CARACTERIZAÇÃO DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS POR SENSORIAMENTO REMOTO NO OCOÍ, RESERVATÓRIO DE ITAIPU – BR

Gisieli Kramer [1], Rafael Zini Ouriques [2], Edimar Pereira[3], Rafael Desordi[4], Diego Alberto Tavares[5], Waterloo Pereira Filho[6]

[1, 2] Pós-Doutorandos pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); [3,4] Doutorando pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); [4,5]Analistas ambientais da Itaipu Parquetec, Foz do Iguaçu-PR; [6] Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO), Av. Roraima, 1000, Bairros Camobi, Santa Maria – RS.

[1]gisieli@outlook.com.br, [2]rafazinioriques@gmail.com, [3]edimarj87@gmail.com, [4]vidorrafael@gmail.com, [5]diego.tavares@itaipuparquetec.org.br, [6]waterloo@ufsm.br

RESUMO

A riqueza e abundância de espécies de macrófitas aquáticas (MAs) e suas áreas de recorrências devem ser consideradas no manejo de ecossistemas de água doce. O sensoriamento remoto fornece recursos para a caracterização da proliferação dessas espécies. Este trabalho objetivou caracterizar a área da ocorrência de espécies de MAs e sua diversidade no Compartimento Aquático Ocoí (CAO), reservatório de Itaipu, 2013-2023. Análises em imagens do Landsat 8, no *Google Earth Engine*, identificaram recorrências mensais de MAs. Trabalhos *in situ* revelaram a diversidade de 12 espécies principais. Os meses de março e outubro apresentaram maiores áreas de recorrências de MAs, com espécies nativas e invasoras. Estes dois meses correspondem a períodos de transição da temperatura, do *Land Use and Land Cover* (LULC) e da cota d'água do reservatório. Os períodos com maior área de recorrência da riqueza de espécies *in situ* mostrou similaridade com os resultados obtidos nas imagens de satélite.

Palavras-chave — plantas aquáticas, **Landsat 8, NDVI,** ***Google Earth Engine (GEE).***

ABSTRACT

The richness and abundance of Aquatic Macrophyte (AM) species and their recurrence areas should be considered in the management of freshwater ecosystems. Remote sensing provides resources for characterizing the proliferation of these species. This study aimed to characterize the occurrence area of AM species and their diversity in the Aquatic Compartment Ocoí (CAO), Itaipu Reservoir, from 2013 to 2023. Analyses of Landsat 8 images in Google Earth Engine identified monthly recurrences of AMs. In situ surveys revealed the diversity of 12 main species. March and October showed larger recurrence areas of AMs in the images, including both native and invasive species. These two months correspond to transitional periods in temperature, Land Use and Land Cover (LULC), and water level of the reservoir. Periods with the highest recurrence area of species richness in situ showed similarity with the results obtained from satellite images.

Key words — aquatic plants, **Landsat 8, NDVI,** ***Google Earth Engine (GEE).***

1. INTRODUÇÃO

Aspectos de comunidades de MAs, como riqueza de espécies e suas recorrências, devem ser considerados ao tomar decisões de manejo em ecossistemas de água doce. Estressores antrópicos podem intensificar os processos de sucessão ecológica das MAs e, devido a isso, são consideradas como bioindicadoras da qualidade da água [1,2]. A redução na diversidade de espécies pode estar associada às mudanças que ocorrem em seu habitat físico, que favorecem a propagação de espécies invasoras associadas aos efeitos do LULC [3]. Ainda, existe a possibilidade de que os impactos do aquecimento global sobre esses produtores primários se propaguem em um "efeito cascata", e influenciem indiretamente os níveis tróficos de ecossistemas aquáticos [4].

Os avanços substanciais nos recursos de sensoriamento remoto têm ampliado a disponibilidade e acessibilidade de dados retroativos sobre a dinâmica de comunidades amostrais de MAs. A análise temporal a partir de imagens de satélite, mesmo em curtos períodos, pode revelar padrões de ocorrência dessas espécies em diferentes períodos do ano [5, 6, 7, 8]. Na literatura são descritos diversos índices derivados de sensoriamento remoto para a identificação de MAs com base em imagens orbitais, que permitem a sua distinção em relação a outras formas de vegetações [6, 9, 10]. Entre eles, destacam-se o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) [9], o *Green Soil-Adjusted Vegetation Index* (GSAVI) [6] e o *Normalized Water-Adjusted Vegetation Index* (NWAVI) [10].

Diante deste contexto, buscou-se compreender o seguinte questionamento: qual é o cenário de ocorrência e diversidade de MAs em um período de onze anos no compartimento aquático Ocoí, reservatório de Itaipu? Para responder essa questão, o objetivo deste estudo foi caracterizar a área da ocorrência de espécies MA e sua diversidade no COA no período entre 2013 e 2023.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A região de estudo é o CAO, localizado na margem esquerda do reservatório de Itaipu (55km^2, aproximadamente), o qual está inserido na bacia hidrográfica do rio Paraná, mais precisamente na Bacia do Paraná III (Figura 1). O tipo de LULC naquela região é influenciado por seu clima subtropical, com verões quentes, e altitudes entre 200 e 300m no Oeste do Paraná, conforme a classificação *Köppen-Gaiger* [12]. O uso das terras é predominantemente agrícola, com 72,23% de agricultura intensiva. [11].

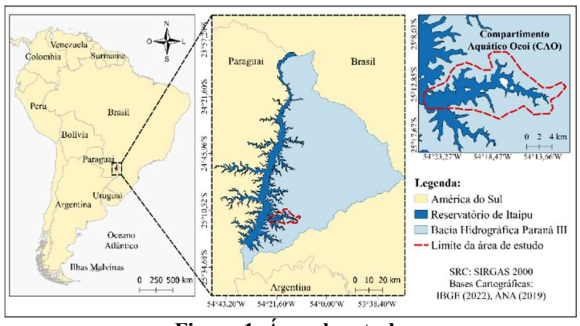


Figura 1. Área de estudo

As MAs da margem esquerda do reservatório de Itaipu são regularmente monitoradas pela Usina Hidrelétrica (UHE) de Itaipu Binacional. Para esse fim, a ela mantém parceria com o Núcleo de Pesquisa em Limnologia, Ictiologia e Aquicultura (Nupélia) da Universidade Estadual de Maringá (UEM). Essas análises realizadas *in situ* são relevantes e servem para validar as informações obtidas a partir de dados de sensoriamento remoto.

O NDVI, muito utilizado para indicar a presença de vegetação, combinado com a Banda 6 do Landsat 8 (Infravermelho médio ≈ 1,57 – 1,65 µm, com 30 m de resolução espacial), pode auxiliar na distinção entre MAs e outras formas de vegetação aquática (ex. florações de algais) [8, 13]. Assim, os locais com a ocorrência de MAs no CAO foram identificados a partir de imagens do Landsat 8 e registros dos seus espectros de reflectâncias, com a construção de um acervo espectral de amostras. Além deste procedimento, a aquisição de espectros de reflectância em imagens nos locais com florações algais foi fundamental para buscar evidências de diferenciação entre elas.

Os espectros de reflectância selecionados, a partir de imagens de satélite, foram avaliados no *software Envi* (versão 5.5.3) em diferentes comprimentos de onda (Bandas 1 a 7) e na combinação de diferentes bandas (456/BGR, 432/RGB), a partir de perfis espectrais que mostraram a variação da reflectância dos alvos selecionados. Deste processo, gerou-se limiares para a identificação de MAs no Ocoí, associados ao NDVI. Os limiares desenvolvidos foram aplicados a um conjunto de imagens do Landsat 8 entre 2013 e 2023, processadas em *scripts* elaborados na plataforma de análise geoespacial *Google Earth Engine* (GEE).

O recorte temporal estabelecido para a análise dos registros das espécies em campo foi definido de acordo com a disponibilidade de imagens de satélite com boa qualidade. Dados coletados *in situ* revelaram mais de 50 espécies de MA no CAO, no período entre 2007 e 2023 (Dados fornecidos pelo Nupélia). Porém, neste estudo, foram selecionadas apenas as espécies com recorrência maior que 100 vezes e com distribuição mensal na área, entre 2013 e 2023.

3. RESULTADOS

A partir da avaliação de uma média de 500 *pixels* de refletância para cada alvo e verificação das variações do NDVI na água, estabeleceu-se limiares de acordo com a realidade local do CAO (NDVI > 0,2 + B6 < 0,79). Ainda que os limiares tenham aparente confusão espectral com florações de algas o que, consequentemente, superestima áreas com ocorrência de MAs, a coleta de verdades de campo evidenciaram expressivos bancos de MAs para a maioria das ocorrências (Figura 2). Aspectos relacionados à área, textura, densidade, forma e agrupamento das comunidades aquáticas sugerem a distinção de MAs emersas e um florescimento de algas [5] e, nesse sentido, a inspeção visual em cada imagem foi necessária.

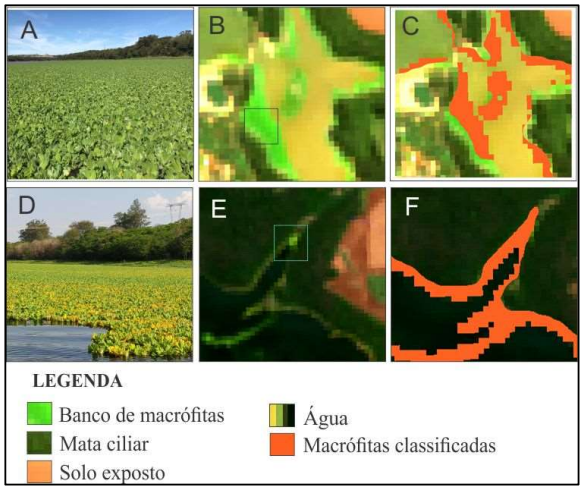


Figura 2. Banco de macrófitas *in situ* e em imagens; A -macrófitas 12-08-2022; B - Landsat 8 12-08-2022; C - NDVI +B6<0,79; D - macrófitas 27-09-2021; E - Landsat 8 26-09-2021; F - NDVI + B6<0,79

A ocorrência mensal de MAs foi observada em imagens do satélite Landsat 8, em um total de 89 cenas. No geral, os meses de março e outubro apresentaram a maior recorrência de MAs de acordo com a média móvel, no compartimento aquático Ocoí (Figura 3).

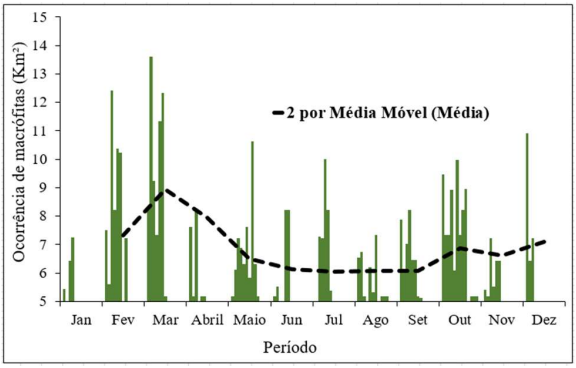


Figura 3. Ocorrência mensal de Macrófitas Aquáticas em imagens de satélite Landsat 8 no Ocoí, 2013-2023

A seleção de espécies com recorrência superior a 100 vezes entre 2013 e 2023 resultou em 12 espécies distintas. O arranjo mensal destas 12 espécies na área de estudo pode ser observado na Figura 4. As espécies dominantes, com ocorrência constante em todos os períodos, são representadas pela *Egeria Najas* e *Urochloa arrecta*. As espécies mostraram recorrências maiores em outubro e novembro, na primavera, e março, verão/outono.

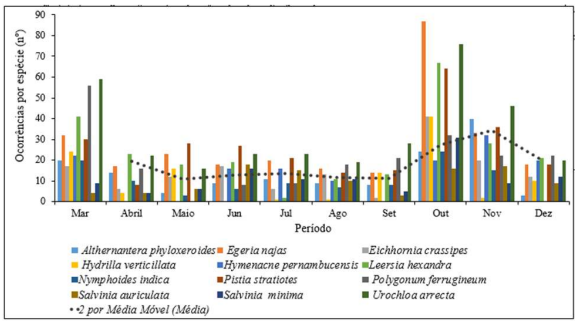


Figura 4. Ocorrência mensal de espécies de Macrófitas Aquáticas *in situ* no Ocoí, 2013-2023

4. DISCUSSÃO

Os períodos identificados com maiores áreas de recorrências e riqueza de espécies das MAs, para as cenas disponíveis, foram semelhantes. Trata-se de períodos de transição. Esse fato pode estar associado às mudanças que ocorrem em seu habitat físico e proliferam em diferentes escalas aos efeitos do LULC [14, 2], às mudanças na temperatura [15, 3, 9, 16] e à variação da cota d'água do reservatório [8].

A espécie dominante *Egeria najas* é uma MA submersa nativa da América do Sul, cuja estratégia reprodutiva é pouco conhecida. Cresce rapidamente e forma densas colônias [17]. Esta condição pode levar à competição entre espécies, à alteração de habitats aquáticos e à obstrução de cursos d'água. Quando se prolifera de forma anômala, pode prejudicar a biodiversidade e afetar as atividades humanas, como pesca e navegação. Há registros desta espécie no alto curso do Rio Tiête, em São Paulo [6].

A espécie *Urochloa arrecta* destacada na Figura 4, típica de regiões tropicais e subtropicais, é uma *Poaceae* originária da África com potencial de regeneração, que compete com espécies nativas e, portanto, uma MA invasora [18]. Essa informação reverbera a atuação de estressores antrópicos e sua influência na sucessão ecológica de MAs, bem como destaca a proeminência de espécies invasoras.

Tanto as algas quanto as macrófitas absorvem luz em comprimentos de onda específicos e refletem na faixa do infravermelho próximo. Essa condição resulta características espectrais com valores de NDVI semelhantes entre elas e, portanto, causa confusão na diferenciação. Somado a isso, as florações podem se desenvolver rapidamente em resposta a condições ambientais favoráveis (como nutrientes e luz), e isso pode conflitar temporariamente com a presença de macrófitas aquáticas. Além disso, as características hidrodinâmicas intrínsecas ao padrão dendrítico do CAO dispersa os bancos de macrófitas flutuantes e, assim, gera mistura espectral de pixels com as florações algais, nas imagens. Logo, parece promissor ajustar a metodologia, trabalhar conjuntos de dados maiores para treinar algoritmos de classificação e com base em perfis térmicos, o que pode ser uma pista para diferenciar algas e macrófitas. Além disso, o uso de imagens de satélites de maior resolução espacial ou temporal pode proporcionar uma melhor identificação das características específicas das macrófitas, juntamente com a validação de campo.

5. CONCLUSÕES

A interpretação dos dados de ocorrência de MAs pode ser complexa, uma vez que florações de algas também podem gerar valores semelhantes de NDVI, e confundir sua identificação. Essa sobreposição nos índices é particularmente crítica em ambientes que ambos os alvos estão presentes, pois a proliferação de algas pode mascarar a presença de MAs. Portanto, a combinação entre os valores de NDVI com os da Banda 6 (Landsat 8), somada às análises complementares (verdades de campo), é essencial para diferenciar efetivamente MAs de florações de algas. Ressalta-se que outros índices e combinações devem ser testados para aprimorar essa diferenciação na área de estudo.

Esta pesquisa mostrou que os períodos com maior área de recorrência da riqueza de espécies *in situ* coincidem com os resultados obtidos nas imagens de satélite Landsat 8. Além disso, mostrou também a importância de conhecer a diversidade de proliferação das MAs e seu contexto para a biodiversidade aquática. Os resultados obtidos apresentaram potencial promissor para o aperfeiçoamento da pesquisa, a compreensão da diversidade que compõem o habitat do compartimento aquático Ocoí, e pode contribuir nos ajustes dos limiares para a identificação das MAs.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro fomentado pela Itaipu Binacional e Itaipu Parquetec (convênio nº 4500071550/2023), por meio de uma bolsa-auxílio para o desenvolvimento das atividades de pesquisa no Projeto Núcleo de Inteligência Territorial – Fase II; da Universidade Estadual de Maringá pelas informações da série histórica do monitoramento de macrófitas (Nupélia); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS 23/2551-0001947-7), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq nº311977/2022-7/403696/2023-2); e da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), representada pelo Laboratório de Geotecnologias (LABGEOTEC).

7. REFERÊNCIAS

[1] D. Dubey, S. Kumar, V. Dutta. In-situ anatomical and elemental response of aquatic macrophytes against nutrient enrichment in freshwater tropical lakes, *Applied Water Science*, v.12:163, 2022.

[2] A. L. B. Fares, L. B. Calvão, N. R. Torresa, E. S. C. Gurgel, and T. S. Michelana. Environmental factors affect macrophyte diversity on Amazonian aquatic ecosystems inserted in an anthropogenic landscape. *Ecological Indicators,* v. 113:106231, 2020.

[3] T. C. Madzivanzira, C. P. Mungenge, T. Dube and T. Dalu. From benthic to floating: phytoplankton dynamics in African freshwater lakes and reservoirs. *Microbial Diversity and Sustainability*, v. 4:97-137, 2023.

[4] O. A. Carriel, G. Diagonel, L. K. V. Boas, R. C. d. Oliveira, and C. C. Z. Branco.The temperature increase due to climate warming can affect the photosynthetic responses of aquatic macrophytes from tropical lotic ecosystems Orlando Aparecido Carriel, *Tropical Ecology*, v.64: 612–619, 2023.

[5] K. R. d. Nascimento, K. F. d. Mello, N. A. Burda, P. G. d. Silva, D. S. d. Oliveira, J. L. G. d. Silva, B. R. d. S. Maia, and L. S. d. Oliveira. Environmental monitoring and management of the itaipu reservoir: using remote sensing for the detection of aquatic plants, *Revista Foco*, v.17: 01-15, 2024.

[6] A. G. d. Luz, T. B. Bleninger, B. A. Polli, and B. Lipski. Spatio-temporal variation of aquatic macrophyte cover in a reservoir using Landsat images and Google Earth Engine. *Brazilian Journal of Water Resources,* v. 27: e37, 2022.

[7] G. Bai, Y. Zhang, P. Yan, W. Yan, L. Kong, L. Wang, C. Wang, Z. Liu, B. Liu, J. Ma, J. Zuo, J. Li, J. Bao, S. Xia, Q. Zhou, D. Xu, F. He, and Z. Wu. Spatial and seasonal variation of waterparameters, sediment properties, and submerged macrophytes after ecological restoration in a long-term (6 year) study in Hangzhou west lake in China: submerged macrophyte distribution influenced by environmental variables. *Water Research*, v.186:116379, 2020.

[8] C. N. d. Rosa, W. P. Filho, J. R. Favaretto, A. C. P. Benedetti. Occurrence of aquatic macrophytes in the brazilian side of the Itaipu reservoir with the use of sentinel-2a images, *Rev. Bras. de Cartografia*, vol. 70:1113-1134, 2018.

[9] L. F. Coladello, M. d. L. B. T. Galo, M. H. Shimabukuro, I. Ivánová, and J. Awange. Assessing Climate Influence on Spatiotemporal Dynamics of Macrophytes in Eutrophicated Reservoirs by Remotely Sensed Time Series, *Remote Sens,* v.14: 3282, 2022.

[10] Y. Gao, J. Gao, J. Wang, S. Wang, Q. Li, S. Zhai, and Y. Zhou. Estimating the biomass of unevenly distributed aquatic vegetation in a lake using the normalized water-adjusted vegetation index and scale transformation method. *Science of The Total Environment,* v.601-602: 998-1007, 2017.

[11] Plano da Bacia Hidrográfica do Paraná 3. *Uso e ocupação do solo,* Cascavel, 2014. Acesso em: 21. out. 2024.

[12] C. A. Alvares, J. L., Stape, P. C. Sentelhas, d.M. Gonçalves, J. Leonardo, and S. Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift,* v. 22:711–728, 2013.

[13] X. Han, L. Feng, C. Huc, and X. Chena. Wetland changes of China's largest freshwater lake and their linkage with the Three Gorges Dam. *Remote Sensing of Environment*, v. 204:799–811, 2018.

[14] M. Grzybowski, G. ˙ Furgała-Selezniow, J. Koszałka, J. Kalinowska, and M. Jankun-Wo´znicka. Correlation between catchment land use/cover and macrophyte assessment of lake ecological status. *Ecological Indicators*, v. 146:109857, 2023.

[15] H. Duan, K. Yang, C. Shang, X. Zhou, and Y. Luo. Anthropogenic impact of lake surface water temperature of lakes: A case study of eleven lakes on the yunnan-guizhou plateau, *Ecological Indicators*, v.165: v. 165: 112165, 2024.

[16] S. Calero, L. P. C. Morellato and M. A. Rodrigo. Persistence of submerged macrophytes in a drying world: Unravelling the timing and the environmental drivers to produce drought-resistant propagules, *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst*, v. 28:894–909, 2018.

[17] L. C. Lucio, B. Scorsim, A. C. d. Silva, J. N. M. d. Carvalho, A. V. d. Oliveira, K. F. Rodrigues, S. M. Thomaz, S. M. A. P. Prioli, and A. J. Prioli. Genetic diversity and occupation strategy of Egeria najas (Hydrocharitaceae) in different habitats along the Upper Paraná River corridor, *Aquatic Botany* , v. 191: 103729, 2024.

[18] D. G. L. d. Melo. Efeitos do sombreamento e eutrofização no desenvolvimento de uma macrófita invasora. *Dissertação* (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Ciências Biológicas (CB), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, v. 1: 40, 2022.