Realização PUC CAMPINAS USP
Workshop Internacional
SUSTENTARE & WIPIS 2025
Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos
Apoio Institucional CAPES CNPq

Resumo Expandido

COMPREENDENDO OS EFEITOS DA EUTROFIZAÇÃO NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

Samara Soares de Sousa
UFERSA, Pau dos Ferros, RN, Brasil
samara.sousa94347@alunos.ufersa.edu.br
Luis Vinicius Lima Soares
UFERSA, Pau dos Ferros, RN, Brasil
luis.soares@alunos.ufersa.edu.br
Jacineumo Falcão de Oliveira
UFERSA, Pau dos Ferros, RN, Brasil
jacineumo@ufersa.edu.br
Wilza da Silva Lopes
UFERSA, Pau dos Ferros, RN, Brasil
wilza@ufersa.edu.br

Resumo: A eutrofização, processo de enriquecimento excessivo de nutrientes em corpos hídricos, representa uma grave ameaça à segurança hídrica no semiárido brasileiro. Intensificada por atividades humanas, como lançamento de esgoto e poluição agrícola, este fenômeno é agravado pelas condições climáticas regionais, chuvas irregulares, alta evaporação e secas prolongadas. Durante estresses hídricos, a redução do volume dos reservatórios concentra poluentes e nutrientes, desencadeando crescimento de algas e cianobactérias. As consequências incluem a redução do oxigênio disponível, produção de toxinas, mortandade de fauna aquática, elevação dos custos de tratamento, comprometendo os usos múltiplos da água e podendo inviabilizar o abastecimento público quando ultrapassados os limites legais. Assim, a avaliação do estado trófico nestes ecossistemas exige cuidados especiais, pois índices convencionais mostram limitações na região semiárida. A turbidez da água, frequentemente influenciada por material inorgânico em suspensão e não apenas por fitoplâncton, distorce medições baseadas na transparência. Esta particularidade reforça a necessidade de desenvolver e validar indicadores adaptados à realidade local, como o Índice de Trofia para o Semiárido (ITS). O manejo eficaz do problema enfrenta o duplo desafio das cargas de fósforo: externas (originadas na bacia hidrográfica) e internas (armazenadas nos sedimentos do reservatório). Estudos com modelos de balanço de massa demonstram que a persistência da carga interna pode sustentar a eutrofização mesmo após o controle das fontes externas. Estratégias de mitigação bem-sucedidas, portanto, dependem de uma abordagem integrada. Dessa forma, é imprescindível combinar o controle da poluição difusa e pontual na bacia com técnicas diretas de manejo da carga interna, como dragagem, aplicação de coagulantes ou biomanipulação. Adicionalmente, a operação dos reservatórios deve incorporar critérios de qualidade da água para garantir a disponibilidade hídrica dentro dos padrões exigidos. A sustentabilidade dos recursos hídricos no semiárido, portanto, está intrinsicamente ligada à implementação de políticas públicas articuladas, fundamentadas em diagnóstico científico preciso e em uma gestão adaptativa que assegure a resiliência destes ecossistemas frente às pressões antrópicas e climáticas.

Palavras-chave: Estado trófico, semiárido, disponibilidade hídrica, mitigação, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A eutrofização, que etimologicamente significa “bem nutrido” e pode ter causas naturais ou antrópicas, resulta do acúmulo de nutrientes nas águas, principalmente nitrogênio (N) e fósforo (P), sendo descrita como o envelhecimento gradual ou a condição eutrófica de uma massa de água [1]. Os reservatórios, sendo ecossistemas artificiais com múltiplas funções, como abastecimento e geração de energia, sofrem impactos significativos da poluição hídrica, como o lançamento de esgoto doméstico, que gera a eutrofização [2]. Os principais efeitos incluem o crescimento excessivo de algas, produção de cianotoxinas, mortandade de organismos, consumo de oxigênio dissolvido e o aumento dos custos de tratamento da água [2]. No

semiárido brasileiro, a situação é agravada por particularidades regionais, como rios intermitentes e alta evapotranspiração [3]. Durante as secas, a redução do volume hídrico intensifica a concentração de nutrientes e a biomassa fitoplanctônica [3], tornando os lagos dessa região mais suscetíveis à eutrofização do que os de regiões úmidas, o que reforça a necessidade de estudar seus impactos no abastecimento humano [4]. Nesse contexto, este trabalho busca analisar as discussões sobre os efeitos da eutrofização na disponibilidade hídrica no semiáridos brasileiro por meio de estudo bibliográfico nos últimos cinco anos.

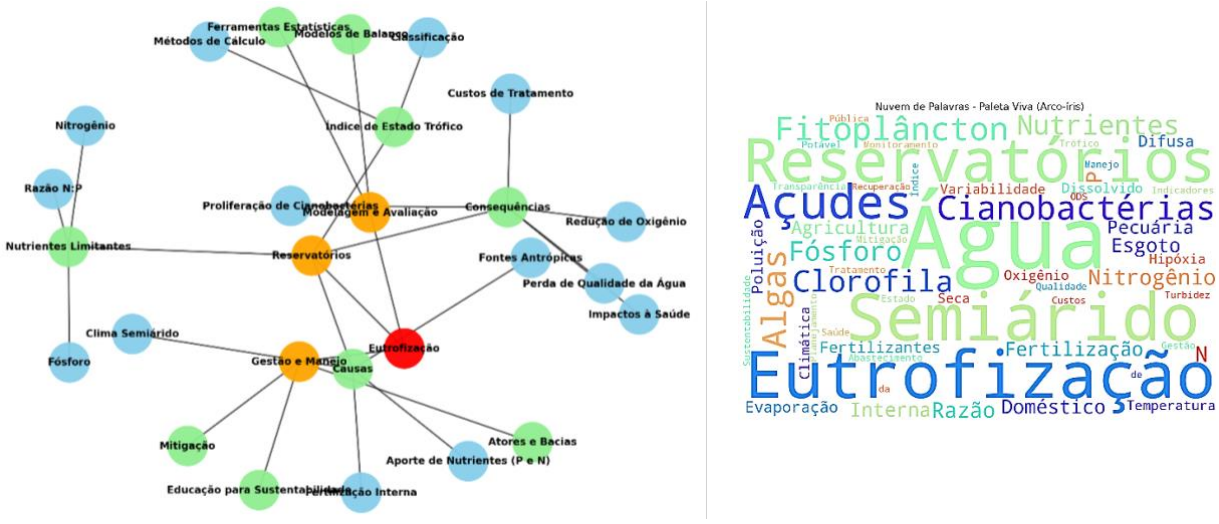
2. METODOLOGIA

Foi realizado um estudo de revisão sistemática e análise conceitual para correlacionar a eutrofização com a degradação qualitativa e quantitativa da água e a vulnerabilidade hídrica em reservatórios semiáridos. A pesquisa, de caráter exploratório e explicativo, buscou um diagnóstico sistêmico das causas e fluxos de fósforo.

A coleta de dados ocorreu por meio de levantamento bibliográfico no Google Scholar, incluindo dados primários e secundários de monitoramento de qualidade e volume de água disponibilizados por órgãos gestores. A busca utilizou palavras-chave combinadas com operadores booleanos, como: eutrofização, trophic state, índice de estado trófico (IET/TSI), qualidade de água, caatinga, semiárido. A análise da vulnerabilidade hídrica resultante da eutrofização foi conduzida a partir da relação entre qualidade e quantidade de água descritas nos estudos. Por fim, foram identificadas e sintetizadas estratégias de manejo e mitigação adequadas ao contexto semiárido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 1. Mapa de conexões hierarquizado e rede de palavras da eutrofização em reservatórios do semiárido.



3.1. Avaliação do Estado Trófico e a Influência da Escassez Hídrica na Degradação Qualitativa

O problema da eutrofização é um desafio global que compromete o estado ecológico e a qualidade da água [5]. No semiárido brasileiro, é recorrente em reservatórios de água calma, devido ao aumento de nutrientes e ao crescimento fitoplanctônico [6]. Esse desequilíbrio,

associado à ação antrópica e às condições locais, foi evidenciado em diferentes reservatórios, como os da Bacia Piancó-Piranhas-Açu, classificados entre eutróficos e hipereutróficos [7]. Além da redução de oxigênio disponível no meio e do excesso de biomassa, há aumento de cianobactérias e liberação de cianotoxinas, o que gera preocupações para gestão ambiental e abastecimento. A vulnerabilidade aumenta devido ao clima semiárido, marcado por secas prolongadas e chuvas irregulares [8][9]. Em períodos secos, a redução do volume hídrico eleva a concentração de nutrientes e a trofia [10]. Isso impacta usos múltiplos da água, elevando custos de tratamento ou inviabilizando o abastecimento [11][12], com parâmetros que superam limites da CONAMA 357/2005 e da Portaria GM/MS nº 888/2021[13].

2. Desafios de Classificação e a Validação de Indicadores Tróficos para o Semiárido

O Índice de Estado Trófico (IET) é uma ferramenta crucial de gestão que simplifica e resume as complexas informações sobre a qualidade da água [14]. Contudo, a aplicação de IETs clássicos, como o proposto por Carlson (1977) [15], que foram desenvolvidos para regiões de clima temperado, tem apresentado limitações consideráveis em reservatórios tropicais semiáridos. Isso se deve, principalmente, ao fato de que nesses ambientes a transparência da água (medida pelo Disco de Secchi - DS) pode ser afetada pela elevada turbidez causada por material em suspensão, e não apenas pela biomassa planctônica. Como resultado, o uso de modelos baseados em DS é frequentemente desconsiderado ou pode superestimar o grau de eutrofização em comparação com índices que utilizam apenas Fósforo Total (PT) e Clorofila-a (Chl-a) [16].

A necessidade de um diagnóstico específico para cada sistema aquático justifica a busca por índices adaptados, como o proposto por Lamparelli [16], que considera apenas PT e Chl-a [17]. Mais recentemente, foram desenvolvidos índices adaptados especificamente para a região, como o Índice de Trofia para o Semiárido (ITS), que visa ser mais sensível às variações ambientais locais [18]. Como estratégia, a literatura tem demonstrado o uso Análise de Componentes Principais (PCA) para identificar as variáveis mais representativas no processo de eutrofização, como PT, Nitrogênio Total (NT), Chl-a, e Densidade de Cianobactérias.

3. Quantificação das cargas externa e interna de fósforo e indisponibilidade hídrica

A eutrofização em reservatórios do semiárido é intensificada pela atuação conjunta das cargas externas e internas de fósforo [19]. As cargas externas vêm principalmente de esgoto doméstico precário, escoamento agrícola, pecuária e erosão [10][20]. Já a carga interna, resultante da ressuspensão de sedimentos ricos em nutrientes, mantém concentrações elevadas mesmo após a redução das fontes externas [21][10]. Modelos de balanço de massa (como o de Chapra e Canale 1991), permitem simular essa dinâmica, evidenciando que a redução das cargas externas nem sempre garante a diminuição imediata da eutrofização, devido à persistência das internas [10][22][23]. Esse processo compromete a disponibilidade de água, já que, ao ultrapassar limites de enquadramento como os da Classe 4 da Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece os limites dos corpos de água e as diretrizes para o seu enquadramento, não se limitando a um único conjunto de valores 13]. os reservatórios deixam de ser adequados para abastecimento humano [24]. Simulações indicam que, sob a Política de Operação Padrão

(POP), concentrações de fósforo superam os limites legais em até 59% do tempo, evidenciando a necessidade de integrar critérios de qualidade às regras de operação [9].

4. Estratégias de Manejo e Mitigação para o Semiárido

O manejo e a mitigação de ambientes eutrofizados no semiárido brasileiro apresentam constantemente condições deficitárias e exigem uma análise sistêmica integrada, interligando o conhecimento científico com a gestão dos recursos hídricos setoriais. Assim, o sucesso das medidas depende de um diagnóstico específico para cada sistema, que deve envolver a análise das fontes e fluxos de fósforo, a qualidade da água e a dinâmica temporal dos ecossistemas [25]. Nesse sentido, destaca-se que a principal lacuna no manejo está associada ao entendimento e gerenciamento da carga interna de fósforo nos corpos hídricos [26]. As estratégias devem ser focadas prioritariamente na redução conjunta das cargas externas e internas. A redução da carga de fósforo afluente (cargas externas), geralmente proveniente de esgotos e uso do solo na bacia, é uma medida que, em cenários de simulação, mostra melhorias notáveis na qualidade da água. Contudo, a persistência da eutrofização, mesmo com a redução das cargas externas, exige o foco na mitigação da carga interna. Técnicas de manejo da carga interna incluem a remoção do sedimento/dragagem, inativação do fósforo, a exemplo da aplicação de coagulantes, adsorventes naturais e biomanipulação [5][26].

4.CONCLUSÃO

A eutrofização compromete severamente a segurança hídrica no semiárido, sendo intensificada pela combinação de cargas externas e internas de fósforo. Estratégias eficazes exigem controle integrado das fontes poluidoras e manejo inovador da carga interna de nutrientes, aliado à incorporação de critérios de qualidade da água na operação de reservatórios. Assim, a sustentabilidade hídrica regional depende de políticas públicas baseadas em conhecimento científico específico para garantir a resiliência dos ecossistemas aquáticos.

5.AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao GEPAE - Grupo de Estudo e Pesquisa em Qualidade de Água, Tratamento e Reúso de Efluentes, e a UFERSA, campus Pau dos Ferros.

REFERÊNCIAS

[1] Akinnawo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. Environmental Challenges, 12, 100733.
[2] Gadelha, J. E. S., et al. Consequências da eutrofização em corpos hídricos. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, 3, 1-13, 2022.
[3] Monicelli, F., Rocha Junior, C. A. N. D., Lima, S., Diniz, I. S. M., & Becker, V. (2023). Trophic state in Brazilian semiarid reservoirs after reflooding. RBRH, 28, e37.
[4] Wiegand, M. C., Piedra, J. I. G., & Araújo, J. C. (2016). Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil), Engenharia Sanitária e Ambiental, 21(2), 415-424.
[5] Silva, E M. D. (2024). Controle da eutrofização em reservatórios no semiárido brasileiro: modelagem dos efeitos da operação, do manejo de sedimentos e da redução de cargas

externas. 2024. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

[6] Oliveira, C. S. P. et al (2020). Reflexões sobre o desafio ambiental: níveis de eutrofização e floração de cianobactérias na Bacia Apodi-Mossoró. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, 11(5), 519-530.

[7] Rocha, S. M. G.et al (2020). Árvore de falhas como método de identificação de processos associados ao desenvolvimento da eutrofização em reservatórios. In: XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. 1-10.

[8] Silva, T. T. D., Saraiva, M. D. A., & Becker, H. (2024). Proposal for a trophic status index for brazilian semi-arid reservoirs. Revista Caatinga, 37, e12405.

[9] Gomes, M. (2020). Definição de regra de operação de reservatórios na região semiárida em situações de escassez hídrica e eutrofização. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[10] Rocha, D. M. J.; Lima Neto, I. E. (2021). Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs. Environmental Science and Pollution Research, 29(7), 10027–10046.

[11] Santos, E. O.; Medeiros, P. R. P. (2023). A ação antrópica e o processo de eutrofização no Rio Paraíba do Meio. Sociedade & Natureza, 35(1), e66441.

[12] Pacheco, C. H. A.; De Ceballos, B. S. O.; Lima Neto, I. E. (2016). Uma análise de regressão para determinação do nível de eutrofização de um reservatório do semiárido brasileiro. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales, 9(2), 274-289.

[13] Resolução CONAMA. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450.

[14] Von Sperling, M. (2014). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Editora UFMG. 452p.

[15] Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography, 22(2), 361-369.

[16] Lamparelli, M. C. (2004). Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo.

[17] Maia, M. R. R.; Nunes, A. B. A (2024). Utilização de métodos para a avaliação do índice de estado trófico de um açude no semiárido cearense. Revista de DAE, 72(246), 1-11.

[18] Barbosa, K. C. (2021). Índice de estado trófico adaptado aos reservatórios do semiárido cearense. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús.

[19] Ji, N. et al (2021). Internal positive feedback promotes water quality improvement for a recovering hyper-eutrophic lake: a three-dimensional nutrient flux tracking model. Science of The Total Environment, 772, 145505.

[20] Silvino, R. F.; Barbosa, F. A. R. (2015). Eutrophication potential of lakes: an integrated analysis of trophic state, morphometry, land occupation, and land use. Brazilian Journal of Biology, 75(3), 607-615.

[21] Cavalcante, H.; Araújo, F.; Becker, V.; Barbosa, J. E. L. (2021). Internal phosphorus loading potential of a semiarid reservoir: an experimental study. Acta Limnologica Brasiliensia, 33, e6.

[22] Toné, A.; Lima Neto, I. (2019). Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros. Revista DAE, 221(68), 1423156.

[23] Araújo, G. M.; Lima Neto, I. E.; Becker, H. (2019). Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel-shallow reservoir system in the Brazilian semiarid. An Acad Bras Cienc, 91, e20180441.

[24] Almeida, (2021). Impactos da eutrofização na disponibilidade hídrica de reservatórios no semiárido brasileiro. Universidade Federal do Ceará.

[25] Lürling, M.; Mucci, M. (2020). Mitigating eutrophication nuisance: in-lake measures are becoming inevitable in eutrophic waters in the Netherlands. Hydrobiologia, 847, 4447–4467.

[26] Osgood, R. A. (2017). Inadequacy of best management practices for restoring eutrophic lakes in the United States: guidance for policy and practice. Inland Waters, 7(4), 401-407.