

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

Análise das variações interanuais, sazonais e nictemerais do número de Richardson em um pequeno reservatório urbano localizado em Fortaleza/CE

Sofia Midauar Gondim Rocha¹ ; João Victor Barros da Silva² Francisco de Assis de Souza Filho³ & Iran Eduardo Lima Neto⁴

RESUMO

No contexto hídrico de secas periódicas do semiárido brasileiro é fundamental o entendimento da hidrodinâmica e da qualidade da água dos reservatórios, visto que esses são a base do abastecimento de água da população. Para isso, tem-se o adimensional de Richardson, o qual avalia a estabilidade da estratificação térmica do corpo hídrico. O objetivo deste estudo é avaliar as variações interanuais, sazonais e nictemerais da estratificação térmica em um reservatório urbano localizado em Fortaleza, Ceará, por meio do modelo hidrodinâmico e de qualidade de água CE-QUAL-W2 e número de Richardson (Ri). Os resultados apontaram uma maior influência da variabilidade sazonal e nictemeral para o corpo hídrico avaliado no que tange à estratificação térmica. No caso da variação sazonal, observou-se maior estabilidade térmica no período seco, enquanto o comportamento nictemeral indicou o aumento do Ri ao longo do dia, i.e. estratificação mais estável ao final do dia e reservatório dominado pela mistura no início do dia. Junto a isso, as taxas de variação do Ri em relação à média anual para as condições sazonal e nictemeral obtiveram a mesma ordem de grandeza. Dessa forma, o presente estudo se apresenta como uma possível ferramenta auxiliar na gestão de recursos hídricos.

Palavras-Chave – Estratificação, modelagem hidrodinâmica, número de Richardson

1) Universidade Federal do Ceará – UFC, Dept. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, (85) 991996429, sofiamidauar@gmail.com

2) Universidade Federal do Ceará – UFC, Dept. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, (85) 997811045, joaovictorbarros1@gmail.com

3) Afiliação: Professor Associado, Dept. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, 3366-9776, assis@ufc.br

4) Afiliação: Professor Associado, Dept. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, 3366-9776, iran@deha.ufc.br

INTRODUÇÃO

No contexto hídrico do semiárido brasileiro, onde ocorrem secas periódicas, é fundamental o entendimento da hidrodinâmica dos reservatórios, tendo em vista que esses são a base do abastecimento de água da população (Pontes Filho *et al.*, 2020). Junto a isso, também é necessária a compreensão das dinâmicas que compõe a qualidade da água nos reservatórios, a qual possui uma natureza complexa dada a influência da biota aquática em seus processos (Lemos, 2015; Souza Filho, 2013).

A partir disso, tem-se a estratificação térmica, condição da coluna d'água que está fortemente relacionada à qualidade da água do reservatório. A estratificação térmica é influenciada pelas condições meteorológicas em que o corpo hídrico está inserido e pela vazão afluyente, as quais estão sujeitas a variações interanuais, sazonais e, no caso de regiões semiáridas e tropicais, nictemerais (Noori *et al.* 2018; Souza Filho *et al.*, 2006; Ziaie *et al.*, 2019).

Para se estudar o fenômeno citado, tem-se o adimensional de Richardson. Esse avalia a razão entre os gradientes de densidade e velocidade das camadas da superfície e do fundo do reservatório. Estudos afirmam que o valor crítico do número de Richardson é 0,25, acima do qual o reservatório possui uma estratificação estável e abaixo do qual o reservatório é considerado dominado pela mistura (Chapra, 2008; Kirilin e Shatwell, 2016; Souza Filho *et al.*, 2006).

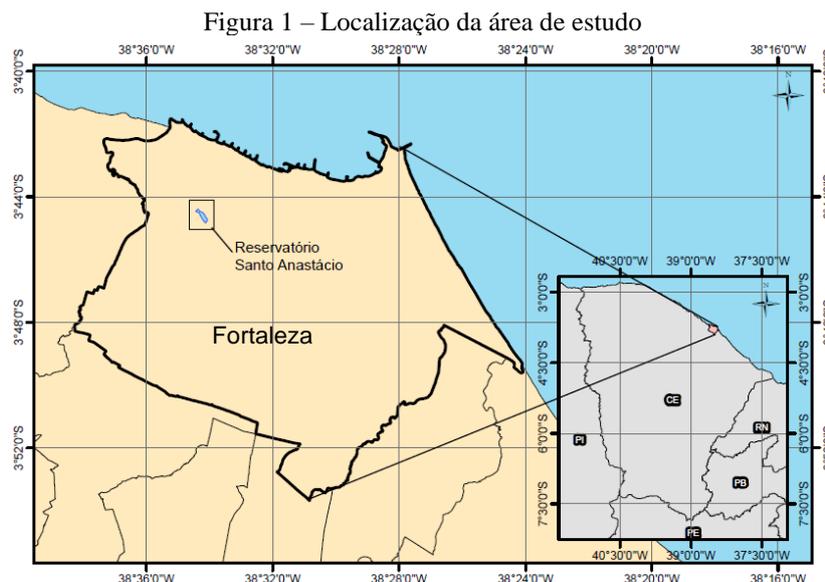
Posto isso, diversas ferramentas podem ser utilizadas para aprofundar análises de corpos hídricos, dentre as quais podem ser citados os modelos uni, bi e tridimensionais. Os modelos unidimensionais em geral são utilizados quando se deseja avaliar longos períodos, e são analisadas apenas as variações na dimensão vertical em um único ponto do reservatório. Já os bidimensionais possuem um maior tempo de simulação associado, entretanto permitem a avaliação de um plano do reservatório. Finalmente, os modelos tridimensionais englobam todas as dimensões do corpo hídrico e permitem estudos mais detalhados, porém exigem um maior esforço computacional (Polli e Bleninger, 2019).

Nessa circunstância, o modelo hidrodinâmico e de qualidade de água CE-QUAL-W2 é uma excelente alternativa para análise de corpos hídricos lênticos, visto que é um programa de livre acesso e amplamente utilizado para a simulação de reservatórios (Lemos, 2015; Rocha *et al.*, 2020; Ziaie *et al.*, 2019). Esse é um software adequado para reservatórios sem grandes variações laterais, tendo em vista sua bidimensionalidade (Cole e Wells, 2017).

Dessa forma, o objetivo do presente estudo é avaliar as variações interanuais, sazonais e nictemerais da estratificação térmica em um reservatório urbano localizado em Fortaleza, Ceará, por meio do número de Richardson. Para isso, aplicou-se o modelo bidimensional CE-QUAL-W2.

MATERIAIS E MÉTODOS

Como área de estudo deste trabalho, tem-se o reservatório Santo Anastácio (ASA), o qual possui um volume aproximadamente 0,3 hm³ e profundidade máxima de 4 metros próximo à estrutura da barragem. O ASA é um reservatório urbano que mantém o nível aproximadamente constante ao longo do ano, tendo em vista que possui apenas uma entrada advinda de um canal de drenagem urbana onde ocorre o despejo de efluentes pela população local. A Figura 1 mostra a localização do reservatório em estudo.



Inicialmente, o ASA foi dividido horizontalmente em segmentos com espaçamento horizontal de 29 metros, com um total de 32 divisões. Verticalmente, foram estabelecidas camadas a cada 0,20 metro, com a profundidade variando com a batimetria do reservatório. Em seguida, verificou-se o volume gerado pelo modelo, o qual deve ser aproximadamente igual àquele obtido pela sua batimetria (ver Lima, 2011).

Posto isso, foram inseridos os dados de meteorologia, estes fornecidos pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC), a partir da Estação Meteorológica do Campus do Pici, para os anos de 2009 e 2013, respectivamente anos úmido, com precipitação acima da média, e seco, com precipitação abaixo da média. Os parâmetros utilizados foram a temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, calculada como descrito por Collischonn e Dornelles (2013); direção e velocidade do vento e nebulosidade, todos eles dados diários medidos nos horários de 9h, 15h e 21h.

A seguir foram inseridos os dados de vazão de entrada e saída (Araújo, 2016), além da temperatura inicial do modelo, esta adotada como a média da temperatura do ar para a região. Com relação aos parâmetros de qualidade de água, esses foram zerados, como indicado no Manual do Usuário do CE-QUAL-W2.

No arquivo controle, foram inseridas a latitude, longitude, elevação do fundo do reservatório e o ano da simulação, utilizando um intervalo de simulação entre janeiro e dezembro dos anos em estudo. Com relação aos coeficientes da equação do vento e à temperatura do sedimento, foram utilizados valores calibrados e validados por Mesquita *et al.* (2020).

Com todos os dados corretamente inseridos no programa, foi realizada a modelagem hidrodinâmica para o período desejado, para então serem extraídas as séries temporais. As análises foram realizadas para um segmento distante cerca de 200 metros da barragem. Foi utilizado o software RStudio para o processamento dos dados.

A Equação 1 mostra o cálculo utilizado para o número de Richardson (Chapra, 2008), em que os gradientes de densidade e velocidade foram aproximados pela diferença entre as médias das camadas da superfície e do fundo divididas pela profundidade da camada avaliada, ou seja, a solução analítica foi aproximada pela solução numérica.

$$R_i = \frac{\left(\frac{g}{\rho}\right)\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \approx \frac{\left(\frac{g}{\rho}\right)\left(\frac{\rho_{sup} - \rho_{fundo}}{\Delta z}\right)}{\left(\frac{u_{sup} - u_{fundo}}{\Delta z}\right)^2} \quad (1)$$

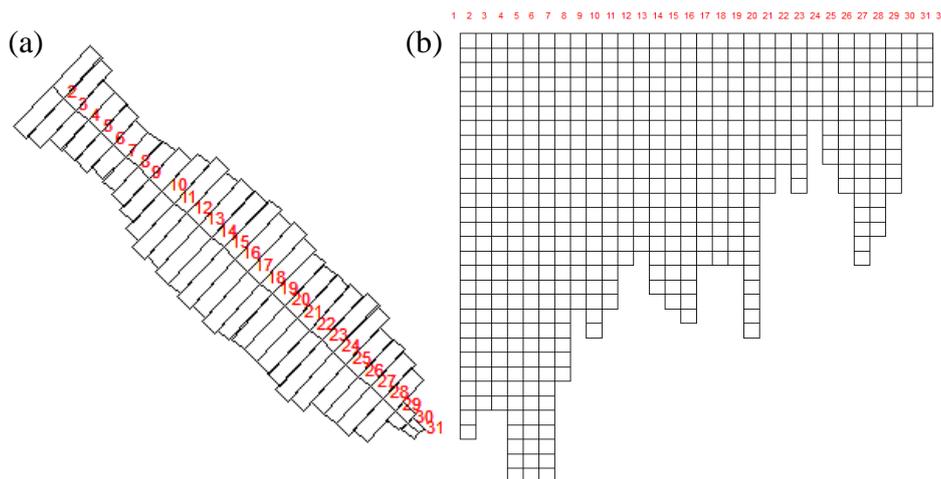
onde z é a profundidade (m), g a aceleração da gravidade (m^2/s), ρ a densidade da água (kg/m^3) e u a velocidade horizontal (m/s).

Os cálculos para o número de Richardson foram realizados para os meses de março, junho, setembro e dezembro, de forma a ser avaliada a evolução sazonal do parâmetro. Para ser realizada a avaliação nictemeral, foram analisados dados para os horários de 3h, 9h, 15h e 21h.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

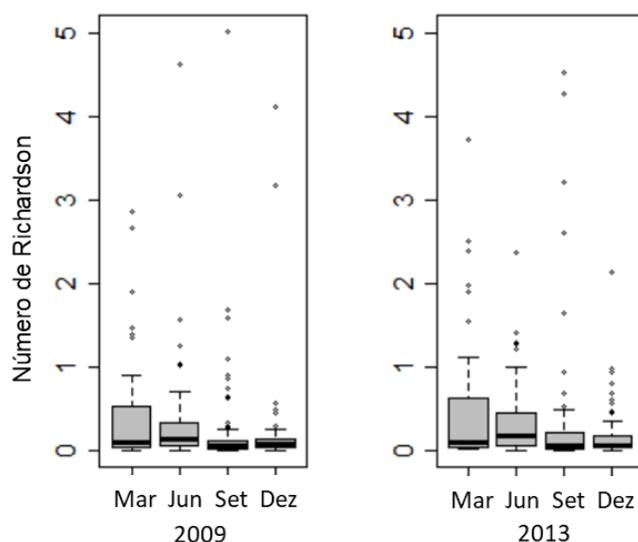
A Figura 2 (a) e (b) mostra a segmentação em planta e em corte longitudinal conforme inserido no modelo. A partir disso, foi estimado um volume para o ASA, no CE-QUAL-W2, de $0,36 \text{ hm}^3$. Segundo Lima (2011), o volume esperado é de $0,31 \text{ hm}^3$. Com isso, o valor modelado pode ser considerado satisfatório.

Figura 2 (a) Segmentação em planta e (b) Corte longitudinal do modelo do ASA gerado pelo CE-QUAL-W2



A Figura 3 apresenta o gráfico do número de Richardson (R_i) para os anos úmido e seco dos meses em estudo. É possível observar que o comportamento entre os anos avaliados é semelhante, entretanto observa-se que, no ano seco (2013) foram obtidas estratificações mais estáveis, i.e. maiores valores de R_i , quando comparado ao ano úmido. No contexto de zonas tropicais, a expectativa seria que as variabilidades interanuais não fossem relevantes como aquelas a nível sazonal e nictemeral (ver Lemos, 2015; Souza Filho *et al.*, 2006).

Figura 3 – Número de Richardson para os anos úmido (2009) e seco (2013) e meses avaliados



Já quando se avalia a variabilidade sazonal na Figura 3, tem-se que o lago tende a permanecer majoritariamente misturado nos meses finais do ano, além de uma maior dispersão dos dados em relação à média no início do ano, o que pode indicar processos de desestratificações recorrentes no período mais chuvoso. Essa circunstância indica a relevância da vazão na quebra da estabilidade térmica da coluna d'água, visto que as velocidades do vento médias do local são cerca de 2 m/s no início do ano e 4,5 m/s ao final, ou seja, nos primeiros meses do ano a hidrodinâmica é fortemente influenciada pelas vazões de entrada, enquanto ao final do ano a força dominante é o vento, dado que a região é caracterizada pela concentração das precipitações nos primeiros meses do ano.

Souza Filho et al. (2006) corroboram esse resultado, visto que, ao estudarem um reservatório localizado em região semiárida, os padrões de variação do vento, no estudo citado avaliados em conjunto com a radiação e temperatura, influenciaram fortemente o padrão de mistura do corpo hídrico. Nesse contexto, Polli e Bleninger (2019), ao estudarem um reservatório de região temperada, também observaram altas velocidades de vento associadas a menores diferenças de temperatura na coluna d'água, além do aumento dos gradientes de temperatura associados a baixas velocidades de vento, resultando em uma maior estratificação. No caso do ASA essa realidade não é bem definida, de forma que não foi possível definir apenas um fator como determinante em seu comportamento.

Junto a isso é apresentada a Tabela 1, em que é possível verificar o percentual do período avaliado em que o Ri ficou acima de 0,25, considerando o critério como definido por Chapra (2008), ou seja, em que se observou estabilidade na estratificação. Esses dados confirmam quantitativamente o verificado na Figura 3, i.e. o comportamento interanual é semelhante, sendo mais relevante a avaliação sazonal.

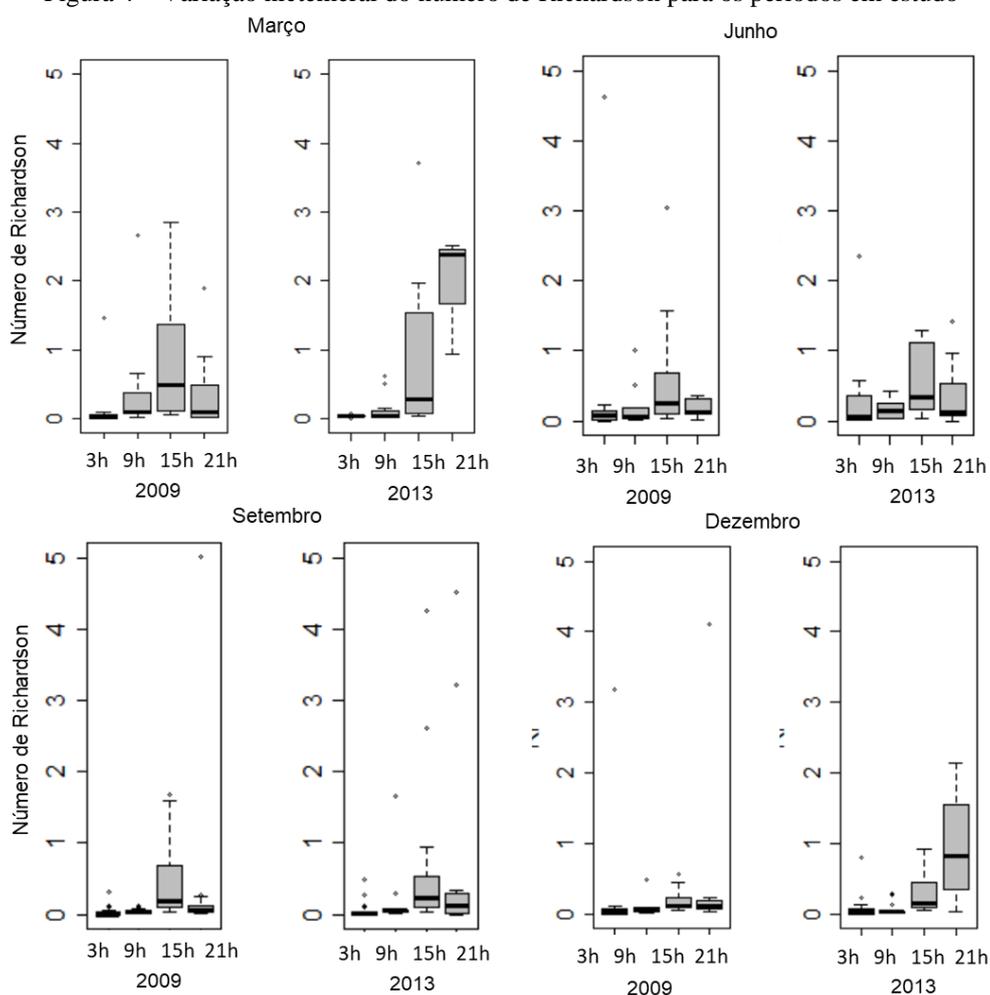
Tabela 1 – Taxa em que Ri permaneceu maior que 0,25 nos períodos em estudo

Mês	Percentual de Ri maior que 0,25	
	2009	2013
Março	70%	77%
Junho	68%	72%
Setembro	35%	46%
Dezembro	56%	56%

Nessa circunstância, é necessário avaliar as tendências nictemerais, tendo em vista que, em regiões tropicais, existe um processo de estratificação e desestratificação diária, em que a estratificação se desenvolve durante o dia e é revertida durante a noite, de acordo com discussões presentes na literatura (ver Souza Filho *et al.*, 2006).

A Figura 4 apresenta a variação nictemeral do Ri para os meses e anos em estudo. Nessa figura pode ser observado claramente o desenvolvimento da estratificação ao longo do dia, cenário condizente com aquele apresentado por Souza Filho *et al.* (2006), em que é discutida a estabilização da estratificação térmica ao longo do dia, além de ser ressaltado que, em águas quentes (temperaturas próximas a 30°C), uma variação de 1 grau de temperatura provoca uma variação de densidade mais de cinco vezes maior que a mesma variação à temperatura de 5°C, cenário que justifica estratificações mesmo com baixas diferenças de temperatura.

Figura 4 – Variação nictemeral do número de Richardson para os períodos em estudo



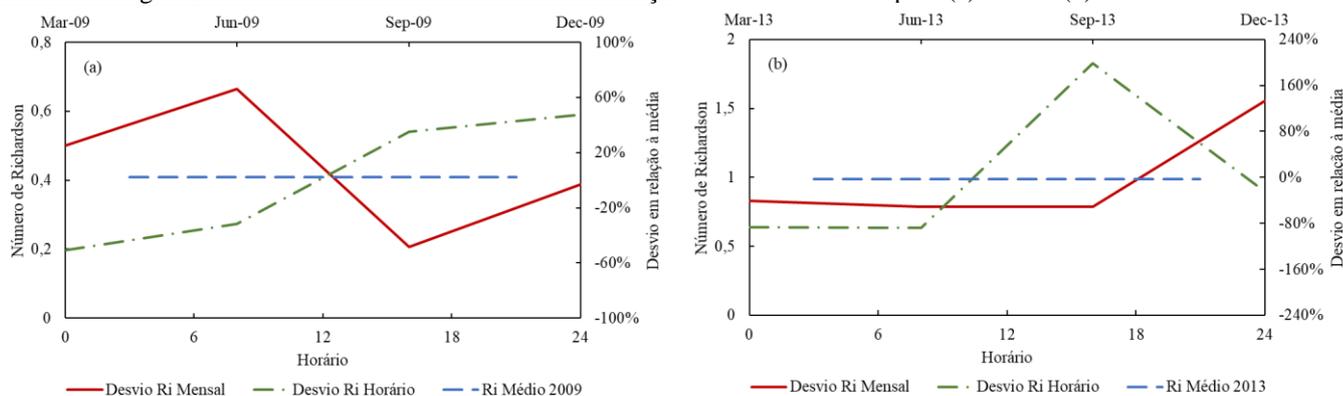
Nesse contexto, a Figura 5 mostra, para os anos de 2009 e 2013, a taxa de variação do número de Richardson ao longo do dia e ao longo dos meses em relação ao valor médio anual. A partir disso, verifica-se a mesma ordem de grandeza de variação entre os horizontes horário e mensal para 2009, o que indica a ocorrência de processos de estratificação e desestratificação influenciada pelas condições meteorológicas, as quais notadamente variam ao longo do dia, como a radiação e a velocidade dos ventos, e também pela estação chuvosa. Em 2013 tem-se um comportamento semelhante, mas notadamente a sua média anual é maior que a observada para 2009. Também em 2013 a taxa de desvio horário em relação à média ultrapassa a grandeza de variação do desvio mensal, resultado mais uma vez de acordo com o esperado, visto que, em regiões mais quentes a variação

nictemeral é de grande importância para o comportamento hidrodinâmico dos lagos (Souza Filho *et al.*, 2006).

Os resultados obtidos elucidam a importância das variações sazonais e nictemerai na qualidade da água do reservatório, essa influenciada pela estrutura térmica do corpo hídrico. Tais conclusões podem ser utilizadas como ferramentas de auxílio à gestão de recursos hídricos da região, visto que apontam os períodos em que são observadas melhores condições da qualidade da água. Esse cenário pode vir a otimizar custos com o tratamento da água, por exemplo, caso o estudo apresentado seja aplicado a um reservatório utilizado para abastecimento humano, principalmente em reservatórios da região semiárida.

Dessa forma, como sugestão para trabalhos futuros, é indicada a aplicação do estudo para um reservatório estratégico para o abastecimento hídrico da população, com o aprofundamento dos estudos aqui apresentados e a avaliação para mais anos, além da inclusão da caracterização meteorológica da área de estudo, de forma a avaliar os resultados comparativamente a essa circunstância.

Figura 5 – Desvio do Ri horário e mensal em relação ao Ri médio anual para (a) 2009 e (b) 2013



CONCLUSÕES

Foram analisados os resultados hidrodinâmicos obtidos a partir da simulação bidimensional do reservatório Santo Anastácio utilizando o modelo CE-QUAL-W2. As conclusões corroboraram com estudos presentes na literatura, apontando uma maior influência da variabilidade sazonal e nictemeral para corpos hídricos tropicais no que tange à estratificação térmica, essa avaliada por meio do adimensional de Richardson. Observou-se também a importância da vazão na quebra da estabilidade térmica do reservatório, dados os resultados da variabilidade sazonal.

Junto a isso, apresentou-se que as taxas de variação do Ri em relação à média para as condições sazonal e nictemeral obtiveram a mesma ordem de grandeza. Isso mostra a importância desse cenário na gestão dos reservatórios. Por fim, conclui-se que o presente estudo se apresenta como uma possível ferramenta auxiliar na gestão de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

CHAPRA, S. C. (2008) *Surface Water-Quality Modeling*. Waveland Press, 844 p.

COLE, T.M.; WELLS, S. A. (2017) **CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydro-dynamic and water quality model**, version 4.1, Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2013). *Hidrologia para Engenharias e Ciências Ambientais*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos Porto Alegre, 350 p.

DE SOUZA FILHO, F. A., MARTINS, E. S. P. R., PORTO, MÔNICA. (2006) “*O Processo de Mistura em Reservatórios do Semi-Árido e sua Implicação na Qualidade da Água*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 4, 109-119.

DE SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B.; DE AQUINO, S. H. S. *Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.

KIRILLIN, G.; SHATWELL, T. (2016). “*Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes*”. Earth-Science Reviews, 161, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.008>

LEMOS, Wictor Edney Dajtenko. Previsão climática sazonal do regime térmico e hidrodinâmico de reservatório. 2015. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 2015.

Lima, F. P. (2011) Avaliação do Processo de Assoreamento do Açude Santo Anastácio – Fortaleza/CE e sua Influência no Ecossistema Local. Monografia (graduação), Universidade Federal do Ceará, curso de Engenharia de Pesca.

MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E.; RAABE, A., DE ARAÚJO, J. C. (2020) “*The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake*”. Journal of Hydrology, v. 590, 125456. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125456>

Noori, R.; Berndtsson, R.; Franklin Adamowski, J.; Rabiee Abyaneh, M. (2018). “*Temporal and depth variation of water quality due to thermal stratification in Karkheh Reservoir, Iran*”. Journal of Hydrology: Regional Studies, 19(January), 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.10.003>

POLLI, B. A.; BLENINGER, T. (2019) “*Comparison of 1D and 3D reservoir heat transport models and temperature effects on mass transport*”. Brazilian Journal of Water Resources, v. 24, e30. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920190023>

PONTES FILHO, J. D.; DE SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; Studart, T. M. C. (2020). “*Copula-Based Multivariate Frequency Analysis of the 2012-2018 Drought in Northeast Brazil*”. Water, 12, 834.

ROCHA, S. M. G; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. (2020) “*Modelagem hidrodinâmica e avaliação do decaimento do fósforo em um lago urbano hipereutrófico*”. Revista AIDIS, v. 13, n. 2, 530-545.

ZIAIE, R.; MOHAMMADNEZHAD, B.; TAHERIYOUN, M.; KARIMI, A.; AMIRI, S. (2019) “*Evaluation of Thermal Stratification and Eutrophication in Zayandeh Roud Dam Reservoir Using Two-Dimensional CE-QUAL-W2 Model*”. J. Environ. Eng., v. 145, n. 6, 05019001.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida à primeira autora.