

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MAPEAMENTO DE CORPOS HÍDRICOS URBANOS: AVALIAÇÃO MULTITEMPORAL DO ESPELHO D'ÁGUA NA LAGOA DE IBIRITÉ (MG) COM DADOS DO MAPBIOMAS E ÍNDICE MNDWI

*Diego Rodrigues Macedo¹ ; Fernanda Mara Coelho Pizani² & Rodrigo Affonso Albuquerque
Nóbrega³*

Abstract: The present study investigates the limitations and potential of different water surface mapping methodologies in eutrophic urban environments, with a focus on the Ibirité Lagoon, located in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Brazil. Data from the MapBiomias project (Collection 8) were compared with results obtained by applying the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), calculated from Landsat imagery spanning the years 1985 to 2023. The results revealed a systematic underestimation of water surface area in the MapBiomias products, especially in recent years, when the proliferation of macrophytes and sediment accumulation altered the spectral signature of water. In contrast, the MNDWI showed greater sensitivity in detecting water bodies even under complex conditions with dense floating vegetation. It is recommended that the MapBiomias project incorporate automated routines using calibrated spectral indices such as MNDWI, particularly for urban and peri-urban areas. The findings contribute to the improvement of environmental monitoring methodologies and underscore the importance of tailored approaches in anthropogenically influenced hydrographic systems.

Resumo: Este estudo investiga as limitações e potencialidades de diferentes metodologias de mapeamento de espelhos d'água em ambientes urbanos eutrofizados, com foco na Lagoa de Ibirité, localizada na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Foram comparados dados do projeto MapBiomias (Coleção 8) com resultados obtidos por meio da aplicação do índice espectral MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index* - Índice de Água de Diferença Normalizada Modificado), calculado a partir de imagens Landsat entre os anos de 1985 e 2023. Os resultados evidenciaram subestimação sistemática da superfície hídrica nos produtos do MapBiomias, sobretudo nos anos mais recentes, quando a proliferação de macrófitas e o acúmulo de sedimentos alteraram o padrão espectral da água. Por outro lado, o MNDWI demonstrou maior sensibilidade à detecção de corpos d'água mesmo em cenários complexos, com forte presença de vegetação flutuante. Recomenda-se que o projeto MapBiomias incorpore rotinas automatizadas com índices espectrais calibrados, como o MNDWI, especialmente para áreas urbanas e periurbanas. Os achados contribuem para o aprimoramento de metodologias de monitoramento ambiental e reforçam a importância de abordagens personalizadas em sistemas hidrográficos antropizados.

Palavras-Chave – Sensoriamento Remoto, Geotecnologias, Macrófitas.

1) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte - MG, 31270-901, diegorm@ufmg.br.

2) Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte - MG, 31270-901, fm.coelho@yahoo.com.br.

3) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte - MG, 31270-901, raanobrega@ufmg.br.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a análise de recursos hídricos, possibilitando o monitoramento multitemporal de variáveis ambientais em escala regional e local (Jensen, 2006; Macedo *et al.*, 2025). A disponibilidade de séries históricas, como as do programa Landsat, aliada ao acesso aberto a dados por projetos como o MapBiomas (Souza *et al.*, 2020), viabiliza análises detalhadas sobre o uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas. No entanto, a realização de estudos multitemporais ainda enfrenta desafios metodológicos, como o ajuste geométrico entre cenas e a padronização das classificações, especialmente em áreas de ocupação urbana e periurbana, onde as mudanças antrópicas são rápidas e complexas (Lopes; Nóbrega; Macedo, 2022).

Embora o projeto MapBiomas represente um avanço significativo na democratização do acesso a dados de uso e cobertura da terra no Brasil, sua aplicação em áreas urbanas e periurbanas é limitada tanto pela resolução espacial das imagens atualmente em uso, como por inconsistências de classificação. Estudos apontam a confusão entre classes como vegetação herbácea, áreas úmidas e corpos d'água, principalmente em ambientes fortemente impactados (Lopes; Nóbrega; Macedo, 2022; Pizani; Macedo; Nóbrega, 2025). Essas imprecisões comprometem análises mais refinadas em reservatórios e corpos d'água, exigindo abordagens complementares para alcançar resultados confiáveis em escalas mais detalhadas.

Reservatórios urbanos, como os da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), representam um desafio particular para a classificação automatizada de imagens devido à presença recorrente de macrófitas aquáticas e altas taxas de sedimentação (Macedo *et al.*, 2025; Pizani; Macedo; Nóbrega, 2025). Essas condições alteram temporariamente a refletância espectral da superfície da água, levando a erros de interpretação nos produtos automatizados. Além disso, o lançamento contínuo de efluentes e o crescimento urbano desordenado intensificam o processo de eutrofização, reduzindo a qualidade da água e alterando a dinâmica do espelho d'água ao longo do tempo.

Nesse contexto, a utilização de índices multiespectrais tem se mostrado eficaz para aprimorar a detecção de alvos específicos. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação de Diferença Normalizada) é amplamente utilizado para mapear áreas vegetadas, enquanto o MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index* - Índice de Água de Diferença Normalizada Modificado), uma adaptação do NDWI proposta por Xu (2006) apresenta maior sensibilidade na identificação de corpos d'água, especialmente em ambientes urbanos onde o NDWI tradicional apresenta limitações (McFeeters, 1996; Xu, 2006). Esses índices permitem maior robustez nas análises temporais, especialmente quando aplicados com ajustes locais e validação em campo.

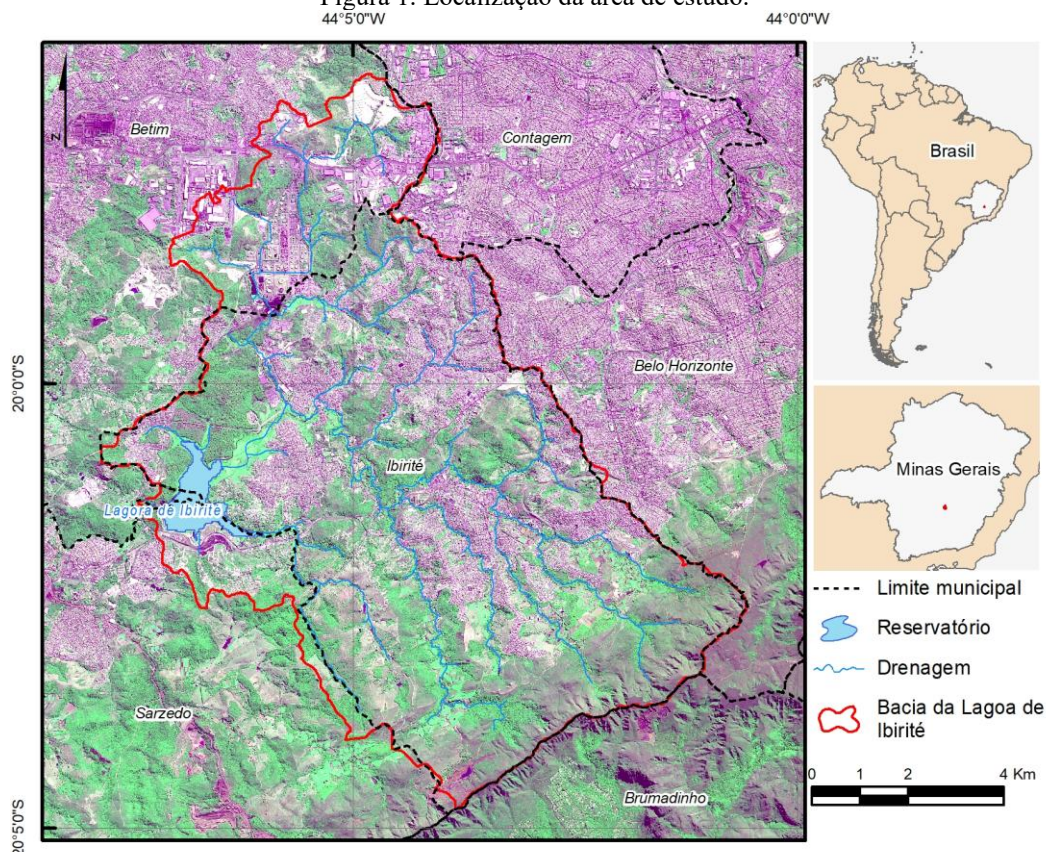
O presente estudo tem como objetivo comparar a classificação multitemporal da cobertura da terra disponibilizada pelo projeto MapBiomas com uma classificação baseada na aplicação do índice MNDWI, em um reservatório urbano com histórico de eutrofização e presença de macrófitas. A análise foi conduzida na área da Lagoa de Ibirité (RMBH), buscando avaliar a acurácia e sensibilidade de cada abordagem frente às particularidades ambientais e antrópicas da região. Este trabalho contribui metodologicamente para o aprimoramento de análises multiescalares em bacias hidrográficas urbanas e propõe alternativas para o mapeamento mais preciso de corpos hídricos urbanos.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica da Lagoa de Ibirité, localizada nos municípios de Betim, Ibirité e Sarzedo, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). Essa bacia integra o sistema de drenagem da sub-bacia do ribeirão Sarzedo, afluente do rio Paraopeba, e possui uma área aproximada de 91,4 km². A região apresenta relevo montanhoso e escarpado, com altitudes variando entre 780 e 1.450 metros, situando-se nos limites da Serra da Moeda, unidade do Espinhaço Meridional, marcada por geologia do tipo quartzítica e elevada suscetibilidade à erosão (Pizani; Macedo; Nóbrega, 2025).

Figura 1. Localização da área de estudo.



O reservatório da Lagoa de Ibirité foi formado na década de 1960, e seu principal objetivo era garantir o abastecimento industrial da refinaria Gabriel Passos, mas ao longo das décadas, o reservatório passou a desempenhar também funções ecológicas e urbanas, como retenção de sedimentos, controle de cheias e habitat para fauna aquática. Atualmente, seu espelho d'água apresenta forte processo de degradação, com redução significativa da lâmina d'água e colonização por macrófitas aquáticas, especialmente *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Pistia stratiotes* (alfaced'água), indicadores típicos de ambientes eutrofizados.

Do ponto de vista do uso e ocupação do solo, a bacia evidencia um padrão de urbanização acelerada e fragmentada, com predominância de ocupações informais em áreas de encosta e zonas de preservação permanente. Dados do Censo Demográfico de 2022 apontam para um aumento

significativo da densidade populacional nas últimas décadas, especialmente nos bairros adjacentes à lagoa, como Jardim Petrópolis, Santa Cruz e Parque das Indústrias (IBGE, 2023). A presença de redes irregulares de esgoto e ausência de coleta e tratamento adequados contribuem para o aporte contínuo de nutrientes e sedimentos à lagoa.

Aquisição de dados do projeto MapBiomas

Para a análise multitemporal do uso e cobertura da terra na bacia da Lagoa de Ibitité, foram utilizadas a classificação do projeto MapBiomas – Coleção 8, correspondentes aos anos de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, e 2023 (Mapbiomas 2024). As cenas foram extraídas por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que hospeda os produtos vetoriais e matriciais do MapBiomas em ambiente de computação em nuvem, facilitando o processamento de grandes volumes de dados geoespaciais (Souza *et al.*, 2020).

O MapBiomas é um consórcio multi-institucional que disponibiliza mapeamentos anuais do território brasileiro com resolução espacial de 30 metros, a partir de composições derivadas de sensores da série Landsat (TM, ETM+ e OLI), com posterior classificação supervisionada baseada em algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente o Random Forest (Souza *et al.*, 2020). Os dados foram recortados para os limites do entorno da lagoa.

A aquisição dos dados foi realizada por meio do acesso ao *asset* do projeto MapBiomas diretamente no Google Earth Engine (GEE), utilizando os arquivos vetoriais correspondentes às classes temáticas de uso e cobertura da terra. As informações foram posteriormente organizadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS 3.34. Para os objetivos deste estudo, foi destacada especificamente a área correspondente à classe “água”, associada à superfície da Lagoa de Ibitité.

Geração do índice MNDWI e delimitação do espelho d’água

Como alternativa ao mapeamento temático disponibilizado pelo projeto MapBiomas, foi utilizada uma abordagem baseada em sensoriamento remoto ativo, com aplicação do índice espectral MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*), proposto por Xu (2006), para aprimorar a detecção do espelho d’água na Lagoa de Ibitité. O MNDWI é calculado com base nas bandas verde e de infravermelho de ondas curtas (SWIR) das imagens da série Landsat, segundo a equação (1):

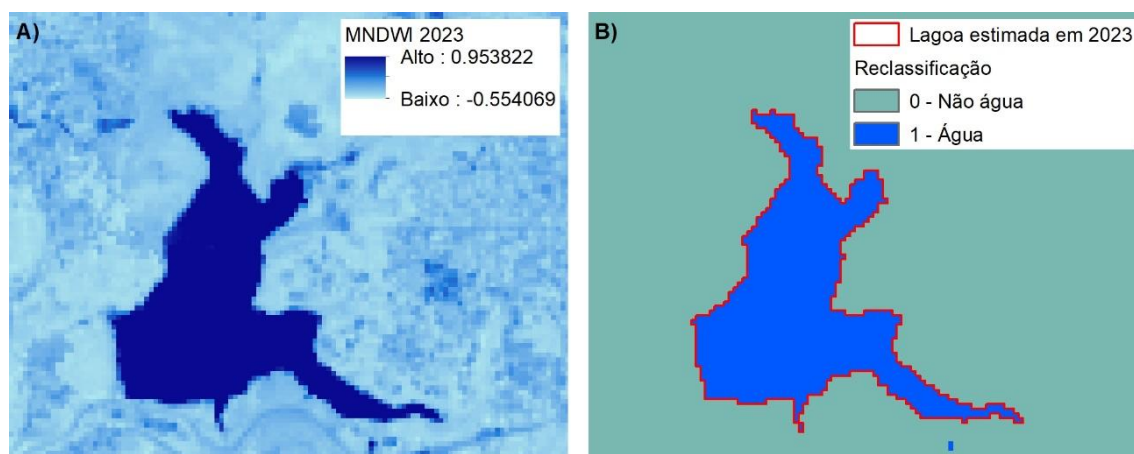
$$MNDWI = \frac{G - SWIR1}{G + SWIR1} \quad (1)$$

Onde G representa a banda do verde, na faixa do espectro que se localiza entre 0,49µm e 0,56µm e o SWIR1 é a banda do infravermelho de ondas curtas, na faixa de aproximadamente 1,60 µm a 1,80 µm.

Para isso, foram utilizadas imagens ortorretificadas dos sensores Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) e Landsat 8 (OLI), correspondentes aos mesmos anos analisados com os dados do MapBiomas: 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, e 2023. As imagens foram processadas na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), adotando-se como critérios de seleção a baixa cobertura de nuvens (<10%) e a inclusão do espelho d’água da Lagoa de Ibitité na cena. Foram utilizadas composições anuais através valor do pixel com a máxima resposta entre todas as imagens disponíveis na coleção do ano foi utilizado no cálculo do índice.

Os valores do MNDWI foram reclassificados com base em limiares determinados empiricamente, por meio de validação visual com imagens de alta resolução disponíveis na plataforma *Google Earth*. Os polígonos resultantes foram vetorizados e integrados ao SIG no QGIS para posterior cálculo de área e sobreposição com outras variáveis (Figura 2). Os resultados foram organizados em uma base de dados multitemporal e posteriormente comparados com os mapeamentos do MapBiomias.

Figura 2 - Índice NMDWI referente ao ano de 2023 (A); Imagem reclassificada e shapefile extraído para o ano de 2023 (B).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre os dados do projeto MapBiomias e os obtidos via aplicação do índice MNDWI revelou discrepâncias consideráveis na delimitação da área do espelho d'água da Lagoa de Ibirité ao longo do período analisado (1985–2023). Essas diferenças foram especialmente evidentes nos anos de maior proliferação de macrófitas e acúmulo de sedimentos, como observado nas imagens mais recentes (Figura 3).

De maneira geral, o MapBiomias apresentou tendência à subestimação da área hídrica, principalmente nos anos mais recentes, em que a presença de vegetação flutuante e solo exposto nas margens alterou o padrão espectral da superfície aquática. Em 2023, por exemplo, a classificação do MapBiomias identificou uma área de aproximadamente 0,165 km², enquanto a delimitação via MNDWI apontou uma extensão superior, estimada em 1,32 km². Através da validação pelas imagens do *Google Earth*, é possível verificar que os dados provenientes da classificação são mais aderentes à realidade, comparados aos dados do Mapbiomias (Figura 4).

A Figura 5 ilustra visualmente essa divergência, mostrando o contorno extraído com base no MapBiomias e, sobreposto, o polígono obtido por MNDWI. Em anos como 2000 e 2010, quando a cobertura vegetal era menor e o nível da lagoa mais elevado, a concordância entre os métodos foi relativamente maior, com variações inferiores a 10%. Por outro lado, em anos marcados por estiagens severas e expansão urbana, como 2015 e 2023, a diferença entre os métodos ultrapassou 85%.

Figura 3. Comparativo de área mapeada do espelho d'água da Lagoa de Ibirité entre 1985 e 2023 segundo o índice MNDWI e Projeto Mapbiomas.

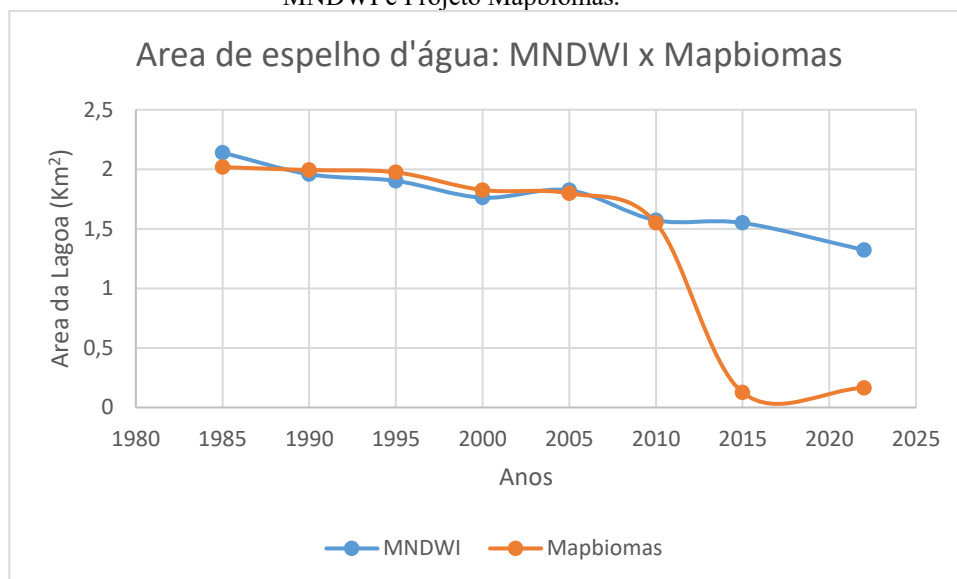
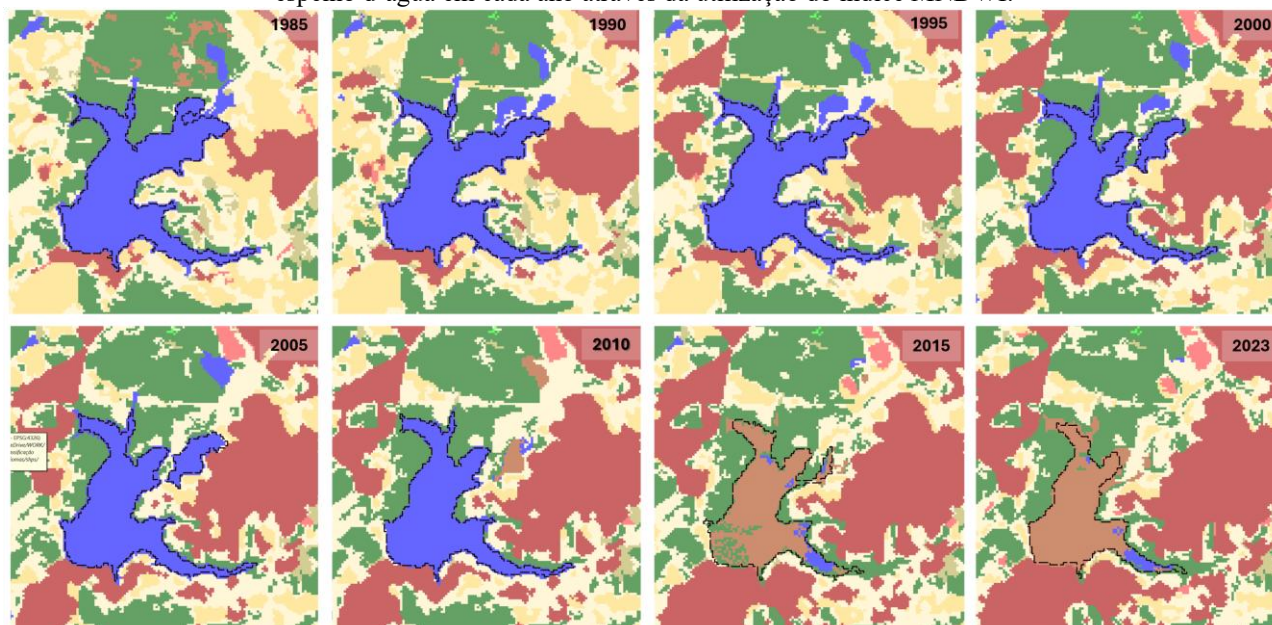


Figura 4. Validação das metodologias utilizadas através de uma imagem do Google Earth de 2023. Em vermelho o limite mapeado através do índice MNDWI e em azul o resultado do Mapbiomas.



Figura 5 – Ilustração das inconsistências dos produtos da classificação e cobertura e uso da terra do Mapbiomas para análise local do espelho d'água da Lagoa de Ibirité, entre 1985 e 2023. As linhas em preto representam a delimitação do espelho d'água em cada ano através da utilização do índice MNDWI.



Essas variações também refletem as limitações do MapBiomas na classificação de pequenas superfícies aquáticas em ambientes urbanos, onde pixels mistos e sombras urbanas interferem na precisão temática (Pizani; Macedo; Nóbrega, 2025; Souza *et al.*, 2020). Já o uso do MNDWI demonstrou maior capacidade de capturar a complexidade da paisagem aquática, mesmo em situações de vegetação flutuante ou cobertura parcial por sedimentos.

Os resultados obtidos revelam um padrão claro de retração do espelho d'água da Lagoa de Ibirité entre 1985 e 2023, especialmente a partir dos anos 2015. Essa tendência foi mais bem evidenciada quando se utilizou o índice MNDWI para a delimitação das áreas alagadas. A redução da superfície hídrica esteve acompanhada por um crescimento expressivo da malha urbana nas imediações da lagoa (Macedo *et al.*, 2025).

Estudos preliminares indicaram uma correlação inversa significativa ($r \approx -0,83$) entre a área mapeada como espelho d'água pelo MNDWI e a expansão das áreas urbanizadas (Macedo *et al.*, 2025). Esse padrão é coerente com o processo de assoreamento e avanço de vegetação flutuante sobre a lagoa, resultado do aumento da carga de sedimentos e nutrientes provenientes da urbanização desordenada, ausência de infraestrutura de drenagem e lançamento de esgoto não tratado — fenômenos amplamente relatados em ambientes urbanos tropicais (Callisto; Moreno; Macedo, 2019). Por outro lado, a classificação derivada do MapBiomas não apresentou a mesma sensibilidade para captar esse processo. Nos anos mais recentes (2015 e 2023), o MapBiomas indicou que as áreas do espelho foram classificadas como reflorestamento, sobretudo onde predominavam macrófitas e zonas parcialmente secas. Essa inconsistência compromete a possibilidade de inferir relações causais entre urbanização e degradação hídrica a partir dos dados do projeto, e reforça a necessidade de abordagens complementares baseadas em índices espectrais e validação local.

Esses achados demonstram a importância de se considerar as limitações dos produtos temáticos prontos para estudos aplicados à gestão de recursos hídricos, principalmente em sistemas antropizados. Neste sentido, a replicação dessa abordagem em outras bacias hidrográficas urbanas brasileiras poderá contribuir para o aprimoramento de políticas públicas voltadas à conservação de recursos hídricos e à mitigação dos impactos da urbanização sobre os sistemas aquáticos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo evidenciou a eficácia da aplicação do índice espectral MNDWI como ferramenta para a delimitação precisa do espelho d'água em reservatórios urbanos eutrofizados, com destaque para a Lagoa de Ibirité, na Região Metropolitana de Belo Horizonte. A análise comparativa com os dados do projeto MapBiomass demonstrou que, embora o projeto represente um importante avanço no monitoramento da cobertura da terra em escala nacional, sua capacidade de detectar corpos d'água em ambientes urbanizados é limitada, especialmente em situações de proliferação de macrófitas. Nessas situações, o MNDWI apresentou maior sensibilidade para distinguir entre água livre e áreas parcialmente cobertas por macrófitas ou sedimentos, refletindo mais fielmente as transformações físicas do reservatório.

Diante disso, recomenda-se a adoção de abordagens metodológicas personalizadas, que incorporem índices espectrais calibrados, como o MNDWI, ajustados a cada realidade ambiental. Especificamente, sugere-se que o projeto MapBiomass avalie a possibilidade de incorporar rotinas automatizadas de cálculo do MNDWI, com aplicação de limiares dinâmicos e checagem cruzada com NDVI, em sua cadeia de classificação de áreas úmidas e corpos d'água. Tal estratégia pode ser inicialmente aplicada a regiões urbanas e periurbanas, como estudo-piloto, com posterior avaliação da acurácia frente a dados validados localmente. A inclusão dessa metodologia aumentaria consideravelmente a confiabilidade dos dados em ambientes onde a presença de vegetação aquática e a interferência urbana são predominantes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do geógrafo MSc Igor José de Lima na elaboração do script no GEE. Este estudo conta com o apoio da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (R&D ANP/Petrobras), conforme Processo nº 2023/00452-0, e do Projeto Aquasmart (nº PT-200.20.00248). Os autores agradecem o apoio institucional da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

CALLISTO, M.; MORENO, P.; MACEDO, D. R. Biomonitoramento e pressões da urbanização: Uma abordagem integrada entre Ecologia e Geografia na bacia do rio das Velhas. **Revista Espinhaço**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 2–12, 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3345811>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. New Jersey, NJ: Prentice Hall, 2006.

LOPES, D. de S.; NÓBREGA, R. A. de A.; MACEDO, D. R. Towards a robust approach for multitemporal landcover dataset: 3 decades of landcover changes in Piauí, Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 74, n. 1, p. 197–213, 2 fev. 2022. <https://doi.org/10.14393/rbcv74n1-62751>.

MACEDO, D.; NOBREGA, R.; PIZANI, F.; REIS, A.; FERREIRA, H. Evaluating water surface loss in the Ibirité Lagoon Reservoir, Southeastern Brazil: impacts of land use changes over four decades. *In*: 2025

SOCIETY FOR FRESHWATER SCIENCE MEETING, 2025. **Proceedings of Society for Freshwater Science Meeting** [...]. San Juan: SFS, 2025.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996.

PIZANI, F.; MACEDO, D.; NÓBREGA, R. Análise da dinâmica espaço-temporal do espelho d'água da Lagoa de Ibirité, Minas Gerais, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. *In*: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2025. **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** [...]. Salvador: INPE, 2025.

SOUZA, C. M.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; G. FERREIRA, L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; DE OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; NETO, L. C. F.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth engine. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 27, n. 14, p. 3025–3033, 2006.