) and altimetric (for 1990) surveys. Discrepancies in the area results between 1990 and 2016 were lower than the corresponding uncertainty. In 2016 the areas associated with the dead volume and MNV were 4.60km² and 8.26km², respectively, each with an uncertainty of ±0.5km². Concurrently, the MNV was estimated as 70.2hm³, while the dead volume was 20.4hm³ and the minimum working volume was 49.8hm³, with uncertainties of up to ±0.4hm³ each. A reduction of 1.4hm³ was noted for the MNV, which was supposedly caused by siltation at a rate of -0.1%volume/year. The uncertainty analysis showed that only 20% of such volume loss could be explained by watershed inputs, as estimated using historical data and a sediment rating curve; that bulk bed density estimates obtained using the Lara & Pemberton method were uncertain to a range of 10% to 50%; that internal production could only explain up to 10% of such siltation; that the volumetric uncertainty of the bathymetric survey corresponded to around a third of the estimated volume loss; and that the uncertainty of initial reservoir volume information was higher than the volume loss estimate and all other uncertainties assessed herein. Reflections were made on the determination of the working life of such reservoirs, the impact of siltation on future water availability and their role in promoting water security in urban regions.

Palavras-Chave – Assoreamento; Reservatório; Incertezas.

1) Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, Universidade Positivo, Curitiba/PR, Brasil

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, UFPR, Curitiba/PR, Brasil

3) Department of Aquatic Environmental Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Alemanha

4) Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento (APD/DMA), Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), Curitiba/PR, Brasil

5) Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Universidade Ceuma, São Luís/MA, Brasil



1 - INTRODUÇÃO

Reservatórios perdem em torno de 1% de sua capacidade de armazenamento por ano, em termos médios globais (SCHLEISS et al., 2016), devido ao assoreamento. Isso aumenta os riscos a usos como o abastecimento de água para consumo e/ou irrigação e a geração hidrelétrica, bem como ao equilíbrio de ecossistemas e à qualidade das águas reservadas.

A deposição de sedimentos em reservatórios é consequência da alteração de regime hidrossedimentológico promovida pela construção de barramentos, podendo afetar a vazão de regularização projetada e a vida útil do reservatório (CARVALHO, 2008; SCHLEISS et al., 2016). Conhecimento incompleto dos processos que causam o assoreamento e limitações na capacidade de modelagem de tais processos geram incertezas nos estudos do assoreamento de reservatórios (SALAS; SHIN, 1999; SCHLEISS et al., 2016). Assim, é comum encontrar análises compartmentadas quanto à percepção da natureza de produção de sedimentos e mecanismos erosivos, bem como do seu transporte físico, das características granulométricas e dos processos de sedimentação. A contribuição relativa de variáveis que interferem no processos de assoreamento em reservatórios de abastecimento público, submetidos a pressões variadas associadas ao uso e à ocupação do solo urbano e na bacia de drenagem, ainda requer uma avaliação crítica mais consistente.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi quantificar e avaliar criticamente o assoreamento de um reservatório subtropical de médio porte utilizado no abastecimento público da região metropolitana de Curitiba, PR – o reservatório Passaúna – frente a incertezas de determinação dos fatores intervenientes em tal fenômeno.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do rio Passaúna está localizada no estado do Paraná, em parte dos municípios de Curitiba, Araucária, Campo Largo, Campo Magro e Almirante Tamandaré (Figura 1). Trata-se de uma sub-bacia do rio Iguaçu, com área de 214 km². No final dos anos 1980 foi construído um barramento na porção média-baixa do rio Passaúna (coordenadas 25°31'43" S; 49°23'37" W) levando ao enchimento do reservatório em 1990. O reservatório é subtropical e de médio porte, com 71,6 hm³ de volume normal mínimo (VNM, conforme dados oficiais da sua condição inicial) e profundidade máxima de 17,2 m (ambos relativos à cota da soleira do vertedouro da barragem), e tem área de drenagem de 150 km² (incluindo 8,61 km² de espelho de água) (SUREHMA, 1992). O reservatório fornece uma vazão regularizada de 2,0 m³.s⁻¹ ao sistema integrado de abastecimento público de Curitiba e região metropolitana, sob a responsabilidade da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Na área de drenagem do reservatório foi designada uma Área de Proteção Ambiental, a APA do Passaúna, onde o uso do solo é regido por um zoneamento ecológico-econômico. Ainda assim, a bacia é de uso misto urbano-rural e inclui



indústrias, abatedouros, cemitérios, pedreiras e um aterro controlado desativado, além de áreas urbanas residenciais e cultivos agrícolas principalmente de milho, feijão e batata. Há rede de coleta de esgotos conectada a uma estação de tratamento localizada fora da bacia do Passaúna.

Segundo SUREHMA (1992) e Rauen et al. (2017), o transporte sólido no rio Passaúna ocorre principalmente por suspensão de finos em condições de baixa a média vazão, e também por carga de arraste e ressuspensão do leito durante cheias. A partir dos dados históricos de SST e de estimativas da carga de arraste obtidas pelo método de van Rijn, Rauen et al. (2017) geraram curva chave de sedimentos relacionando a descarga sólida específica total (suspensão + arraste, d_t , $\text{ton} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) à vazão específica (q , $\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), conforme $d_t = 0,3283 \cdot q^{1,764}$. A cobertura dos dados disponíveis e consistidos de vazão e SST foi de 82% e 1% dos dias no período 1985-2015, respectivamente. As seguintes magnitudes de descarga sólida total no rio Passaúna foram estimadas a partir da curva chave de sedimentos: $O(10^0)$ $\text{ton} \cdot \text{dia}^{-1}$ sob baixas vazões; $O(10^0 \text{ a } 10^1)$ $\text{ton} \cdot \text{dia}^{-1}$ em condições normais; $O(10^1 \text{ a } 10^2)$ $\text{ton} \cdot \text{dia}^{-1}$ sob cheias; $O(10^3 \text{ a } 10^4)$ ton de aporte anual. As principais incertezas nessas estimativas estão relacionadas ao transporte por carga de arraste (pela ausência de dados de medição no período), à representatividade das condições de cheia (pela baixa resolução amostral) e ao uso de uma só curva chave de sedimentos, obtida com toda a série histórica de dados, para estimar descargas sólidas de curto e médio termos (HOROWITZ, 2003). Para o período de 1990 a 2015 e considerando toda a bacia de drenagem do reservatório (inclusive margens e outros afluentes), foi estimado aporte total de 290.000 ton.

A determinação de áreas e volumes para atualização das curvas cota-área e cota-volume do reservatório foi feita com o programa AutoCAD Civil 3D, a partir dos dados batimétricos obtidos por Hilgert e Sotiri (2016) (SILVA, 2017). Os dados requeridos foram extraídos de superfícies horizontais geradas nas cotas de interesse (as mesmas de SUREHMA, 1992). Foram analisados os resultados referentes às cotas 887,2 m (soleira do vertedouro da barragem) e 879,5 m (cota inferior da captação de água), que correspondem aos níveis de referência para cálculo do VNM e do volume morto do reservatório, respectivamente.

As diferenças entre os resultados obtidos para valores de áreas e volumes nos dados de 2016 e 1990 foram avaliadas tomando-se como incertezas: para áreas, a discrepância de $0,5 \text{ km}^2$ notada nas estimativas iniciais para a cota 890,0 m por SUREHMA (1992) ($10,5 \text{ km}^2$) e Veiga e Dziedzic (2010) ($11,0 \text{ km}^2$); para volumes oriundos da batimetria, incerteza de $\pm 0,05 \text{ m}$ na localização vertical do leito (HILGERT; SOTIRI, 2016) x área associada a cada cota de referência; e, para volumes oriundos da altimetria, incerteza de $\pm 0,5 \text{ m}$ na localização dos planos horizontais de referência ($\pm 10\%$ da resolução vertical correspondente, que foi de $5,0 \text{ m}$) x área associada a cada cota de referência. Nota-se que a incerteza volumétrica nos dados de 2016 resulta, assim, uma ordem de grandeza inferior à incerteza associada aos volumes iniciais do reservatório.



Além disso, foram estimadas incertezas e importâncias relativas de outros fatores com potencial de influenciar os cálculos de assoreamento, tais como a descarga sólida, a densidade média dos depósitos e a produção interna.



Figura 1 – Localização da bacia e do reservatório Passaúna
(Adaptado de GoogleMaps e Rauen et al., 2017)

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir dos dados batimétricos para a área projetada no plano horizontal (espelho de água) e o volume reservado em função da cota altimétrica no reservatório são mostrados na Figura 2, bem como os respectivos valores associados às duas cotas de referência nos dados de Hilgert e Sotiri (2016) (SILVA, 2017) e SUREHMA (1992).

A área normal, associada à cota 887,2 m, era de 8,26 km² em 2016, valor que é 4% inferior à área normal inicial do reservatório, que era de 8,61 km² em 1990. Na cota 879,5 m, os valores de área eram 4,60 km² em 2016 e 4,64 km² em 1990, indicando uma diferença menor que 1%. Nota-se que a área projetada associada ao volume morto corresponde a 55% da área normal. Uma vez que as diferenças temporais de área supra citadas têm magnitude comparável ou menor à da incerteza correspondente (0,5 km²), concluiu-se que não houve variação líquida expressiva da área superficial do reservatório entre 1990 e 2016, para as duas cotas aqui analisadas.

O VNM era de 70,2 hm³ em 2016, enquanto que o inicial era de 71,6 hm³ (SUREHMA, 1992). Uma comparação entre esses valores indica que houve redução líquida de 1,4 hm³ no VNM entre 1990 e 2016, equivalente a -2% do VNM inicial. Tendo essa redução volumétrica sido causada pelo assoreamento ao longo de 26 anos, a taxa média de perda volumétrica correspondente teria sido



da ordem de 0,1% ao ano. A massa de sedimentos associada a tal assoreamento tem magnitude 10^6 ton, frente à densidade média de 1.080 kg.m^{-3} do leito obtida por Hilgert e Sotiri (2016).

Considerando-se uma eficiência de retenção de sedimentos próxima a 100% no reservatório Passaúna (SIQUEIRA, 2014; SILVA, 2017), nota-se que tal estimativa de massa depositada é cerca de 5x superior à estimativa de aporte sólido total ao reservatório obtida para o período (seção 2). Isto sugere que o aporte sólido fluvial e oriundo de erosão das margens do reservatório podem ter sido subestimados e/ou que outros fatores contribuíram significativamente ao assoreamento no período e/ou que há incertezas elevadas nesses cálculos (SCHLEISS et al., 2016). Nos dados históricos utilizados para gerar curvas chaves de sedimentos para o rio Passaúna (RAUEN et al., 2017), a resolução amostral sob condições de cheia – quando costuma ocorrer até 90% do aporte sólido fluvial total (CARVALHO, 2008) – foi bastante inferior à resolução sob condições de baixa e média vazão. Isso sugere que as descargas sólidas de cheias podem ter sido subestimadas, o que não é incomum (HOROWITZ, 2003), talvez ao ponto de causar incerteza no cálculo do aporte sólido total equivalente a 80% da estimativa de massa depositada (se desconsiderados outros efeitos). Para elucidar tal questão, está previsto o monitoramento sedimentométrico do rio Passaúna com aquisição contínua de dados durante eventos de cheia.

Avaliou-se, em seguida, possível incerteza envolvida na determinação da densidade média dos depósitos. Erros em sua determinação se transferem de modo proporcional inverso às estimativas de volume assoreado, ainda que o cálculo da massa sólida retida no reservatório seja condizente com a realidade. No caso, Hilgert et al. (2016) observaram densidade mínima de 800 kg.m^{-3} , máxima de 1.580 kg.m^{-3} e média ponderada de 1.080 kg.m^{-3} no leito do reservatório Passaúna. SUREHMA (1992), Siqueira (2014) e Silva (2017) estimaram valores de $920\text{-}980 \text{ kg.m}^{-3}$, 1.550 kg.m^{-3} e 1.230 kg.m^{-3} , respectivamente, com o método de Lara e Pemberton – que é comumente utilizado para tal fim (CARVALHO, 2008). A estimativa de Silva (2017) foi a única que utilizou dados medidos da granulometria do aporte sólido total (suspensão + arraste), podendo ser considerada a mais fidedigna das três. Assim, associou-se uma incerteza de 10% a 50% à estimativa de densidade média dos depósitos em todo o reservatório, e que a mesma depende da disponibilidade de dados e de condições intrínsecas ao reservatório em dado período de avaliação do assoreamento. Fatores como a ocorrência de gases oriundos da decomposição da matéria orgânica no leito e outros usualmente desconsiderados em métodos como o de Lara e Pemberton podem ocasionar incertezas expressivas em estimativas do assoreamento.

Também foi considerada a hipótese de que a produção interna de plâncton possa gerar incerteza expressiva na avaliação do assoreamento de um reservatório como o aqui estudado. A produtividade primária foi confirmada no reservatório Passaúna por meio de análises da matéria orgânica na água, envolvendo espectroscopia de absorvância no ultravioleta visível e de emissão-excitação de fluorescência (GODOY, 2018). Tais análises indicaram a presença de matéria orgânica



autóctone nas camadas mais profundas e em local distante de possíveis fontes de contaminação antrópica direta. As comunidades fitoplanctônicas podem estar em equilíbrio no reservatório, pois não foi detectada variação significativa do seu potencial trófico no médio-longo termo – que oscilou entre mesotrófico e oligotrófico entre os anos de 2004 e 2014 (RAUEN et al., 2018). Assim, tomando-se a disponibilidade de fósforo como fator limitante da produtividade primária e a concentração mediana histórica de $20 \mu\text{g.L}^{-1}$ deste elemento no reservatório, estimou-se a concentração típica de clorofila-a de $4 \mu\text{g.L}^{-1}$, com base na formulação (2) de Cunha et al. (2013). Concentrações similares a essas têm sido medidas recentemente no reservatório, indicando que seu estado trófico condiz com o potencial estimado. Também vêm sendo detectadas concentrações de clorofila-a maiores em camadas mais profundas da coluna de água do que na zona fótica, em decorrência da deposição do material produzido internamente.

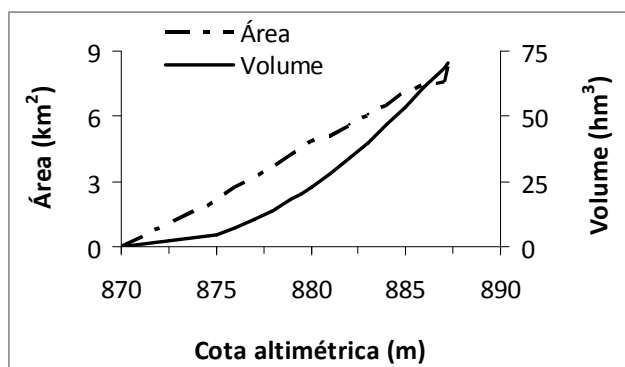
Assim, uma apreciação da importância relativa da produção interna no assoreamento do reservatório foi feita para um cenário de potencial máximo, como se toda a massa depositada (supondo-se 10^6 ton) tivesse sido produzida internamente. A produtividade primária média anual correspondente teria sido de $7,0 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, com as considerações de cálculo: densidade média dos depósitos de 1.080 kg.m^{-3} , área superficial de $8,26 \text{ km}^2$ e comunidades fitoplanctônicas em equilíbrio. Tal valor hipotético se assemelha ao pico de produtividade observada por Calijuri e Santos (2001) em um reservatório eutrófico situado em região de transição tropical-subtropical – mas, para o qual a média anual foi quase 5x menor. Para a mesma região do estudo de Calijuri e Santos (2001), Galvao (1985) reportou produtividade primária média anual cerca de 10x menor em outro reservatório eutrófico, até 20x menor em sete reservatórios mesotróficos e 170x menor em um reservatório oligotrófico. Assim, é provável que a produtividade primária no reservatório Passaúna explique, no máximo, da ordem de 10% do assoreamento medido em 2016, em termos de massa, supondo-se correta a estimativa supra indicada.

Por fim, com base no valor de área ($8,26 \text{ km}^2$) obtido para a cota de referência para cálculo do VNM e na incerteza de localização vertical da mesma nos dados batimétricos ($\pm 0,05 \text{ m}$) e altimétricos ($\pm 0,5 \text{ m}$) (seção 2), estimou-se incerteza volumétrica de $\pm 0,4 \text{ hm}^3$ nos dados de 2016, e de $\pm 4 \text{ hm}^3$ na condição inicial do reservatório. Nota-se que a incerteza batimétrica equivale a quase um terço da estimativa de volume assoreado no período, ao passo que a incerteza nos dados altimétricos superou tal estimativa e também as demais incertezas.

O volume morto (cota 879,5 m) obtido com os dados de 2016 foi de $20,4 \text{ hm}^3$, ao passo que tal volume era de $16,5 \text{ hm}^3$ em 1990 (SUREHMA, 1992). Isso indica que o volume morto teria sofrido um aumento líquido de $3,9 \text{ hm}^3$ no período, o que foi considerado anômalo para um reservatório que opera quase sempre cheio e que ainda não passou por procedimentos como dragagem e lavagem de fundo. Tal discrepância deve ser melhor explicada pela incerteza nos dados altimétricos supra mencionada, tendo ela magnitude similar.



Com base nos resultados batimétricos obtidos para VNM e volume morto, calculou-se que o volume útil mínimo do reservatório era de $49,8 \text{ hm}^3 \pm 0,4 \text{ hm}^3$ em 2016.



		Cota (m)		
		879.5	887.2	
Área (km ²)		4.64	8.61	1990
		4.60	8.26	2016
		-0.04	-0.35	Variação
		0.50		Incerteza
Volume (hm ³)		16.5	71.6	1990
		20.4	70.2	2016
		3.9	-1.4	Variação
		0.4 a 4.0		Incerteza

Figura 2 – Curvas cota-área e cota-volume atualizadas para o reservatório Passaúna (Fonte: Silva, 2017 com dados de Hilgert e Sotiri, 2016) e valores associados às cotas de referência

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa avaliação indicou que o assoreamento pode não representar grave ameaça à utilização atual ou futura do reservatório Passaúna, se considerado apenas o risco de obstrução à captação de água pelo acúmulo de depósitos. Isso pode ser um efeito benéfico da APA que abrange a área de drenagem desse reservatório, no sentido de promover preservação e amenizar pressões do uso misto urbano-rural do solo correspondente. Contudo, não se deve desprezar o efeito de longo prazo do assoreamento, pois esse reservatório tem papel central na promoção da segurança hídrica em região estrategicamente dependente de reservatórios para seu abastecimento público. Ao longo de poucas décadas, a redução de disponibilidade hídrica causada pelo assoreamento associada ao aumento da demanda esperado com o crescimento populacional podem agravar situação de relativa insegurança hídrica à qual a região já está sujeita, considerando-se a disponibilidade *per capita* de água (CASTRO et al., 2017). Assim, avanços na avaliação do assoreamento em reservatórios fornecerão mais subsídios para a elaboração de medidas mitigatórias, preventivas e/ou compensatórias, tais como melhorar a gestão do uso do solo na bacia hidrográfica, programar dragagens de porções do reservatório mais seriamente afetadas pelo assoreamento, aumentar a oferta hídrica por meio da inclusão de novos mananciais no sistema de abastecimento, reduzir as perdas de água no sistema de distribuição e promover programas de incentivo à redução do consumo *per capita*. Isso justifica a ampliação e o refinamento de métodos de estimativa do assoreamento, como por meio da medição direta da espessura e densidade de depósitos e da inclusão de outros possíveis fatores interferentes e suas incertezas nas estimativas de aporte sólido e volume ocupado por depósitos.



AGRADECIMENTOS

O segundo autor recebeu bolsa de Iniciação Científica da Universidade Positivo. A parceria Brasil-Alemanha foi fomentada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo *German Academic Exchange Service* (DAAD) – Programa Novas Parcerias.

REFERÊNCIAS

- CALIJURI, M. C.; SANTOS, A. C. A. (2001). Temporal variations in phytoplankton primary production in a tropical reservoir (Barra Bonita, SP – Brazil). *Hydrobiologia*, 445, 11-26.
- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- CASTRO, C. O.; LOUREIRO, O. C. S.; SANTOS, A. V.; SILVA, J.; RAUEN, W. B. (2017). Water sustainability assessment for the region of Curitiba. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 8(2), 184-194.
- CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C.; LAMPARELLI, M. C. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tsr}). *Ecological Engineering*, 60, 126-134.
- GALVAO, S. M. F. G. (1985). Primary production in ten reservoirs in southern Brazil. *Hydrobiologia*, 122, 81-88.
- GODOY, R. F. B. (2018). Dinâmica da qualidade da água em reservatório de abastecimento público: estudo de caso do Passaúna - PR. Dissertação, PPGERHA, Universidade Federal do Paraná.
- HILGERT, S.; SORITI, K. (2016). Development of a multi-frequency echo-sounding method for sediment detection in Lake Passauna, Brazil – Acoustic results. SeWaMa Project Report.
- HOROWITZ, A. J. (2003). An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, 17, 3387-3409.
- RAUEN, W. B.; CASTRO, C. O.; SILVA, M. G. (2017). Caracterização hidrossedimentológica do rio Passaúna, PR, Brasil, a partir de dados históricos. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- RAUEN, W. B.; FERRARESI, A. C. S.; MARANHO, L. T.; OLIVEIRA, E.; COSTA, R. M. P.; ALCANTARA, J. K. A.; DZIEDZIC, M. (2018). Index-based and compliance assessment of water quality for a Brazilian subtropical reservoir (em revisão).
- SALAS, J. D.; SHIN, H. S. (1999). Uncertainty analysis of reservoir sedimentation. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 339-350.
- SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; DE CESARE, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595-614.
- SILVA, M. G. (2017). Subsídios à caracterização de processos hidrossedimentológicos no rio Passaúna e em seu reservatório. Trab. Concl. Curso (Engenharia Civil), Universidade Positivo.
- SIQUEIRA, A. C. (2014). Avaliação do processo de assoreamento do reservatório de abastecimento de água do rio Passaúna. Trab. Concl. Curso (Engenharia Civil), Universidade Positivo.
- Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SUREHMA) (1992). Estudo do assoreamento do reservatório Passaúna. Relatório DERH/DIRH/SHA.
- VEIGA, B. V.; DZIEDZIC, M. (2010). Estimating nutrient loads in the Passaúna reservoir with FLUX. *Water International*, 35(2), 210-222.