

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA *FUZZY* PARA A ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA FLORAÇÃO DE ALGAS NO RESERVATÓRIO DE IBITINGA/SP

*Rejane de Souza Paulino*¹ ; *Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo*¹ ; *Vitor Souza Martins*² ; *Carolline Tressmann Cairo*¹ ; *Daniel Andrade Maciel*¹ ; *Cláudio Clemente Faria Barbosa*¹

RESUMO

Este trabalho faz uma análise exploratória da ocorrência de floração de algas no reservatório de Ibitinga/SP por meio do uso da classificação contínua *fuzzy*. A função de pertinência linear *fuzzy* foi aplicada a uma série histórica de imagens do MSI/Sentinel-2 (entre dezembro/2018 e junho/2020) contendo os valores do índice espectral *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI), para identificar, no espaço e no tempo, os eventos de florações de algas (*bloom*) no reservatório em quatro períodos do ano. Os valores da pertinência *fuzzy* variaram entre os períodos de observação, com eventos de baixa e alta intensidade de floração de algas acontecendo no primeiro e no segundo semestre do ano, respectivamente. Finalmente, a função de pertinência *fuzzy* permitiu identificar a ocorrência de padrões de distribuição não aleatórios de florações em Ibitinga, sendo as áreas próximas à barragem as mais afetadas pelas altas pertinências.

Palavras-Chave – Pertinência *fuzzy*; Qualidade da água; Fitoplâncton.

INTRODUÇÃO

Os reservatórios de águas são sistemas construídos a partir do represamento de rios para garantir as demandas de abastecimento público, de contenção de cheias, de recreação, de irrigação, e de geração de energia, entre outras. A dinâmica desses sistemas é influenciada pelo regime de chuvas, pela regulação da vazão e por seu uso, além de serem sensíveis às atividades desenvolvidas na bacia de drenagem, as quais podem impactar significativamente seus processos físicos, químicos e biológicos. A sobrecarga de nutrientes e matéria orgânica resultante dos despejos de efluentes urbanos e do escoamento de resíduos provenientes da atividade agrícola, promovem modificações em sua biota, podendo alterar o nível de eutrofização da água ao ponto de trazer prejuízos aos seus usos prioritários, como o abastecimento humano (Tundisi *et al.*, 2004).

O monitoramento das águas interiores é um importante instrumento para a gestão e segurança hídrica. Entretanto, os sistemas de monitoramento das águas superficiais brasileiras baseados na amostragem *in situ* são limitados, no tempo e no espaço, para informar sobre o comportamento dinâmico da qualidade das águas, sendo inviável o monitoramento de grandes regiões e grande corpos de água devido ao custo e tempo para coletas periódicas (ANA, 2020; Ford e Vodacek, 2020). Mesmo nas regiões do país em que existe um grande adensamento populacional, como o estado de São Paulo (166,25 hab/km²) (IBGE, 2010), os pontos de monitoramento dos reservatórios de água não são suficientes para garantir uma representação detalhada da variabilidade espaço-temporal dos parâmetros de qualidade da água. Segundo CETESB (2020), no ano de 2019 foram amostrados no estado de São Paulo cerca de 477 pontos de monitoramento da qualidade da água, distribuídos entre as suas 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos, o que corresponde a uma densidade

1) Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LabISA), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos 12227-010, Brasil. rejane.dspaulino@gmail.com; evlyn.novo@inpe.br; tressmanncairo@gmail.com; damaciel_maciel@hotmail.com; claudio.barbosa@inpe.br

2) Center for Global Change and Earth Observations, Michigan State University, East Lansing, MI, USA. vitorstmartins@gmail.com

média de ~2 pontos de monitoramento a cada 1.000 km² da rede de drenagem, resultando em um alto nível de generalização das informações relacionadas à qualidade das águas.

Por outro lado, o sensoriamento remoto, tem contribuído para o mapeamento das águas interiores em diferentes escalas de tempo e espaço (Pickens *et al.*, 2020), mediante o registro do sinal resultante dos processos de absorção e espalhamento da radiação eletromagnética devido à presença de componentes opticamente ativos na coluna d'água (Kirk, 2011). Dentre esses componentes, a clorofila-a (chl-a) fornece um indicativo do estado trófico dos ambientes aquáticos (Novo *et al.*, 2013; Cairo *et al.*, 2020), já que é um bom *proxy* da biomassa fitoplanctônica, que são organismos responsáveis pela produção primária (Reynolds, 2006). Portanto, a concentração de chl-a é utilizada na calibração de modelos bio-ópticos para a detecção de *blooms* de algas, dentre os quais destacam-se os que se baseiam no índice espectral NDCI. O NDCI permite a observação da intensidade de ocorrência de chl-a em águas opticamente complexas (Mishra e Mishra, 2012), a partir da diferença entre a máxima absorção por chl-a na região do vermelho (~ 660 nm) e o espalhamento da radiação pelas células do fitoplâncton na região de transição entre o vermelho e infravermelho, a chamada borda vermelha (*red-edge*) (~705 nm).

Assim como a maioria dos recursos ambientais, a determinação dos componentes ópticos da água é um desafio, porque a heterogeneidade da composição da água resulta em um ambiente opticamente complexo e não existem limiares definidos que permitam a separação entre grupos de componentes em função de sua natureza indistinta. Essas ambiguidades provocadas pelos constituintes da água podem ser modeladas a partir dos conjuntos *fuzzy*, que correspondem a classes de limites indefinidos que possuem um comportamento contínuo entre si (Zadeh, 1965). Tais conjuntos são caracterizados por funções de pertinência, que modelam o grau de pertencimento de cada um dos elementos ao conjunto de interesse. Na água, as funções de pertinência têm sido utilizadas principalmente no mapeamento dos tipos ópticos de água (Moore *et al.*, 2009; Moore *et al.*, 2014) e na análise dos parâmetros dos índices de qualidade e do estado trófico dos ambientes aquáticos (Kulshreshtha e Shanmugam, 2018; Ellina *et al.*, 2017).

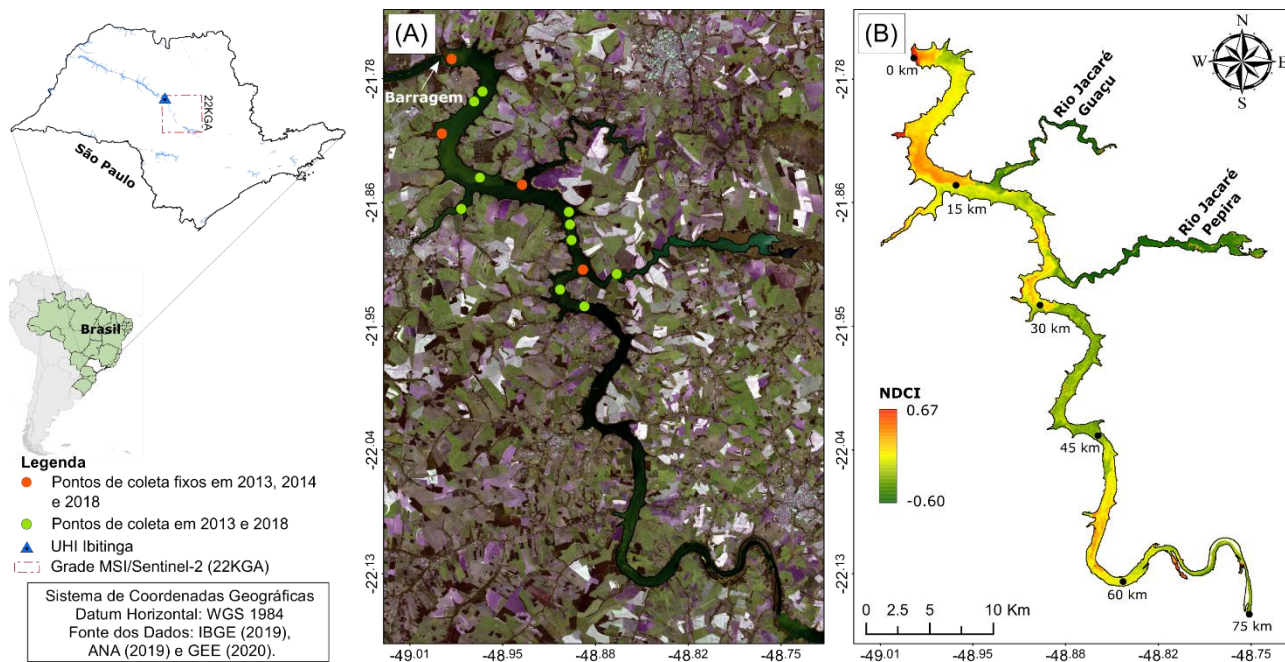
Muitos trabalhos baseados em sensoriamento remoto foram desenvolvidos no reservatório da Usina Hidrelétrica de Ibitinga, localizado no estado de São Paulo, que corresponde a área de aplicação deste estudo (Novo *et al.*, 2013; Londe *et al.*, 2016; Cairo *et al.*, 2017; Cairo *et al.*, 2020). Contudo, pouco se conhece sobre os padrões da distribuição e frequência de *blooms* de algas em Ibitinga. Desta forma, o objetivo desse estudo é analisar a distribuição espacial e temporal da intensidade de *blooms* de algas no reservatório por meio da classificação contínua *fuzzy*. Para tanto, foram usados dados derivados da série temporal de imagens do sensor MSI/Sentinel-2 entre os anos de 2018 e 2020, a fim de se estimar a floração de algas no reservatório por meio do índice espectral NDCI. Os atributos das cenas foram modelados por uma função de pertinência *fuzzy* linear, e em seguida combinados para a análise e determinação da frequência dos *blooms* de alta pertinência.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo compreende o reservatório da Usina Hidroelétrica de Ibitinga (UHI), localizado no estado de São Paulo (Figura 1), o qual integra o sistema de barramento em cascata construído ao longo do rio Tietê, cuja a finalidade é regular a vazão do rio. O reservatório de Ibitinga apresenta vazão média efluente de aproximadamente 525 m³/s, profundidade média de 9 m, tempo de residência variando entre 12 e 43 dias, e recebe as águas principalmente dos rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçu. O rio Jacaré-Pepira está localizado na Área de Proteção Ambiental de Ibitinga, enquanto que o rio Jacaré-Guaçu corresponde ao corpo receptor do efluente da cidade de Ibitinga/SP (Guimarães Júnior *et al.*, 1998).

Figura 1 – Localização do reservatório em estudo na data de 18/06/2020 sendo: (A) a imagem do sensor MSI/Sentinel-2 com composição falsa cor R5G3B4 e a distribuição espacial dos pontos de coleta *in situ* e o (B) índice espectral NDCI com medidas de referência da extensão do reservatório.



Dados de satélite e cálculo do índice espectral NDCI

Foram utilizadas imagens do sensor MSI/Sentinel-2 disponibilizadas com o atributo de reflectância de superfície pela plataforma *Google Earth Engine* (<https://earthengine.google.com>) entre dezembro/2018 e junho/2020, totalizando 42 imagens selecionadas sem cobertura de nuvens. O sensor MSI/Sentinel-2 possui características de média resolução espacial (10, 20 e 60 m) e resolução radiométrica (12 bits), espectral (13 bandas) e temporal (~5 dias), que permitem sua aplicação no mapeamento das águas interiores (Cairo *et al.*, 2020; Page *et al.*, 2018). Para cada data selecionada, extraiu-se a máscara de água e estimou-se a intensidade de floração de algas, por meio do cálculo dos índices de diferença normalizada *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (Mcfeeters, 1996) e NDCI (Mishra e Mishra, 2012) ($NDCI = R(705) - R(665) / R(705) + R(665)$), respectivamente.

Dados de campo

As medidas de campo incluem a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) e a concentração de chl-a, coletadas em 37 pontos ao longo do reservatório de Ibitinga/SP entre os anos de 2013 e 2018 (Figura 1A). Os dados de campo foram disponibilizados por Cairo (2020). A R_{rs} foi estimada por meio de um conjunto de três espectrorradiômetros intercalibrados TriOS-RAMSES, como descrito em Mobley (2015). Já a concentração de chl-a foi obtida pela metodologia de Nusch (1980). No período estudado, a concentração de chl-a no reservatório variou entre $\sim 3 \mu\text{g.L}^{-1}$ e $\sim 260 \mu\text{g.L}^{-1}$.

Função de pertinência *fuzzy*

A classificação dos valores de NDCI baseou-se no conceito da lógica *fuzzy* (Zadeh, 1965). Nesta abordagem, os limites entre classes que não são exatos são preservados pela aplicação da função de pertinência (FP). A FP classifica os valores de NDCI no intervalo de 0 a 1, tal que a pertinência 1 indica a ocorrência de florações intensas e a pertinência 0 indica a baixa ocorrência de florações de algas. Nesse trabalho, foi usada uma FP linear (Equação 1), conforme observado em estudos sobre a eutrofização de corpos de água (Ellina e Kagalou, 2016), e como uma primeira tentativa de

modelagem dos eventos de floração de algas no reservatório de Ibitinga usando a classificação contínua *fuzzy*. Os limiares das classes 0 e 1 da FP foram obtidos por meio dos dados de R_{rs} e de chl-a medidos em campo. Com os espectros de campo, as bandas B4 (665 nm) e B5 (705 nm) do sensor MSI/Sentinel-2 foram simuladas, e utilizadas no cálculo do índice NDCI. Para estimar os valores de NDCI correspondentes aos eventos de alta e baixa floração de algas, gerou-se uma regressão de polinômio de grau 2 com $R^2 \sim 0.88$ ($n = 37$), usando os valores de NDCI calculados por meio das bandas simuladas e os valores de concentração de chl-a ($NDCI = -0.000013 \cdot chl^2 + 0.005911 \cdot chl - 0.090726$). Com isso, substituindo na equação os limites dos intervalos da concentração de chl-a das classes limnológicas OligoMeso ($chl \leq 11,03 \mu g.L^{-1}$) e Hiper ($chl-a > 69,05 \mu g.L^{-1}$) descritas em Cairo (2020), foram obtidos os limiares da FP em $a = -0.03$ (pertinência 0) e $b = 0.26$ (pertinência 1).

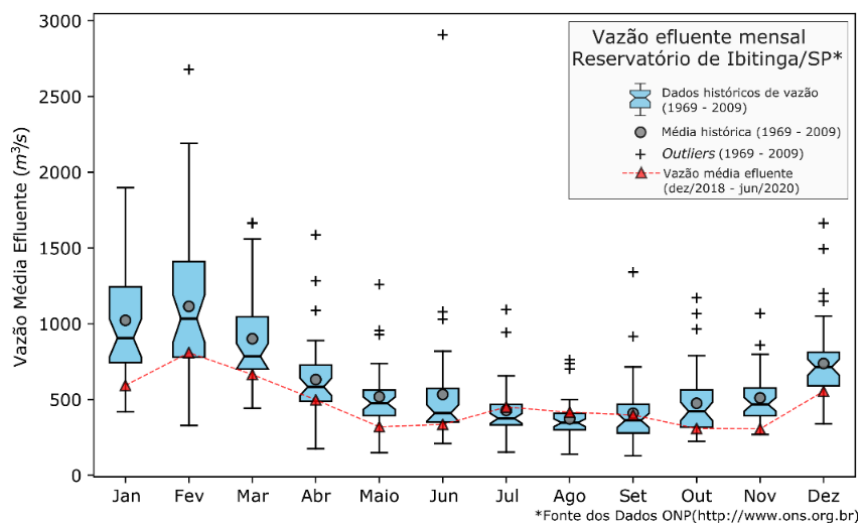
$$FP = \begin{cases} 0, & NDCI \leq a \\ \left(\frac{NDCI - a}{b - a}\right), & a < NDCI < b \\ 1, & NDCI \geq b \end{cases} \quad (1)$$

Definida a função de pertinência, as imagens foram submetidas à classificação dos valores de NDCI ao seu valor de pertinência correspondente, gerando os planos de informações (PIs).

Composição dos planos de informação (PIs)

Os PIs contendo os valores de pertinência foram agrupados em quatro períodos, tomando como referência os valores de vazão média efluente do reservatório (Figura 2). Os períodos foram divididos em: Período 1 (Janeiro, Fevereiro e Março – JFM), Período 2 (Abril, Maio, Junho – AMJ), Período 3 (Julho, Agosto e Setembro – JAS) e Período 4 (Outubro, Novembro e Dezembro – OND). Em cada período a quantidade de PIs agrupados foram: 11 (Período 1), 17 (Período 2), 9 (Período 3) e 5 (Período 4). As composições foram geradas a partir do cálculo da média e do desvio padrão dos valores de pertinência dos PIs. Além disso, para cada período fez-se a determinação da frequência da pertinência de valores altos (pertinência 1) (Equação 2).

Figura 2 – Dados de vazão efluente do reservatório de Ibitinga/SP.



$$F(\%) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right) \times 100 \quad (2)$$

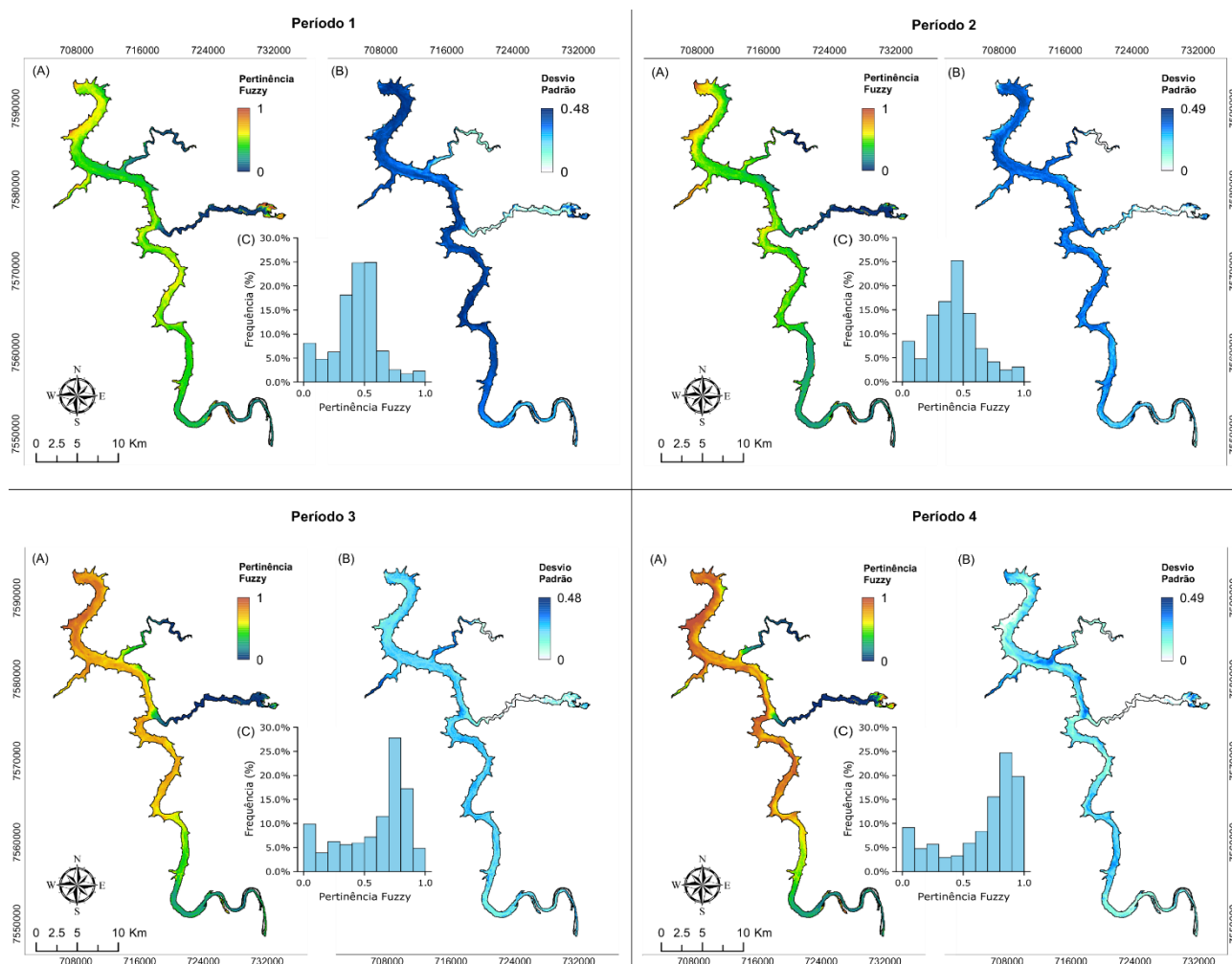
Onde $F(\%)$ é a frequência da ocorrência de florações de alta intensidade em cada período, x_i o valor de pertinência igual a 1 para cada camada i , e n o número de camadas de cada período.

RESULTADOS

A Figura 3 apresenta a distribuição média e a variação da pertinência ao longo do reservatório nos quatro períodos analisados. No Período 1 (JFM), as pertinências foram baixas, com ~88% dos valores de NDCI apresentando pertinência inferior a 0,60. Desses, aproximadamente 50% apresentaram pertinência entre 0,40 – 0,60, o que sugere a baixa ocorrência de eventos de alta intensidade de florações de algas no reservatório. As maiores pertinências entre 0,80 – 1,0 corresponderam a apenas 4% dos valores do índice espectral classificado, ocorrendo principalmente próximo das margens e da barragem de Ibitinga. Neste período, os valores do desvio padrão indicam uma alta variabilidade temporal da ocorrência de *blooms* de algas ao longo dos primeiros meses do ano, principalmente no corpo central do reservatório.

O Período 2 (AMJ), também apresentou valores de pertinência (~84%) concentrados nas classes inferiores a 0,60. No intervalo de 0,50 – 0,60 foi observada uma diminuição dos valores de pertinência, diferentemente dos intervalos entre 0,20 – 0,30 e 0,70 – 1,0, em que ocorreu um incremento em relação ao período anterior, de ~7,0% e ~5,5%, respectivamente. As localidades próximas à barragem e à margem oeste do reservatório foram as mais afetadas pelo aumento da distribuição horizontal das florações de algas. Por outro lado, regiões à montante do reservatório apresentaram uma tendência de baixos valores de pertinência. No período, a variação na ocorrência de *blooms* se manteve alta ao longo da parte central do reservatório, o que significa que para essa mesma região foi frequente a alternância de eventos de alta e baixa intensidade de floração de algas nos meses do ano que compõem o período.

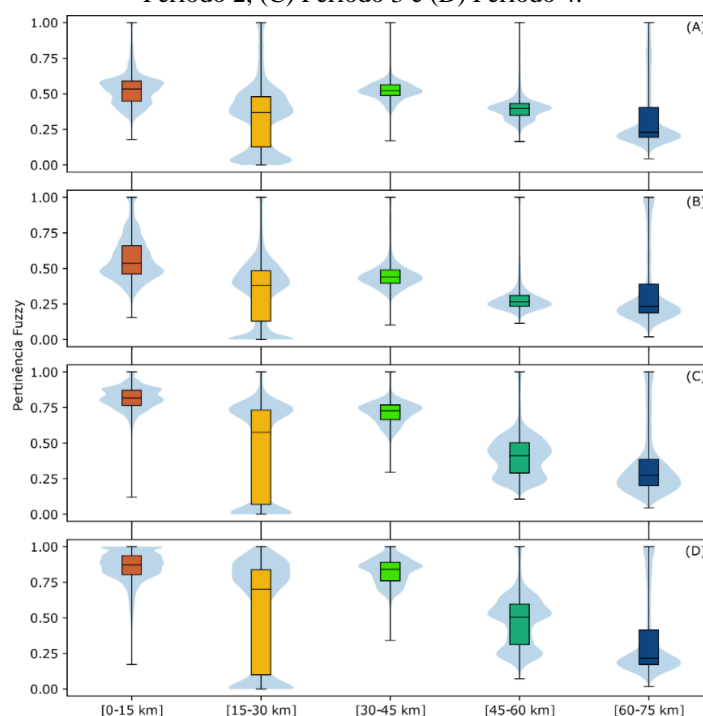
Figura 3 – (A) Média, (B) desvio padrão e (C) frequência da pertinência *fuzzy* ao longo dos períodos 1 a 4 no reservatório UHI Ibitinga.



Os Períodos 3 (JAS) e 4 (OND) mostraram uma forte tendência a altas pertinências. Regiões à montante do reservatório classificadas antes como de baixa ocorrência de floração de algas, passaram a ser ocupadas pelos eventos de alta incidência de *blooms*. No Período 3, as pertinências se mantiveram superiores a 0,70 em aproximadamente ~55% dos valores classificados, com 30% deste valor contido no intervalo de pertinências entre 0,70 – 0,80. De forma semelhante, no Período 4 houve um aumento das pertinências no intervalo entre 0,70 – 1,0, correspondendo a aproximadamente 60% dos valores, com as pertinências entre 0,90 – 1,0 respondendo a ~20% desse valor. Neste período, as regiões classificadas com pertinência em 0,70 – 0,80 no período anterior, foram as mais afetadas pelas pertinências próximas de 1, indicando o aumento da degradação da qualidade da água no reservatório durante esses meses. Além disso, os valores do desvio padrão para ambos os períodos foram baixos ao longo da área do reservatório (inferior a 0,25), indicando a predominância dos eventos de floração de algas de alta intensidade em Ibitinga.

A distribuição espacial das florações ao longo do reservatório indica que estas são mais intensas e frequentes próximas à barragem (Figura 4), visto que em todos os períodos, a ocorrência de altas pertinências foi intensificada nos primeiros 15 km do reservatório. Quando verificados os intervalos interquartis, as pertinências exibiram uma maior heterogeneidade entre 15 – 30 km da distância da barragem, com densidade tanto nos altos como nos baixos valores, sendo esses últimos relacionados com a melhor condição das águas dos tributários e também dos pontos de mistura promovidos pela confluência entre o reservatório e os seus afluentes principais, os rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, como também foi observado por Novo *et al.* (2013). Em todos os períodos, a partir da distância de 45 km da barragem as pertinências apresentaram uma tendência para os baixos eventos de floração de algas.

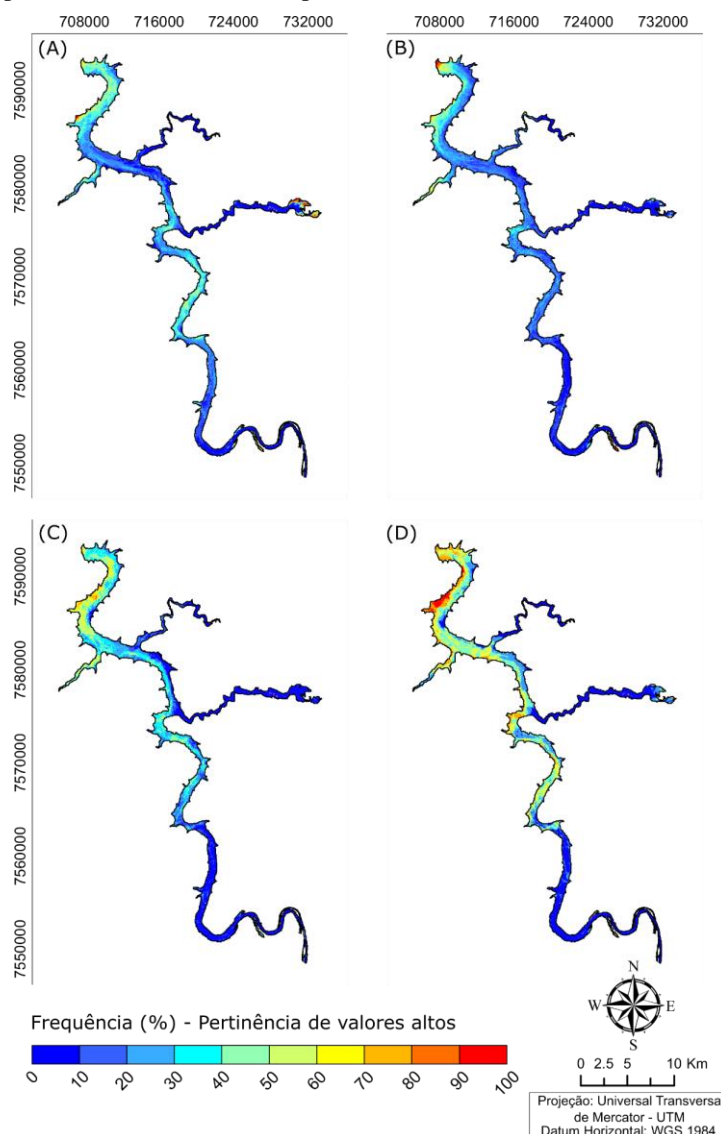
Figura 4 – Distribuição dos valores de pertinência em relação a distância do barramento para: (A) Período 1, (B) Período 2, (C) Período 3 e (D) Período 4.



Quanto à frequência das altas pertinências (Figura 5), em todos os períodos há áreas que apresentaram em algum momento a completa inserção ao conjunto *fuzzy* (pertinência igual a 1), relacionado com a condição da formação de *superblooms* no reservatório. No Período 1, foram identificadas áreas com alta frequência (60 – 100%) principalmente nas regiões próximas à barragem e à margem oeste do corpo d'água. Nestas regiões, foram também observadas altas frequências (80 – 100%) no Período 2. Em ambos os períodos, o corpo central permaneceu com baixas frequências (30

– 50%), sendo ocupado com altas frequências (superior a 70%) somente nos Períodos 3 e 4. Ainda no Período 4, houve uma intensificação da distribuição horizontal das altas frequências (80 – 100%) na margem oeste.

Figura 5 – Frequência da pertinência de valores altos para: (A) Período 1, (B) Período 2, (C) Período 3 e (D) Período 4.



DISCUSSÃO

O tempo de residência hidráulica, combinado com a disponibilidade de luz e de nutrientes, induz a produtividade e a distribuição da ocorrência do fitoplâncton em reservatórios de água (Londe *et al.*, 2016; Soares *et al.*, 2008). Como esses organismos flutuam livremente na coluna d'água, a mistura resultante do aumento da vazão não possibilita a permanência dessas células na zona eufótica do reservatório, o que limita a ocorrência de floração de algas nas condições de baixo tempo de residência hidráulica (Imboden, 1992; Lewis, 2000). No reservatório de Ibatinga no ano de 2005 (Londe *et al.*, 2016), foi observada a diminuição da área do reservatório (inferior a 10%) afetada pelos eventos de floração de algas para os menores tempos de retenção da água, e o comprometimento de grande extensão do reservatório com as florações (superior a 80%), associado ao maior tempo de retenção da água. Nesse estudo, foi observado um comportamento semelhante. O Período 1 (JFM), composto pelos meses de maior vazão efluente (média de $\sim 688 \text{ m}^3/\text{s}$), apresentou baixa ocorrência de eventos de floração no reservatório. Já os Períodos 3 (JAS) e 4 (OND), com a redução do fluxo de água no reservatório (média de $\sim 405 \text{ m}^3/\text{s}$), foram mais afetados pelos eventos de alta intensidade de

floração. Nestes períodos, a floração de algas é favorecida, devido principalmente à condição lântica do reservatório, à estação seca do ano (abril – setembro), ao menor volume de água no reservatório e a disponibilidade de nutrientes oriundos da entrada de esgoto e das atividades de agricultura (Tundisi et al., 2008). Por outro lado, o Período 2 (AMJ) mesmo com a diminuição dos valores de vazão (média de $\sim 384 \text{ m}^3/\text{s}$) apresentou eventos de baixa intensidade de floração na maior parte do reservatório, o que pode estar relacionado com: (i) o possível comprometimento da disponibilidade de radiação eletromagnética na coluna d'água, devido ao aumento da concentração de sólidos inorgânicos em suspensão na água, escoados da bacia de drenagem nos meses da estação chuvosa (novembro – março) (Calijuri et al., 2002); (ii) o arraste das células do fitoplâncton nos meses da estação chuvosa; ou (iii) a estratificação vertical do fitoplâncton (Imboden, 1992), uma vez que esse período é de transição de altas para baixas vazões, o que pode corresponder ao tempo de estabilização das células na coluna d'água.

As variações do desvio padrão, maior para os Períodos 1 (JFM) e 2 (AMJ) e menor para os Períodos 3 (JAS) e 4 (OND), indicam a ação dos processos hidrodinâmicos que ocorreram no reservatório. Como a usina de Ibitinga é do tipo fio d'água, em que a vazão afluyente é a mesma utilizada no aproveitamento de energia da barragem (ANEEL, 2011), com o aumento das vazões afluentes e efluentes da água, o eixo central do reservatório pode adotar comportamento similar aos sistemas lóticos, com fluxo e turbulência. Isso pode justificar a dependência espacial dos eventos de alta intensidade de floração mais próximos às margens do reservatório, onde é esperado que a velocidade da massa d'água seja menor, e justificar também a ocorrência dos eventos de alta intensidade de floração no centro do corpo d'água, observada nos Períodos 3 (JAS) e 4 (OND), uma vez que as células do fitoplâncton ganham maior estabilidade na coluna d'água com a diminuição do fluxo da água.

Com a recorrência das altas pertinências em todos os períodos, foi revelada a condição eutrófica do reservatório independentemente da estação do ano, possivelmente como um resultado do aumento da concentração de nutrientes no reservatório pela constante entrada de esgotos domésticos e industriais consequentes das atividades desenvolvidas na bacia de drenagem, e nas últimas décadas, pela conversão das áreas de pastagem em áreas de cultivo intensivo de cana-de-açúcar (Scarpore *et al.*, 2016; Duden *et al.*, 2021). Para um mesmo tempo de observação, ocorreram ao longo do reservatório eventos de baixa e alta intensidade de floração de algas, ou seja, diferentes níveis tróficos aconteceram no sistema. Como observado nesse estudo, esses eventos descrevem um comportamento não aleatório no espaço e no tempo.

CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que a utilização da classificação *fuzzy* expressa bem o comportamento difuso do componente opticamente ativo chl-a na água, permitindo a exploração da ocorrência das florações de algas no reservatório no espaço e no tempo. Os eventos de floração de algas para Ibitinga, mostrou-se variável e dependente das condições sazonais e hidráulicas da barragem, e que mesmo nos períodos de condições de baixa pertinência ocorrem níveis tróficos elevados. Além do que, as áreas mais afetadas pelo surgimento das florações de algas são as localizadas mais próximas à barragem, que como observado, em até 15 km da barragem a resposta da densidade das pertinências sempre possui um comportamento superior em detrimento das outras regiões do reservatório. Ainda que esse estudo tenha demonstrado o comportamento das florações no tempo, a janela de observação utilizada entre dez/2018 e jun/2020 foi curta, sendo interessante a ampliação desse intervalo, a fim de ser obter melhores estimativas do comportamento das florações de algas para os períodos em que a quantidade de imagens sem cobertura de nuvens foi menor. Outra abordagem interessante é a exploração de outras funções de pertinência, já que para este estudo o ecossistema foi modelado em uma perspectiva linear.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional das Águas. (2020). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: Informe anual/Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*. Brasília: ANA. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio 2021.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (2011). *Resolução Normativa N° 425, de 1° de fevereiro de 2011*. Dispõe sobre os critérios para definição das instalações de geração de energia elétrica sob fiscalização da SFG/ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 18 maio 2021.
- CAIRO, C. T. (2020). *Abordagem híbrida aplicada ao monitoramento sistemático do estado trófico da água por sensoriamento remoto em reservatórios: reservatório da UHE Ibitinga/SP*. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.
- CAIRO, C., et al. (2017). *Spatial and seasonal variation in diffuse attenuation coefficients of downward irradiance at Ibitinga Reservoir, São Paulo, Brazil*. *Hydrobiologia*, 784, n. 1, pp. 265-282.
- CAIRO, C., et al. (2020). *Hybrid chlorophyll-a algorithm for assessing trophic states of a tropical brazilian reservoir based on MSI/Sentinel-2 data*. *Remote Sensing*, 12.
- CALIJURI, M. C.; dos SANTOS, A. C. A.; JATI, S. (2002). *Temporal changes in the phytoplankton community structure in a tropical and eutrophic reservoir (Barra Bonita, S.P. - Brazil)*. *Journal of Plankton Research*, v. 34, pp. 617-634.
- CETESB, Companhia Ambiental do estado de São Paulo. (2019). *Qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo 2019*. São Paulo: CETESB. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 15 maio 2021.
- DUDEN, A. S., et al. (2021). *Hydrological impacts of ethanol-driven sugarcane expansion in Brazil*. *Journal of Environmental Management*, 282, pp. 1-9.
- ELLINA, G.; KAGALOU, I. (2016). *Selection of the most appropriate parameter for the chlorophyll-a estimation of an artificial lake via fuzzy linear regression*. *European Water*, 55, pp. 105-114.
- ELLINA, G.; PAPASCHINOPOULOS, G.; PAPADOPOULOS, B. K. (2017). *Fuzzy Inference Systems: Selection of the most Appropriate Fuzzy Implication from Available Lake Water Quality Statistical Data*. *Environ. Process*.
- FORD, R. T.; VODACEK, A. (2020). *Determining improvements in Landsat spectral sampling for inland water quality monitoring*. *Science of Remote Sensing*, 1, pp. 1-10.
- GUIMARÃES JUNIOR, C., et al. (1998). *Aspectos limnológicos do reservatório de Ibitinga - SP*. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13, pp. 89-103.
- IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). *Cidades e Estados*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>>. Acesso em: 15 maio 2021.
- IMBODEN, D. M. (1992). *"The impact of physical processes on algal growth"*, in *Eutrophication: research and application to water supply*. Eds by SUTCLIFFE, D. W. and JONE, J. G. F.B.A. Freshwater Biological Association.
- KIRK, J. T. O. (2011). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 528p.
- KULSHRESHTHA, A.; SHANMUGAM, P. (2018). *Assessment of trophic state and water quality of coastal-inland lakes based on Fuzzy Inference System*. *Journal of Great Lakes Research*, 44, pp. 1010-1025.

- LEWIS, W. M. (2000). *Basis for the protection and management of tropical lakes*. Research and Management, 5, pp. 35-48.
- LONDE, L. R., et al. (2016). *Water residence time affecting phytoplankton blooms: study case in Ibitinga Reservoir (São Paulo, Brazil) using Landsat/TM images*. Brazilian Journal of Biology, 76, pp. 664–672.
- MCFEETERS, S. K. (1996). *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. International Journal of Remote Sensing, 17, pp.1425-1432.
- MISHRA, S.; MISHRA, D. R. (2012). *Normalized difference chlorophyll index: a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters*. Remote Sensing of Environment, 117, pp. 394-406.
- MOBLEY, C. D. (2015). *Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces*. Applied Optics, 54, pp. 4828-4849.
- MOORE, T. S.; CAMPBELL, J. W.; DOWELL, M. D. (2009). *A class-based approach for characterizing the uncertainty of the MODIS chlorophyll product*. Remote Sensing of Environment, 113, pp. 2424–2430.
- MOORE, T. S., et al. (2014). *An optical water type framework for selecting and blending retrievals from bio-optical algorithms in lakes and coastal waters*. Remote Sensing of Environment, 143, pp. 97-111.
- NOVO, E. M. L. M., et al. (2013). *Proposal for a remote sensing trophic state index based upon Thematic Mapper/Landsat images*. Revista Ambiente Água, 8.
- NUSCH, E. A. (1980). *Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination*. Archiv fur Hydrobiologie, 14, pp. 14-36.
- PAGE, B. P.; KUMAR, A.; MISHRA, D. R. (2018). *A novel cross-satellite based assessment of the spatio-temporal development of a cyanobacterial harmful algal bloom*. Int J Appl Earth Obs Geoinformation, 66, pp. 69-81.
- PICKENS, A. H., et al. (2020). *Mapping and to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series*. Remote Sensing of Environment, 243, pp. 1-19.
- REYNOLDS, C. S. (2006). *Ecology of phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press, 535p.
- SCARPARE, F. V., et al. (2016). *Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment*. Journal of Cleaner Production, 112, pp. 4576-4584.
- SOARES, M. C. S., et al. (2008). *The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil*. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 13, pp. 257-269.
- TUNDISI, J. G., et al. (2004). *The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables*. Braz. J. Btol., 64, pp. 177-186.
- TUNDISI, J. G., et al. (2008). *A bacia hidrográfica do Tietê/Jacaré: estudo de caso em pesquisa e gerenciamento*. Estudos Avançados, 22, pp. 159-172.
- ZADEH, L. A. (1965). *Sets fuzzy*. Information and Control, 8, pp. 338-353.