DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DA EUTROFIZAÇÃO NO RESERVATÓRIO DE FURNAS NO ENTORNO DE ALFENAS/MG

Raiane Cristina Pereira [1], Marcelo de Oliveira Latuf[2], Pompilio de Lourdes Canavez[3], Paulo Augusto Zaitune Pamplin[4], Giovana de Fátima Lima Martins[5], Paulo Roberto Santos da Silva[6], Daniel Carneiro Beraldo[7], Deivid Arimatea Saldanha de Melo[8]

[1]Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Av. Jovino Fernandes Sales, 2.600, Alfenas/MG, raiane.pereira@sou.unifal-mg.edu.br; [2]Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Av. Jovino Fernandes Sales, 2.600, Alfenas/MG, marcelo.latuf@unifal-mg.edu.br; [3]Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Av. Jovino Fernandes Sales, 2.600, Alfenas/MG, pompiliocanavez@gmail.com; [4]Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciência e Tecnologia, Rod. José Aurélio Vilela, 11.999, Poços de Caldas/MG, paulo.pamplin@unifal-mg.edu.br; [5]Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Química, Rua Gabriel Monteiro da Silva, 700, Alfenas/MG, giovana.martins@unifal-mg.edu.br; [6]Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Química, Rua Gabriel Monteiro da Silva, 700, Alfenas/MG, paulo.santos@sou.unifal-mg.edu.br; [7]VG Pescados Piscicultura, Estrada do Harmonia, Alfenas/MG, daniell_beraldo@hotmail.com; [8]Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Av. Jovino Fernandes Sales, 2.600, Alfenas/MG, deivid.saldanha@unifal-mg.edu.br.

RESUMO

Resultado do enriquecimento nutricional do meio aquático, a eutrofização é uma problemática pertinente aos planos de gestão de recursos hídricos e bacias hidrográficas. Devido aos elevados custos de monitoramento dos parâmetros de qualidade da água que participam do processo de tomada de decisão, o sensoriamento remoto, combinados com dados *in situ*, vem sendo cada vez mais utilizado. Dessa forma, o presente estudo objetivou avaliar de maneira exploratória, a eutrofização em um dos braços do reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas no entorno de Alfenas/MG. Utilizou-se o registro fotográfico da superfície da água, aliada à obtenção do *Normalized Difference Chlorophyll Index* por meio do imageamento do Landsat 8, processado em ambiente em nuvem. Como resultado, o índice apresentou indicativos da variação da clorofila-a no reservatório, apontando sua aplicabilidade a estudos quali-quantitativos da água na área de interesse. Espera-se contribuir com este estudo, no diagnóstico rápido de campo, auxiliando aos diversos usuários.

Palavras-chave — NDCI, Sensoriamento remoto, Hidrologia, Qualidade da água, Ambiente lêntico.

ABSTRACT

As a result of the nutritional enrichment of the aquatic environment, eutrophication is a relevant issue in water resources and watershed management plans. Due to the high costs of monitoring water quality parameters that participate in the decision-making process, remote sensing, combined with in situ data, has been increasingly used. Thus, the present study aimed to evaluate, in an exploratory way, the eutrophication in one of the arms of the reservoir of the Furnas Hydroelectric Power Plant in the surroundings of Alfenas/MG. The photographic record of the water surface was used, together with obtaining the Normalized Difference Chlorophyll Index through Landsat 8 imaging, processed in a cloud environment. As a result, the index showed indications the chlorophyll-a variation in the reservoir, indicating its applicability to qualitative and quantitative studies of water in the area of interest. It is expected to contribute to this study, in the rapid field diagnosis, helping many users.

Keywords — *NDCI, Remote sensing, Hydrology, Water quality, Lentic environment.*

1. INTRODUÇÃO

Associada à problemática global de perda da qualidade da água, a eutrofização, fenômeno recorrente da combinação entre compostos nitrogenados e fosfatados, bem como às caracteristicas físico-biológicas de corpos hídricos, tornou-se pauta em planos de gestão ambiental, na tentativa de manter a garantia de acesso aos usos múltiplos das águas continentais e do gerenciamento de bacias hidrográficas [1][2][3].

As principais fontes que corraboram para a ocorrência do fenômeno de eutrofização estão ligadas às ações antrópicas diversas, que permeam desde desespejos irregulares de esgoto *in natura*, à rejeitos industriais e compostos oriundos de atividades agrícolas [4]. Estes, ao entrarem em um sistema hidrodinâmico no qual o tempo de residência da água é elevado, podem propiciar a elevação da matéria orgânica. Toda a dinâmica, portanto, tornam reservatórios e demais sistemas lênticos, ambientes propícios à ocorrência do fenômeno [5].

Como agravantes, são observados em ambientes com elevado grau de trofia a explosão de cianobactérias e macrófitas, alterações na cadeira alimentar, reprodutiva e migratória da biota, somados ao comprometimento de uso do recurso para a dessedentação animal e uso humano, aumento

dos custos de tratamento de esgoto e em saúde pública, recorrentes da qualidade da água [6].

A fim de diagnosticar espaço-temporalmente a ocorrência da eutrofização, o monitoramento do corpo hídrico torna-se fundamental. Um dos principais agravantes do processo, são os elevados custos envolvidos, na constante necessidade de obtenção de dados *in situ*. Em alternativa, o sensoriamento remoto vinculado à utilização de índices espectrais e processamento de dados em nuvem, vêm sendo utilizados na tentativa de automatizar o monitoramento e na redução de custos envolvidos. O procedimento, torna-se possível uma vez que, associado a dados coletados, equações de ajustes são geradas como uma representação do espaço amostral [7].

Dentre os índices espectrais utilizados na temática, o NDCI (*Normalized Difference Chlorophyll Index*), vem apresentando importante colaboração na detecção do componente clorofílico presente na coluna d'água, sendo este, um pigmento fotossintetizante indicador da biomassa no sistema e que está diretamente associado ao estado trófico do ambiente [8][9].

Dessa forma, o presente estudo objetiva avaliar de forma qualitativa e, preliminarmente, a relação entre o aspecto visual da superfície da água e o NDCI, tendo como área de estudo o reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas (UHE Furnas), no entorno da cidade de Alfenas/MG. Espera-se que, dentro da presente análise exploratória, apontar a potencialidade de produtos orbitais associados a fotografias obtidas em visitas técnicas de campo, na tentativa de vincular dados relacionados à concentração de clorofila-a e índices de estado trófico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O reservatório da UHE Furnas, localizado ao sudoeste do Estado de Minas Gerais, possui 1.440km² de área inundada em sua cota máxima, sendo um importante gerador de hidroeletricidade para o Sistema Interligado Nacional [10]. A área de estudo abrange as proximidades do regionalmente chamado "braço do Cabo Verde" (Fig.1), localizado a oeste da cidade de Alfenas/MG, onde foram documentadas irregularidades nos parâmetros de qualidade da água provindos de atividades agrícolas e aquícolas, bem como despejo de esgoto [11].

A metodologia utilizada buscou associar dados oriundos de produtos orbitais a partir da aplicação do índice espectral NDCI [8], para a estimativa da clorofila-a, bem como o uso de fotografias obtidas *in situ*. Os produtos orbitais utilizados fazem parte do conjunto de dados da *United States Geological Survey* (USGS) do satélite Landsat 8 (*Collection 2 e Level 2*), disponíveis no catálogo de imagens da plataforma em nuvem *Google Earth Engine* (GEE) [12] que foi o ambiente de processamento orbital selecionado.

O procedimento para a estimativa do NDCI iniciou-se pela extração do espelho d'água do reservatório, por meio da metodologia proposta por [13], a partir do *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), adotando-se como água, valores iguais ou superiores a 0. Em seguida, dividiu-se o raster do espelho d'água por ele mesmo, a fim de criarmos uma máscara para a representação da água de valor igual a 1.

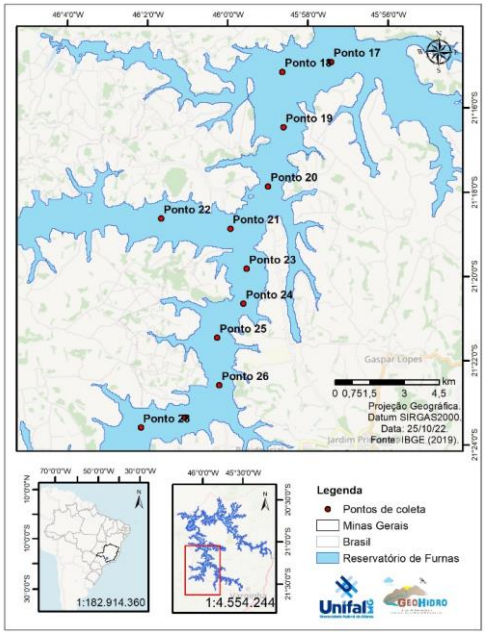


Figura 1. Localização do "braço do Cabo Verde" no reservatório de Furnas.

Logo após, obteve-se o NDCI por meio da proposta de [17], tendo o resultado sido multiplicado pela máscara de água e, neste sentido, extraiu-se o NDCI para apenas o corpo hídrico do reservatório.

Ao final de todos os processamentos foram exportados os rasters no formato GeoTIFF, para manipulação em SIG *desktop*. Os procedimentos metodológicos realizados em ambiente GEE podem ser acessados a partir do link https://code.earthengine.google.com/beaf62fe5b38b327ec02ec49ab05db9b.

A estimativa da clorofila-a foi baseada na metodologia desenvolvida por [14], porém com adaptações, principalmente quanto ao produto orbital utilizado. Assim como em diversos outros estudos que analisam a concentração de clorofila-a na coluna d'água via sensoriamento remoto, a utilização de imagens Sentinel-2A é majoritariamente usada devido aos comprimentos de onda de suas bandas nas regiões do vermelho e infravermelho próximo [15][16]. Entretanto, neste trabalho optou-se pelo NDCI a partir do Landsat 8 [17].

O método adotado na estimativa de clorofila-a é dado pela Equação 1 [14], executado no módulo *Raster Calculator* do ArcMAP(TM) 10.6.1:

$$\text{Chl-a} = 23{,}44 * (\text{NDCI}_{sat} + 1)^{7{,}95} \quad (1)$$

Equação 1. Modelo estatístico adotado na estimativa de clorofila-a.

Para as análises do estado trófico do corpo hídrico foi adotada a metodologia utilizada por [18], considerando neste caso, apenas os dados de clorofila-a (Tab.1).

Estado trófico	Clorofila-a (µg/L)
Ultra-oligotrófico	Chl-a < 1,17
Oligotrófico	1,17 < Chl-a < 3,24
Mesotrófico	3,24 < Chl-a < 11,03
Eutrófico	11,03 < Chl-a < 30,55
Super-eutrófico	30,55 < Chl-a < 69,05
Hiper-eutrófico	69,05 < Chl-a

Tabela 1. Modelo adotado para a estimativa de estado trófico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O *script* gerado no ambiente de processamento em nuvem GEE possibilitou a geração do espelho d'água na passagem do satélite Landsat 8 no dia 10/09/2022 (órbita/ponto: 219/075), tal como a aplicação do algoritmo para a estimativa do NDCI (Fig.2) e, posteiormente, na estimativa da clorofila-a [19].

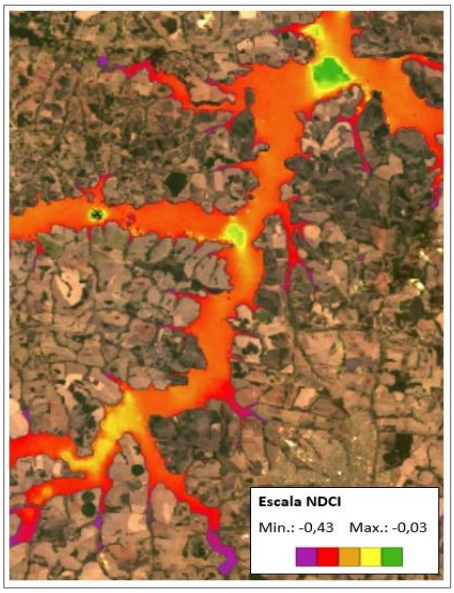


Figura 2. NDCI do "braço Cabo Verde".
Fonte: Autores, 2022.

O produto gerado apresenta variações expressivas do estado trófico em regiões nas quais a massa d'água é maior, fator este, que possibilita a diluição da concentração de material orgânico na coluna d'água [5].

Como resultado da análise quali-quantitiva, foram selecionados dois pontos de coleta (pontos 17 e 28, vide Fig.1) para a extração dos valores de NDCI e estimativa do estado de trofia, classificado por [14] e [18]. Corroborando com a análise, foram inseridas as fotografias do aspecto superficial da coluna d'água (Tab.2).

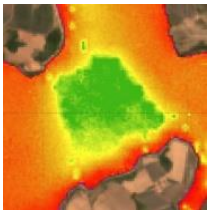
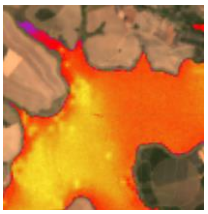
	Ponto 17	Ponto 28
NDCI		
	-0,44	-0,21
Lobo et al. (2021)	Ultra-oligotrófico	Mesotrófico
Fotos		

Tabela 2. Resultados quali-quantitativos.

Evidenciou-se que em regiões de menor trofia (representadas por tons de verde e amarelo), encontram-se em regiões do reservatório com maiores volumes de água ou em confluência de fluxo de diferentes "braços". A exemplo, o ponto 28, que apresentou maiores concentrações do material fotossíntético, faz parte de uma região estreita do reservatório, com volume de água bastante variável durante o ano e, de acordo com [20], possui uma diversificada atividade agrícola presente na região (Fig.3).

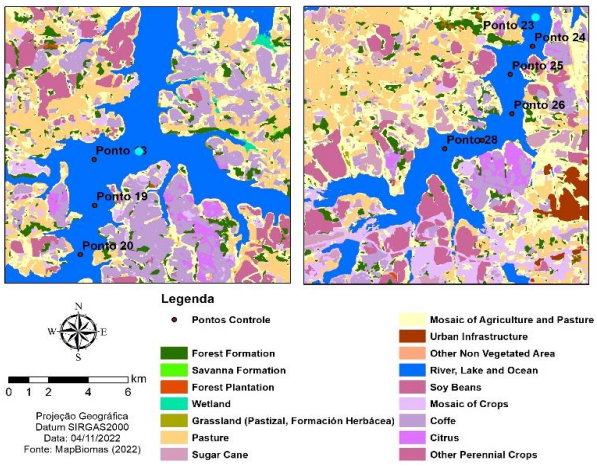


Figura 3 Uso e cobertura da terra no entorno do "braço do Cabo Verde".

Uma importante associação entre os usos da terra no entorno e o perfil do reservatório (Fig.3), podem ser estabelecidos. Observa-se uma intensa atividade agropecuária na circunvizinhança dos pontos de amostragem, além de áreas sem recobrimento florestal. Fatores estes, que

contribuem para o escoamento de pesticidas, fertilizantes (fontes de fósforo e nitrogênio) e demais "defensivos" advindos de áreas no entorno.

4. CONCLUSÕES

Para fins de resultados preliminares, o processamento dos produtos orbitais apresentou resultados satisfatórios, seja na manipulação em GEE, quanto nas extrações de corpos hídricos e NDCI. Os dados apresentados apontam a relação entre o aspecto visual da água e os valores de NDCI, que será investigada mais profundamente, além da inclusão de imageamento pelo Sentinel-2. Almeja-se que o estudo fomente um banco de dados sobre a qualidade do corpo hídrico no entorno de Alfenas/MG, tal como sua variabilidade espaço-temporal, e crie a possibilidade de elaboração de materiais didáticos referentes aos graus de trofia para a sociedade, subsidiando o monitoramento e acesso aos múltiplos usos da água na região.

5. REFERÊNCIAS

[1] M. C. B. de Figueirêdo, A. S. Teixeira, L. F. P. Araújo, M. F. Rosa, W. D. Paulino, S. Mota and J. C. Araújo. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização, Engenharia sanitária e ambiental, v.12, n°4, pp.399-409, 2007.

[2] J. G. Tundisi. Limnologia. Oficina de Textos, São Paulo, 2008.

[3] Brasil. Política Nacional de Recursos Hídricos. Lei n°. 9433. Brasília, 1997.

[4] M. L. F. Neto; A. P. Ferreira, - Perspectivas da Sustentabilidade Ambiental Diante da Contaminação Química da Água: Desafios Normativos - Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente - v.2, n.4, Seção 1, ago 2007.

[5] M. C. Wiegand; J. I. G. Piedra,; J. C. Araújo Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido. Brasil: Revista Engenharia Ambiental e sanitária, v.21 n.2, pp. 415-424, abr/jun 2016.

[6] J. G. Tundisi; T. M. Tundisi; D. S. ABE edt al. Limnologia de águas interiores: impactos, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos. In: A. Rebouças; B. Braga; J. G. Tundisi (Org.). Águas doces no Brasil. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2006.

[7] C. C. F. Barbosa; E. M. L. M. Novo; Martins, V.S. Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações. 1a Edição ed. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,São José dos Campos, 161p, 2019.

[8] S. Mishra; D. R. Mishra. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing of Environment, v.117, pp. 394-406, 2012.

[9] T. Rodrigues, E. Alcântara, F. Watanabe, L. Rotta, N. Imai, M. Curtarelli, C. Barbosa. Comparação entre métodos empíricos para estimativa da concentração de clorofila-a em reservatórios em cascata (rio Tietê, São Paulo). Revista Brasileira de Cartografia, n°68/1: pp. 181-192, 2016.

[10] Eletrobrás Furnas. Usina de Furnas, s.d. Dados técnicos sobre o Sistema Furnas. Disponível em: https://www.furnas.com.br/subsecao/120/usina-de-furnas---1216-mw?culture=pt
Acesso em: 13/10/2022.

[11] Instituto Mineiro de Gestão das águas. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno de Furnas, Relatório Parcial 1: Diagnóstico da Bacia Hidrográfica. Belo Horizonte, 2013. 305 p.

[12] Google Earth Engine. Catálogo de Imagens. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR. Acesso em: 24/10/2022.

[13] Hanqiu Xu (2006) Modificação do índice de água de diferença normalizada (NDWI) para aprimorar recursos de águas abertas em imagens de sensoriamento remoto, International Journal of Remote Sensing, 27:14, 3025-3033, DOI: 10.1080/01431160600589179

[14] F. L. Lobo, G. W. Nagel, D. A. Maciel, L. A. S. de Carvalho, V. S. Martins, C. C. F. Barbosa, E. M. L. M. Novo. AlgaeMAP: Algae Bloom Monitoring Application for Inland Waters I Latin America. Remote Sensing,*13*(15), pp. 2874, 2021.

[15] Caballero, I., Fernández, R., Escalante, OM *et al*. Novos recursos dos satélites Sentinel-2A/B combinados com dados *in situ* para monitorar pequenas florações de algas nocivas em águas costeiras complexas. *Sci Rep* **10** , 8743 (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-65600-1

[16] Buma, Willibroad Gabila e Sang-Il Lee. 2020. "Avaliação das Imagens Sentinel-2 e Landsat 8 para Estimativa das Concentrações de Clorofila-a no Lago Chade, África" *Sensoriamento Remoto* 12, no. 15: 2437. https://doi.org/10.3390/rs12152437

[17] F. Watanabe, E. Alcântara, T. Rodrigues, L. Rotta, N. Bernardo e N. Imai. Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita reservoir, Brazil). Anais da Academia Brasileira de Ciências, pp.90, 2018.

[18] Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Índice de Estado Trófico, s.d.. Disponível em: https://www.cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/04.pdf. Acesso em: 27/10/2022.

[19] L. V. Barreto, F. M. Barros, P. Bonomo, F. A. Rocha, J. S. Amorim. Eutrofização em rios brasileiros. Enciclopédia Biosfera, Goiânia, v.9, N.16; p. 2166, 2013.

[20] MapBiomas. Mapeamento da cobertura e uso da terra. Coleção 7. Disponível em: https://mapbiomas.org/. Acesso em: 31/10/2022.