

ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS: UMA REVISÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DO LAGO

Itamara Mary Leite de Menezes Taveira¹; Iran Eduardo Lima Neto²; Alexandre Cunha Costa³

ABSTRACT – The construction of superficial reservoirs generates several changes in the sediment transport in the rivers. These changes favor the accumulation of sediments in the reservoirs, with the passage of time the reservoir decrease their accumulation capacity due to the silting process. When the reservoir is silted, its morphology is modified and this alteration influences the features of the lake, as well as the capacity of regularization the reservoir. Thus, knowledge of this process is of fundamental importance in ensure its sustainable management. However, it is still a challenge, especially in hydrographic basins with a dense reservoir network, as is the case in the Brazilian semi-arid region, the forecast of silting in the reservoirs, in the sense of defining their sedimentation taxes and understanding how the shape of the lake changes with the silting process and how this change can influence its capacity for regularization capacity. In this context, this work shows the sedimentation rates for several reservoirs in the semi-arid region and presents an overview of the methods used to reproduce the morphology and distribution of sediments in the lake.

Palavras-Chave – Assoreamento, reservatório, morfologia do lago

1) Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará – Fortaleza (CE), Brasil. itamara.taveira@cogerh.com.br

2) Universidade Federal do Ceará – Fortaleza (CE), Brasil. iran@deha.ufc.br

3) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – Redenção (CE), Brasil. cunhacos@gmail.com

1 - INTRODUÇÃO

A predominância de rios intermitentes fez dos reservatórios de regularização a fonte hídrica mais confiável na garantia do abastecimento humano e animal na região semiárida brasileira. Por estar sujeito à estiagem durante a maior parte do ano, estabeleceu-se uma cultura de construção de reservatórios superficiais como forma de transportar água no tempo (Campos *et al.* 2016 e Campos *et al.* 2018). Por conseguinte, o sistema de drenagem nesta região é constituído de uma densa rede de reservatórios.

Atualmente, grande parte dos reservatórios do Brasil se encontram total ou parcialmente assoreados, principalmente os de pequeno e médio portes. Esse processo vem apresentando uma acentuação, devido ao uso insustentável do solo e dos recursos naturais. De acordo com Araújo *et al.* (2010) várias atividades sociais e econômicas nas bacias hidrográficas podem gerar impactos que reduzirão disponibilidade de água nos reservatórios, tanto em aspectos quantitativos quanto qualitativos.

Devido ao assoreamento, os reservatórios perdem em torno de 1% de sua capacidade de armazenamento por ano, em termos médios globais (Schleiss *et al.* 2016), o que resulta no comprometimento de seus usos, como abastecimento humano, dessedentação animal, geração de energia, produção agrícola e industrial, além disso, pode causar o desequilíbrio do ecossistema aquático e comprometer a qualidade da água.

Quando o assoreamento do reservatório ocorre, a morfologia do ambiente aquático se modifica e esta modificação exerce influência nas características físicas, químicas e biológicas da água, na forma de transporte e acumulação de sedimentos e nutrientes, bem como na capacidade do reservatório em regularizar vazões (Stefanidis e Papastergiadou, 2012; Kolada, 2014; Campos *et al.* 2018; Lawniczak-Malińska *et al.* 2018).

A influência da morfologia na limnologia é um consenso na comunidade acadêmica. Porém, ainda é um desafio, principalmente em bacias hidrográficas com uma densa rede de reservatórios, como é o caso da região semiárida brasileira, a previsão do assoreamento em reservatórios, no sentido de definir sua taxa de sedimentação e compreender como a forma do lago se modifica com o processo de assoreamento e como esta modificação pode influenciar sua capacidade de regularizar vazões. Neste contexto, este trabalho discorre sobre as taxas de sedimentação para diversos reservatórios e apresenta um panorama sobre os métodos utilizados para representar a morfologia e distribuição dos sedimentos no lago.

2 - VARIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DOS RESERVATÓRIOS NO SEMIÁRIDO DEVIDO AO ASSOREAMENTO

Os reservatórios têm sua vida útil pouco dependente dos elementos construtivos da própria barragem, mas são amplamente dependentes dos processos de erosão e sedimentação (Mincev *et al.* 2019). Assim sendo, o conhecimento da taxa de sedimentação deve constituir como objetivo fundamental nas etapas de projeto e operação do reservatório, de forma a garantir o seu gerenciamento sustentável.

Araújo (2003) desenvolveu o modelo HidroSed para estimar o assoreamento em reservatórios do semiárido. A taxa de assoreamento característica foi de aproximadamente $2,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, o que corresponde à perda média de volume de 1,85% a cada década, o que significa uma perda de cerca de 22 hm^3 de capacidade de acumulação a cada ano para os reservatórios analisados.

Em reservatórios da região semiárida brasileira Pinheiro *et al.* (2015) observaram forte correlação positiva entre a taxa de retenção de sedimentos e o volume dos reservatórios até o limite de 10 hm^3 , para volumes superiores a este valor, a correlação mostrou-se fraca e negativa. Os autores também observaram correlação entre a taxa de retenção de sedimentos com a área de drenagem e com tempo de operação.

Pesquisas de campo em sete bacias hidrográficas no estado do Ceará apresentaram a redução média anual na capacidade de armazenamento dos reservatórios de 0,56% em uma bacia hidrográfica urbana e 0,18% em bacias rurais devido ao assoreamento (Araújo *et al.* 2010). Neste estudo a taxa média de assoreamento dos reservatórios atingiu $450 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e a morfologia do reservatório foi modificada para uma geometria mais aberta, o que favorece as perdas por evaporação.

Analisando os gráficos cota vs. volume de reservatórios do estado do Ceará, de forma a verificar a perda de volume destes pelo processo de assoreamento, Taveira *et al.* 2019 encontraram uma taxa média de perda da capacidade de armazenamento de 1,33% ao ano para 66 reservatórios.

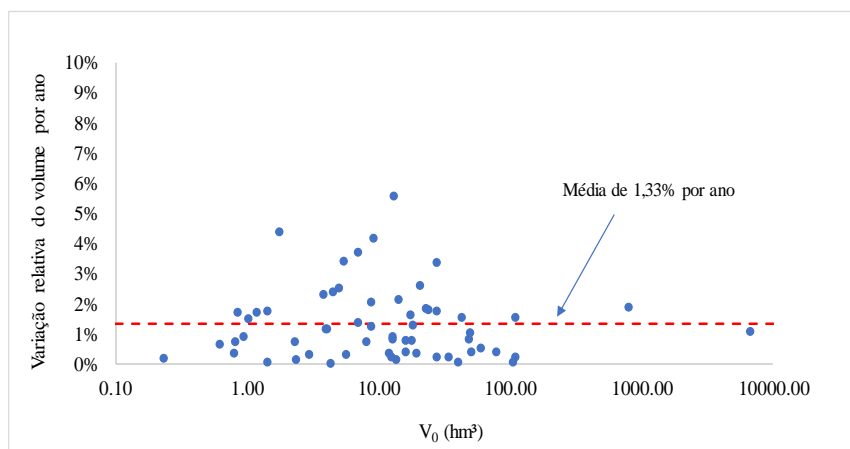


Figura 3 - Variação relativa do volume por ano em função do volume inicial (Taveira *et al.* 2019)

Em regiões com densa rede de reservatórios a taxa de sedimentação de um reservatório é fortemente impactada pela existência de reservatórios a montante. Lima Neto *et al.* (2011)

investigaram por um período de 25 anos a distribuição de sedimentos em uma bacia semiárida brasileira que contém mais de 4000 reservatórios. Os autores observaram que a taxa de sedimentação nos reservatórios grandes ou estratégicos ($> 50 \text{ hm}^3$) está condicionada à retenção dos sedimentos nos micros ($<1 \text{ hm}^3$), pequenos ($1 \text{ a } 10 \text{ hm}^3$) e médios ($10 \text{ a } 50 \text{ hm}^3$) reservatórios a montante, que correspondeu respectivamente a 5, 17, 30 e 48% da retenção total de sedimentos. Resultado semelhante foi encontrado por Mamede *et al.* (2018), quando verificaram que a presença de vários reservatórios a montante conseguiu reter quase 42% da produção de sedimentos da bacia hidrográfica da barragem Benguê.

3 - MORFOLOGIA DOS RESERVATÓRIOS

As características morfológicas dos lagos influenciam as condições dinâmicas dos sedimentos (sedimentação ou ressuspensão). Lagos com grandes áreas e pequenas profundidades, tendem a apresentar maiores áreas com predominância de erosão e transporte de sedimento. Por outro lado, a taxa de sedimentação tende a aumentar em lagos mais profundos (Telteu e Zaharia, 2012).

Desta forma, para compreensão da dinâmica do transporte e da deposição de sedimentos nos reservatórios se faz necessário o conhecimento da sua morfologia, expressa usualmente por meio da curva cota-área-volume. Porém esta informação se encontra desatualizada ou inconsistente para a maioria dos reservatórios, seja por imprecisões nos levantamentos originais ou por assoreamento do manancial. Além disso, levantamentos topográficos e batimétricos tradicionais para mapear as extensões de água dos reservatórios consomem muito tempo e recursos financeiros e também são desafiadores devido ao grande número de reservatórios de superfície na região (Pereira *et al.* 2019). Neste contexto, inúmeros pesquisadores têm buscado representar a morfologia dos reservatórios a partir de dados de campo, imagens de satélite e equações empíricas.

3.1 - Representações da morfologia dos reservatórios

A equação empírica proposta por Molle e Cadier (1992), ao analisarem mais de 400 reservatórios no semiárido brasileiro, para estimativa do volume dos reservatórios ainda é bastante utilizada no planejamento de recursos hídricos no Brasil. Entretanto, a utilização do valor médio do coeficiente de forma e da mediana do coeficiente de abertura proposto por Molle e Cadier (1992) em 312 reservatórios do Ceará para vários níveis de acumulação do reservatórios resultou em um erro percentual absoluto médio de 94% em comparação com os dados de pesquisas convencionais, o que pode ser crítico para avaliações de disponibilidade hídrica (Pereira *et al.* 2019).

Para melhor compreensão do processo de armazenamento em função da capacidade do reservatório, regime fluvial, evaporação e morfologia Campos (2010), desenvolveu um procedimento simplificado, o Diagrama Triangular de Regularização (RTD - Regulation Triangle

Diagram). Esta metodologia se aplica às condições de rios intermitentes, característico da região semiárida brasileira, e tem sido amplamente utilizada em estudos hidrológicos no estado do Ceará. De acordo com esse método a morfologia do reservatório pode ser aproximada como uma forma cônica simples, com base na seguinte relação entre a capacidade de armazenamento e o nível da água.

$$Z(h) = \alpha h^3$$

Onde α é o fator de forma do reservatório dado por $\alpha = \frac{K}{h_{max}^3}$, K é a capacidade de armazenamento do reservatório e h_{max} é a profundidade máxima do reservatório.

Hakanson (1981) desenvolveu uma metodologia baseada em curvas hipsométricas para classificar a morfologia dos lagos em muito convexos, convexos, ligeiramente convexos, lineares e côncavos. Esta metodologia foi aplicada em diversos estudos limnológicos, com o intuito de analisar a morfologia dos lagos e suas relações com a ecologia desses ambientes (Hakanson, 2004 e Hakanson *et al.* 2004). Cabe ressaltar que esta classificação foi desenvolvida utilizando dados de lagos naturais em regiões temperadas.

A classificação morfológica proposta por Hakanson (1981) foi utilizada por Campos *et al.* 2016 para estudar os efeitos da morfologia no processo de armazenamento no reservatório. Para tanto, os autores transformaram as curvas morfológicas de área e profundidade do lago em diagramas de volume e profundidade; porém mantendo os mesmos limites de classes definidos no diagrama original. A Figura 1a apresenta o diagrama para classificação morfológica de Hakanson (1981) e a Figura 1b apresenta o diagrama com a adaptação realizada por Campos *et al.*, 2015.

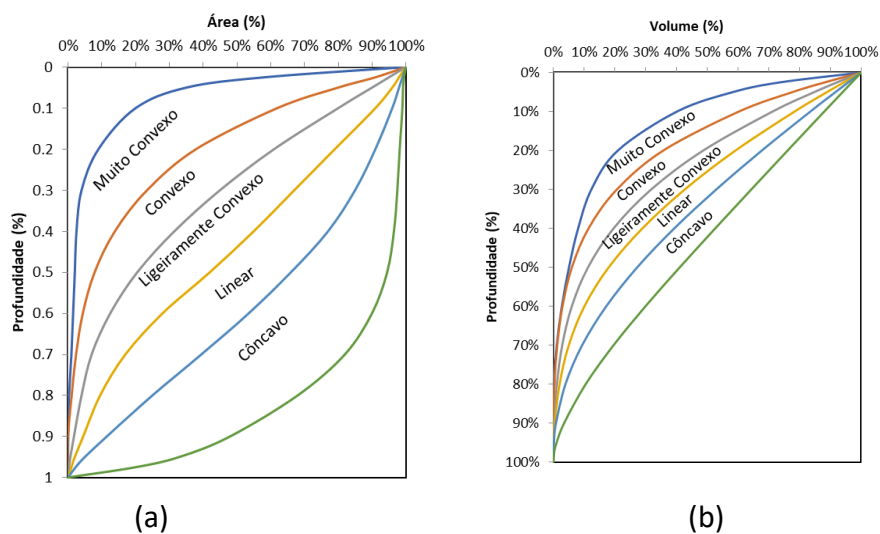


Figura 1 - Classificação dos lagos como muito convexa, convexa, levemente convexa, linear, ou côncavo de acordo com (a) o diagrama da área de profundidade de Håkanson (1981) e (b) o diagrama proposto por Campos *et al.* 2016

A modelagem hidrológica utilizando a forma cônica dos reservatórios (Campos, 2010) e a forma original proposta por Hakanson (1981) e adaptada por Campos *et al.* 2016 apresentou diferenças significativas no balanço hídrico. Os reservatórios classificados como convexos são menos eficientes do que os cônicos com a mesma capacidade de armazenamento e profundidade máxima, devido às suas maiores perdas por evaporação. Entretanto a tendência oposta foi verificada com os reservatórios ligeiramente convexos e lineares (Campos *et al.* 2016).

3.2 - Distribuição dos sedimentos no reservatório

Os sedimentos são depositados em toda a extensão do reservatório e profundidade, porém a distribuição dos mesmos no lago depende de características como a geometria e morfologia dos lagos, os rios afluentes, a granulometria dos sedimentos, a vazão afluente, a velocidade dentro do lago, a operação do reservatório, entre outros. Mohammadzadeh-Habili e Heidarpour (2010) propuseram um método empírico complexo para previsão da distribuição dos sedimentos nos reservatórios relacionada ao volume do sedimento e às características originais do reservatório.

De acordo com Yang ,2006 os sedimentos podem ser depositados nos reservatórios seguindo uma distribuição uniforme ou não uniforme ao longo do perímetro úmido ou preenchendo o fundo do lago e estes três padrões de distribuição ocorrem em reservatórios do semiárido cearense (Campos *et al.* 2018).

Campos *et al.* 2018 adaptou os padrões de assoreamento propostos por Yang (2006) à forma cônica invertida proposta por Campos (2010) e mostrou que a distribuição dos sedimentos no reservatório pode afetar significativamente a sua eficiência, sendo que, a deposição do tipo uniforme resulta em maior rendimento, seguida do tipo não uniforme e do preenchimento do fundo do lago. Além disso, a distribuição dos sedimentos proporcional a profundidade da água é a que melhor representa este processo nos reservatórios do semiárido.

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na região semiárida brasileira é comum imputar unicamente ao fenômeno climático da seca a problemática da escassez de água. Entretanto, o assoreamento de reservatórios constitui um fator importante para redução da disponibilidade hídrica, dado que, as reservas superficiais são a principal fonte de abastecimento desta região. O estudo realizado por Taveira et al. 2019 indica que em uma década os reservatórios analisados no estado do Ceará podem deixar de armazenar 233,09 hm³ de água, o que equivale a 90,29% do volume de água necessário para abastecer a Região Metropolitana de Fortaleza por um ano.

Sabendo que os reservatórios têm sua vida útil definida pelos processos de erosão e sedimentação o conhecimento desses processos é de fundamental importância na garantia do seu

gerenciamento de forma sustentável. Os altos valores apresentados para a taxa de sedimentação dos reservatórios nos indicam que a sua morfologia se modifica durante a sua vida operacional, porém ainda são incipientes o conhecimento sobre a influência da morfologia na distribuição dos sedimentos e eficiência dos reservatórios.

A maioria dos estudos considera que os reservatórios tenham a forma cônica invertida, contudo, outras formas do lago como as propostas por Hakanson (1981) e identificadas em reservatórios do semiárido brasileiro (Campos *et al.* 2016), deverão contribuir para um balanço hídrico mais preciso do reservatório.

Sendo assim, é um desafio, principalmente em bacias hidrográficas com uma densa rede de reservatórios, como é o caso da região semiárida brasileira, a previsão do assoreamento em reservatórios, no sentido de definir sua taxa de sedimentação e compreender como a forma do lago se modifica com o processo de assoreamento e como esta modificação pode influenciar sua capacidade de regularizar vazões. Cabe ressaltar que estudos sobre sedimentação em reservatórios são um dos principais requisitos para uma efetiva gestão dos recursos hídricos.

BIBLIOGRAFIA

de ARAÚJO, J. C. (2003) *“Assoreamento em reservatórios do semiárido: modelagem e validação”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 8, n.2, p. 39-56.

de ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2006). *“Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil”*. Hydrological Sciences Journal- Journal des Sciences Hydrologiques, v.51, p. 157-170.

CAMPOS, J.N.B. (2010) *“Modeling the yield-evaporation-spill in the reservoir storage process: The Regulation Triangle Diagram”*. Water Resources Management, v. 24, p. 3487-3511.

Campos, J. N.; Neto, I. E. L.; Studart, T. M.; Nascimento, L. S. (2016) *“Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil”* Anais da Academia Brasileira de Ciências.

CAMPOS, J.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M.; CAMPOS, J.N. B.(2018) *“Influence of sediment distribution on the relationships among reservoir yield, spill, and evaporation losses”*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, p. 849-856.

HÅKANSON, L. (1981) *A manual of lake morphometry*. Berlim: Springer Verlag.

HÅKANSON I. 2004. *Lakes: form and function*. The Blackburn Press, New Jersey.

HÅKANSON I, BlenCkneR t anD MalMaeus M. 2004. *“New, general methods to define the depth separating surface water from deep water, outflow and internal loading for mass-balance models for lakes”*. Ecol Model, v. 175, p. 339-352.

- KOLADA, A. (2014). "The effect of lake morphology on aquatic vegetation development and changes under the influence of eutrophication". *Ecological Indicators*, vol. 38, p. 282-293.
- LAWNICZAK-MALIŃSKA, A.; PTAK, M.; S. C.; CHOIŃSKI, A. (2018) "Impact of Lake Morphology and Shallowing on the Rate of Overgrowth in Hard-Water Eutrophic Lakes". *Water*, v.10,1827.
- LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; de ARAÚJO, J. C.(2011) "Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin." *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, Taylor & Francis, 56, 319-333.
- Mamede, G.; Guentner, A.; Medeiros, P.; Araújo, J.C.; Bronstert, A. (2018). "Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil." *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 23.
- MINCEV, I.; BLINKOV, I.; TREDAFILOV, A. (2019). "Sedimentation rates and lifespan analyses in the reservoir "Kalimanci"". *Contributions, Section of Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences, MASA*, Vol. 40, N. 2, p. 181–189
- MOLLE, F.; CADIER, E. (1992). *Manual do pequeno açude. SUDENE*, Recife
- MOHAMMADZADEH-HABILI, J.; HEIDARPOUR, M. (2010) "New Empirical Method for Prediction of Sediment Distribution on Reservoirs." *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 15, n. 10, p. 813-821.
- PEREIRA, B.; MEDEIROS, P.; FRANCKE, T.; RAMALHO, G.; ARAÚJO, J. C. (2019) "Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semi-arid region with high reservoir density." *Hydrological Sciences Journal*, v.64.
- PINHEIRO, E. A., ALMEIDA, C. L. Farias, T. R. L., Araújo, J. C. (2015) "Sediment retention rate in reservoirs of the Brazilian semiarid environment". *Water Resources and Irrigation Management*. v.41 , n. -3, p.33- , 39.
- SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; DE CESARE, G. (2016). "Reservoir sedimentation". *Journal of Hydraulic Research*, v.54(6), 595-614.
- STEFANIDIS, K.; PAPASTERGIADOU, E. (2012) "Relationships between lake morphometry, water quality, and aquatic macrophytes, in greek lakes". *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 21, n. 10A, p. 3018-3026.
- TELTEU, C.; ZAHARIA, L. (2012). "Morphometrical and Dynamical Features of the South Dobrogea Lakes, Romania". *Procedia Environmental Sciences*, V.1, p. 164–176.
- TAVEIRA, I. M. L. M.; de OLIVEIRA, L. C. S.; Lima Neto, I. E.; Costa, A. C. (2019) "Análise da variação da capacidade de armazenamento de reservatórios do semiárido cearense em escala de planejamento". In *Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu/PR.
- YOUNG, R.A.; ONSTAD, C.A.; BOSCH, D.D.; ANDERSON, W.P. (1987) "AGNPS, Agricultural non-point source pollution model: a watershed analysis tool". US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Conservation Research Report, v.35, 65p.