

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS ESPECTRAIS PARA AVALIAÇÃO DA TURBIDEZ NO RIO CACHOEIRA – BAHIA

João Gabriel de Moraes Pinheiro¹ ; André Luiz Nascentes Coelho²

Resumo: A turbidez é um dos parâmetros da qualidade da água que pode ser conceituada como uma medida para a interferência da luz causada por sólidos suspensos em meio aquoso, podendo ser a sua origem natural ou antrópica. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo a utilização do sensoriamento remoto para o cálculo do Índice de Turbidez por Diferença Normalizada (NDVI) para a identificação do acúmulo de sedimentos no rio Cachoeira, no sul do estado da Bahia. O NDVI é um índice que identifica a concentração de sedimentos nos corpos hídricos oriundos das atividades naturais e antropogênicas; em ambientes hídricos, espera-se que os valores do índice sejam negativos em função da presença de água pura. Para a identificação dos sedimentos, bem como dos indicativos de assoreamento, utilizou-se imagens do satélite Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia, com resolução de 10 metros na banda 4 – vermelho – e na banda 3 - verde. Por meio da determinação do NDTI, constatou-se que o trecho do rio Cachoeira presente no municípios de Itabuna (os mais populosos da bacia) apresenta níveis críticos de turbidez, nos quais a maioria da frequência do NDTI esteve concentrada no intervalo acima de zero, sendo este intervalo indicativo da presença de maiores níveis de turbidez.

Palavras-Chave: Assoreamento. Geoprocessamento. Bacias Hidrográficas.

Abstract: Turbidity is one of the parameters of water quality and can be defined as a measure of light interference caused by suspended solids in an aqueous environment, with either natural or anthropogenic origins. In this context, the present study aimed to use remote sensing to calculate the Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) to identify sediment accumulation in the Cachoeira River, located in the southern region of the state of Bahia, Brazil. The NDTI is an index that detects the concentration of sediments in water bodies resulting from natural and anthropogenic activities. In aquatic environments, the index values are expected to be negative due to the presence of pure water. To identify sediments and signs of siltation, Sentinel-2 satellite images from the European Space Agency were used, with a 10-meter resolution in band 4 – red – and band 3 – green. Through the determination of the NDTI, it was found that the stretch of the Cachoeira River located in the municipality of Itabuna (one of the most populous in the basin) shows critical levels of turbidity, where most NDTI frequency values were concentrated above zero—an interval indicative of higher turbidity levels.

Keywords: Siltation. Geoprocessing. Watersheds.

INTRODUÇÃO

A turbidez é um dos parâmetros da qualidade da água que pode ser conceituada como uma medida para a interferência da luz causada por sólidos suspensos em meio aquoso, podendo ser a sua origem natural ou antrópica. Como exemplo de aporte natural, incluem a erosão, e antrópico o lançamento de esgoto doméstico e efluentes industriais (Rocher *et al.*, 2023; Mapelli, 2025). A

1) Universidade Federal do Espírito Santos – UFES, Av. Fernando Ferrari, 514, fone, e-mail: alnucfes@gmail.com

2) Universidade Federal do Espírito Santos - UFES Av. Fernando Ferrari, 514, fone, e-mail: joao.g.pinheiro@edu.ufes.br

turbidez elevada indica que a transferência de luz está restrita, tendo como produto o impedimento o ciclo natural deste ecossistema. Em âmbito nacional, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) preconiza na Resolução 357 de 2005 que a turbidez para águas superficiais de classe 2 não pode ultrapassar o valor estabelecido de 100 NTU. Esse valor revela a quantidade máxima permitida de partículas em suspensão no corpo hídrico (CONAMA, 2005).

Por conseguinte, existe uma relação *sine qua non* entre a turbidez e os sólidos suspensos, haja vista que ao mensurar a turbidez de um ambiente aquático, é possível estabelecer uma relação qualitativa da concentração dos sólidos suspensos, portanto essa concentração demonstra-se como uma variável determinante para a quantificação da turbidez (Tomperi, 2022; Mapelli, 2025). A inexistência de zonas ripárias contribuem negativamente para a elevação dos níveis de turbidez da água. A ausência de vegetação ao longo das margens dos rios, facilitam o escoamento superficial da água, propiciando o aporte de sedimentos para o interior do corpo hídrico, em períodos chuvosos, esse é o principal fator responsável pela a elevação da turbidez.

Nos últimos anos, o advento das técnicas e produtos de sensoriamento remoto que estão baseados na reflectância da água através de imagens de satélite, têm-se demonstrado como uma metodologia eficiente e efetiva na qualidade da água e na avaliação da concentração de sedimentos. A análise dos sedimentos presentes na água, bem como a identificação da vegetação ripária de ambientes hídricos pelo sensoriamento remoto óptico permite a quantificação das características desses alvos pelo o uso de índices espectrais, sendo estes variáveis adimensionais advindos da reflectância espectral do elemento fazendo a utilização de composição de várias bandas espectrais (Araujo *et al.*, 2025).

Neste sentido, os índices espectrais são frutos de operações matemáticas entre os valores numéricos dos pixels das bandas de uma imagem através da composição de canais espectrais, sendo empregados para indicar a presença, condição e vigor do alvo analisado (Araujo *et al.*, 2025). O NDTI - *Normalized Difference Turbidity Index* (Índice de Turbidez por Diferença Normalizada) é essencial em estudos que avaliam turbidez em corpos hídricos. O índice varia de -1 a 1, sendo utilizado bandas espectrais no comprimento de onda do vermelho e do verde, sendo considerado que para águas claras, a reflectância é maior na banda verde, enquanto que para águas turvas, a reflectância é maior na banda do vermelho (Somvanshi *et al.*, 2011).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o Índice de Turbidez por Diferença Normalizada (NDTI) para a avaliação do aporte de sedimentos do Rio Cachoeira, localizado na região Sul da Bahia, sendo o principal curso d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, bem como identificar as áreas críticas aporte dos sedimentos e as fontes pontuais e difusas de poluição. Este estudo justifica-se pela capacidade do sensoriamento remoto aplicado a ambientes aquáticos de contribuir para o monitoramento e o planejamento ambiental, além de oferecer subsídios às práticas de conservação dos recursos hídricos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Características da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC) está localizada na região sul do estado da Bahia, possuindo uma extensão territorial de 4.288,69 km², com o seu curso principal apresentando 179 km de comprimento, sendo a foz da bacia no município de Ilhéus. A BHRC é limitada, ao norte, pelas bacias dos rios de Contas e Almada; ao sul, pelas bacias dos rios Pardo e Una; a leste, pela bacia do rio Pardo; e a oeste, pelo Oceano Atlântico. É formada por dez municípios: Ilhéus, Itabuna, Ibicaraí, Itapé, Jussari, Itaju do Colônia, Floresta Azul, Itororó, Itapetinga e Firmino Alves (Figura 1). De acordo com o Censo Demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano de 2022, os dez municípios abrangidos pela bacia possuem, ao todo, 403.539

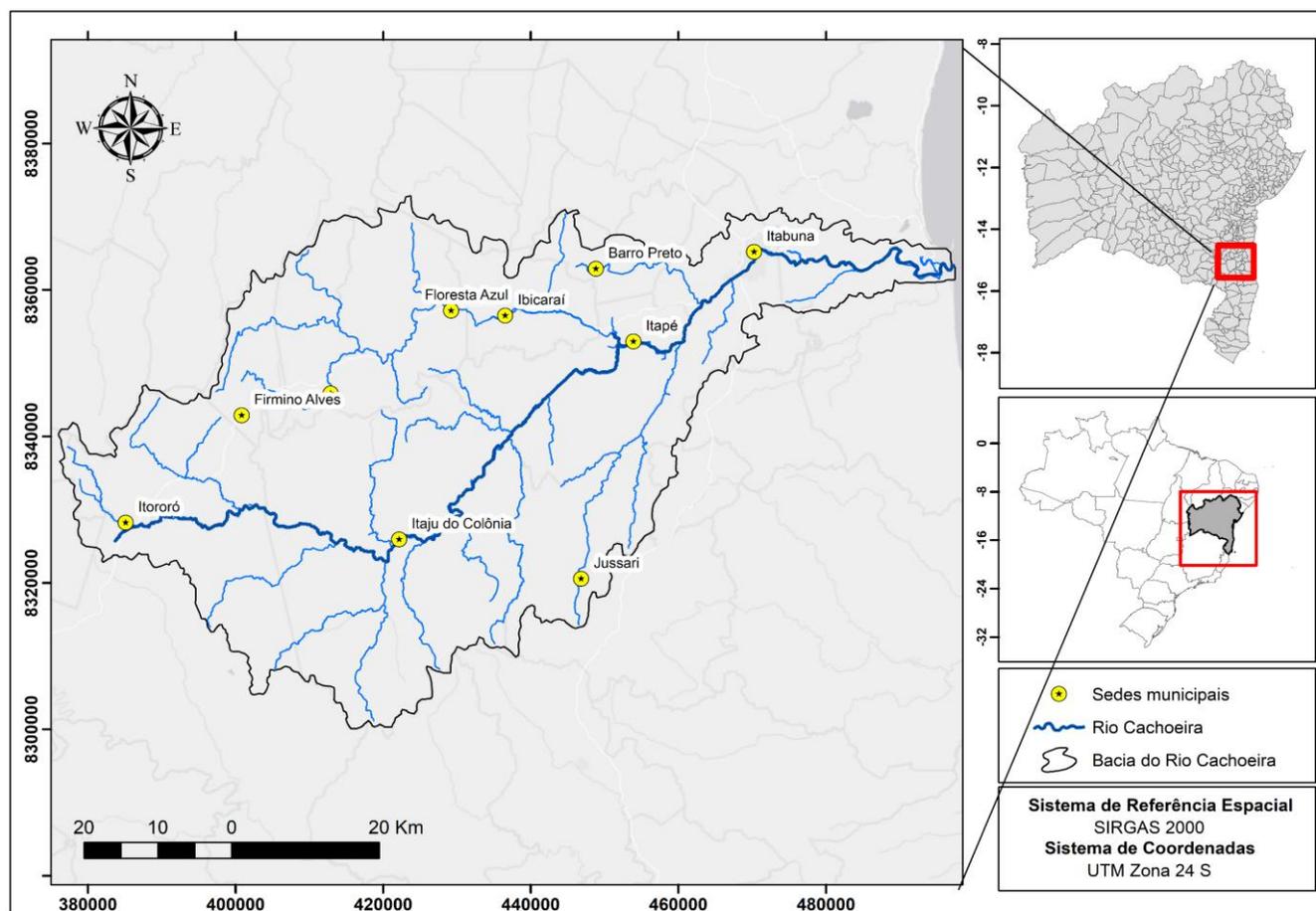
habitantes. No que se refere à gestão, a BHRC está inserida na Região de Planejamento e Gestão das Águas (RPGA) Leste (VII RPGA), instituída pela Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), conforme a Lei nº 11.612, de 2009.

Delimitação da bacia hidrográfica

Para a delimitação da bacia hidrográfica, utilizou-se como base o Modelo Digital de Elevação (MDE) do TOPODATA, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O MDE do TOPODATA possui resolução espacial de 30 metros, sendo seu acesso e obtenção gratuitos e instantâneos, disponíveis ao público por meio do sítio eletrônico: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>.

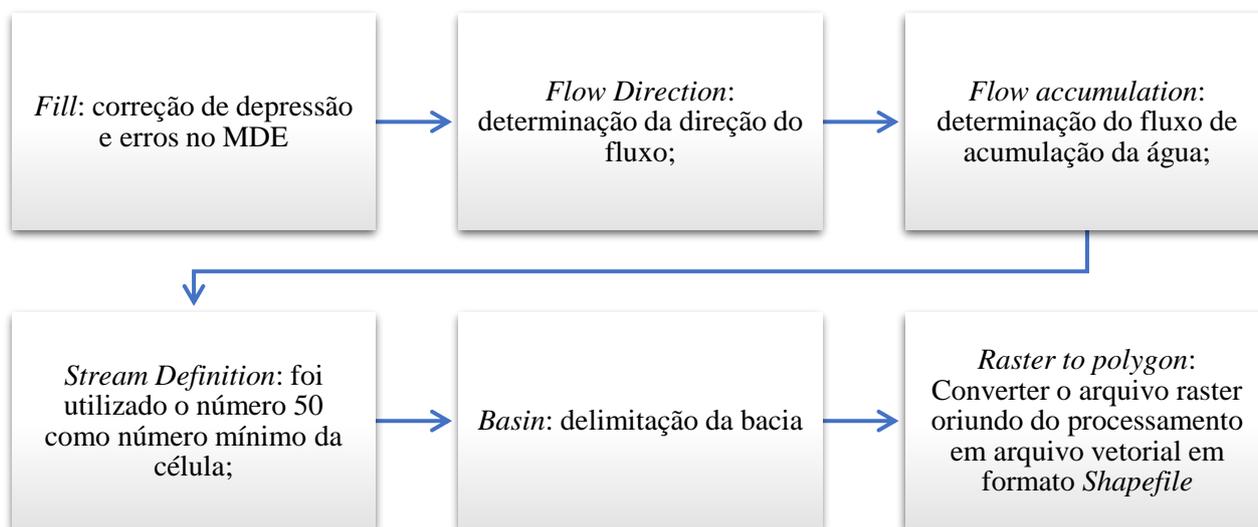
Todo o processo de delimitação foi realizado de forma automática, por meio da parametrização em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). O processamento e a (re)projeção espacial da imagem seguiram a metodologia proposta por Valeriano (2008). Para a delimitação da BHRC, utilizou-se a função de delimitação automática, por meio das ferramentas de hidrologia do *software* ArcMap 10.8. As ferramentas hidrológicas empregadas e suas respectivas funções seguiram a metodologia descrita por Di Luzio et al. (2002), conforme representado na Figura 2.

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - Bahia



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 2 – Síntese da metodologia de delimitação automática de bacias hidrográficas



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Determinação do NDTI

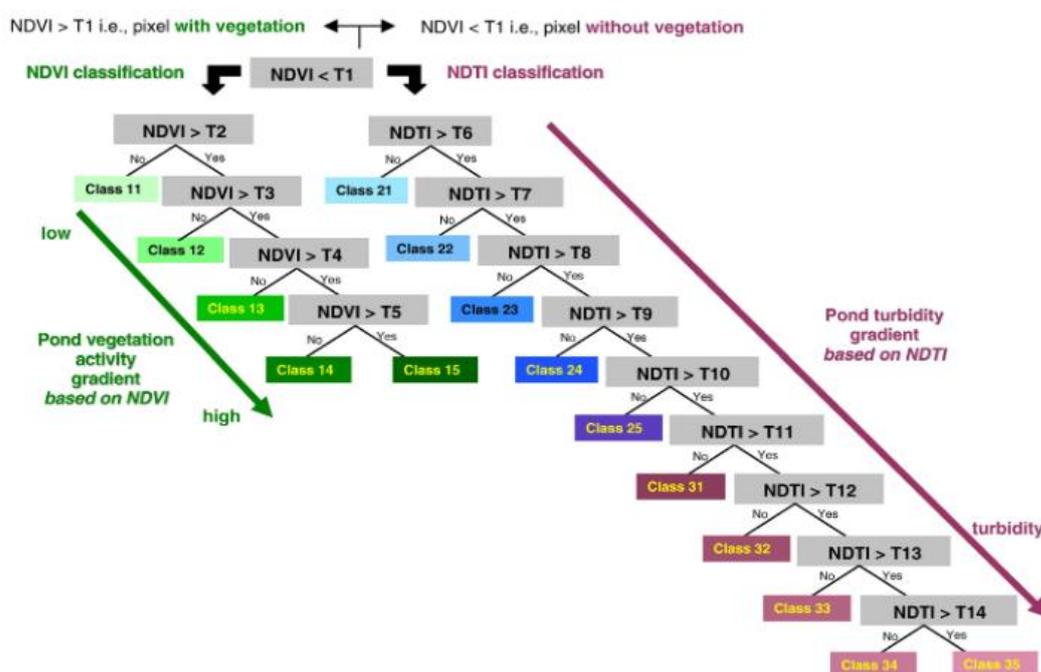
O *Normalized Difference Turbidity Index* (NDTI), foi calculado com o objetivo de identificar a presença da turbidez no rio Cachoeira. O cálculo foi realizado a partir das imagens do satélite Sentinel-2 da Agência Espacial Europeia (ESA), que possuem resolução espacial de 10 metros. As imagens são gratuitas e de acesso instantâneo e estão disponíveis no portal da ESA através do site *Copernicus Open Access Hub*, na qual foram utilizados como critérios de inclusão: i) cobertura de nuvens menor que 10%, ii) contemplar toda a área de estudo e iii) sensor SAR. Foram selecionadas imagens referentes ao período a partir de março de 2024, sendo este período com maior pluviosidade e com maior propensão ao aporte de sedimentos alóctones. Para o cálculo do NDTI, foram utilizadas as bandas 3 e 4, que são as bandas do espectro eletromagnético na faixa do verde (GREEN) e do vermelho (RED), respectivamente, na qual ambas foram captadas pelo sensor *Synthetic Aperture Satellite* (SAR) do Sentinel-2. Dessa forma, a determinação do NDTI segue a metodologia proposta por Lacaux *et al.* (2007). Na proposição dos autores, Lacaux *et al.* (2007) criaram uma árvore de decisão utilizada para a classificação de pixels dentro de lagoas, com base em dois parâmetros principais: o NDVI e o NDTI. Visualmente, a árvore é dividida em dois grandes eixos diagonais: a seta verde inclinada, que representa o gradiente de vegetação baseado em NDVI (à esquerda), e a seta bordô inclinada, que representa o gradiente de turbidez baseado em NDTI (à direita). Essa estrutura permite não apenas distinguir entre áreas vegetadas e não vegetadas dentro das lagoas, mas também avaliar a intensidade da vegetação ou da turbidez, oferecendo uma abordagem refinada e eficaz para o monitoramento ambiental de corpos hídricos temporários (Figura 3).

Abaixo, segue a equação utilizada para o cálculo do NDTI:

$$NDTI = \frac{\rho_{RED} - \rho_{GREEN}}{\rho_{RED} + \rho_{GREEN}} \quad \text{sendo,}$$

ρ_{RED} = Reflectância para a banda do vermelho e ρ_{GREEN} = Reflectância para a banda do verde. Os resultados do NDTI variam de -1 a 1, na qual os valores mais próximos de 1 representam áreas com maiores quantidades de sedimentos presentes na água, enquanto os valores mais próximos de -1 representam áreas com a presença de água pura. Por conseguinte, foi utilizada a álgebra de mapas, utilizando a calculadora raster do *software Quantum Gis (Qgis)* versão 3.32 para o cálculo do NDVI. Uma vez calculado, cada pixel gerado possuirá um valor de NDTI, este será sobreposto pelo *shapefile* de pontos de casos de arboviroses, na qual os valores do NDTI serão extraídos pela ferramenta *zonal statistics*.

Figura 3. árvore de decisão mostrada na Figura 4, usada para classificar pixels dentro de lagoas com base em vegetação (NDVI) e turbidez (NDTI):



Fonte: Lacaux *et al.* (2007).

Uma vez realizada a álgebra de mapas, tendo como produto o NDVI, foi feita a distinção das classes de água e macrófitas. Tal distinção foi realizada através da determinação de intervalos numéricos de NDVI que são denotativos da identificação das duas classes supracitadas, para isso foi utilizada a classificação de Lacaux *et al.* (2007) e Ogashawara (2021), na qual os intervalos de NDTI de 0,1 a 0,5 compreendem as classes macrófitas aquáticas flutuantes, submersas e esparsas (Tabela 1).

Tabela 1 – Interpretação do NDTI segundo os intervalos de frequência

Faixas do NDTI	Interpretação
-1,0 a 0,0	Água limpa (baixa turbidez)
0,0 a 0,1	Água com turbidez baixa a moderada
0,1 a 0,3	Água com turbidez moderada (sedimentos presentes)
$\geq 0,3$	Alta turbidez (concentração significativa de sedimentos ou matéria orgânica)

Fonte: elaborado pelos autores com base em Lacaux *et al.* (2007) e Ogashawara (2021).

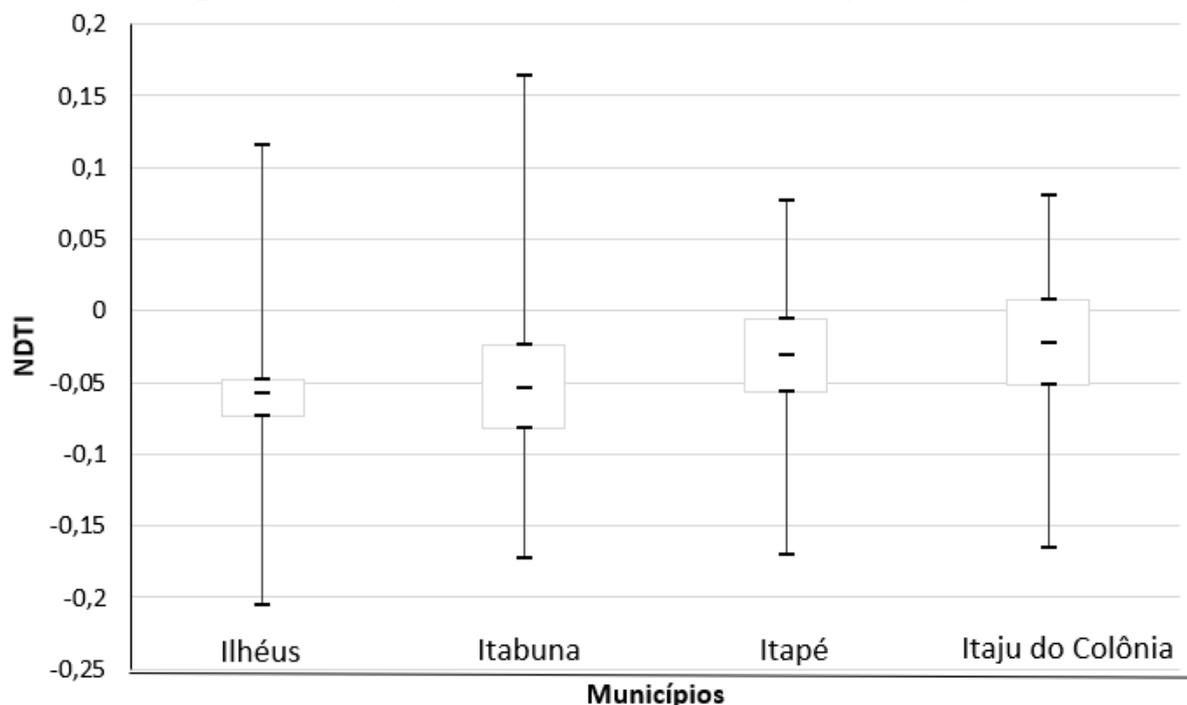
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos dez municípios contemplados pela BHRC, quatro são banhados pela drenagem principal do Rio Cachoeira, sendo eles: Itaju do Colônia, Itapé, Itabuna e Ilhéus, este último correspondendo à foz do rio. Ao determinar o NDTI no Rio Cachoeira, por meio das imagens do Sentinel-2, observou-se uma variação dos valores no intervalo de -0,20 a 0,16.

Na análise da Figura 4, percebe-se que, no município de Ilhéus, a mediana das amostras encontra-se ligeiramente negativa, observa-se que aproximadamente 75% dos valores estão abaixo de zero, sendo denotativo de que a água do rio esteve em condição de boa qualidade (baixa turbidez). A mediana do NDTI está em torno de -0,05, enquanto que os valores extremos negativos alcançam cerca de -0,20, indicando a presença de águas bastante puras. Apenas cerca de 25% dos valores amostrados superam o valor zero, representando períodos de turbidez mais elevada. O trecho do rio que passa pelo município de Ilhéus apresenta o perfil mais favorável em termos de qualidade da água em comparação com os outros quatro analisados.

O trecho do Rio Cachoeira situado no município de Itabuna, foi destacado a maior variabilidade entre os municípios analisados, com o intervalo interquartil possuindo valores tanto para faixa negativa quanto positivas. Estima-se que cerca de 40% a 50% dos dados estejam em faixa positiva, indicando maior frequência de águas com maior teor de sedimentos em relação aos demais. No que concerne à mediana, esta é levemente negativa (com valor de -0,05), o que ainda indica uma tendência predominante de água pura, mas a presença de valores máximos chegando a cerca de +0,17 denota que Itabuna enfrenta os maiores valores de turbidez registrados.

Figura 4 – Distribuição dos valores de NDTI do rio Cachoeira por municípios

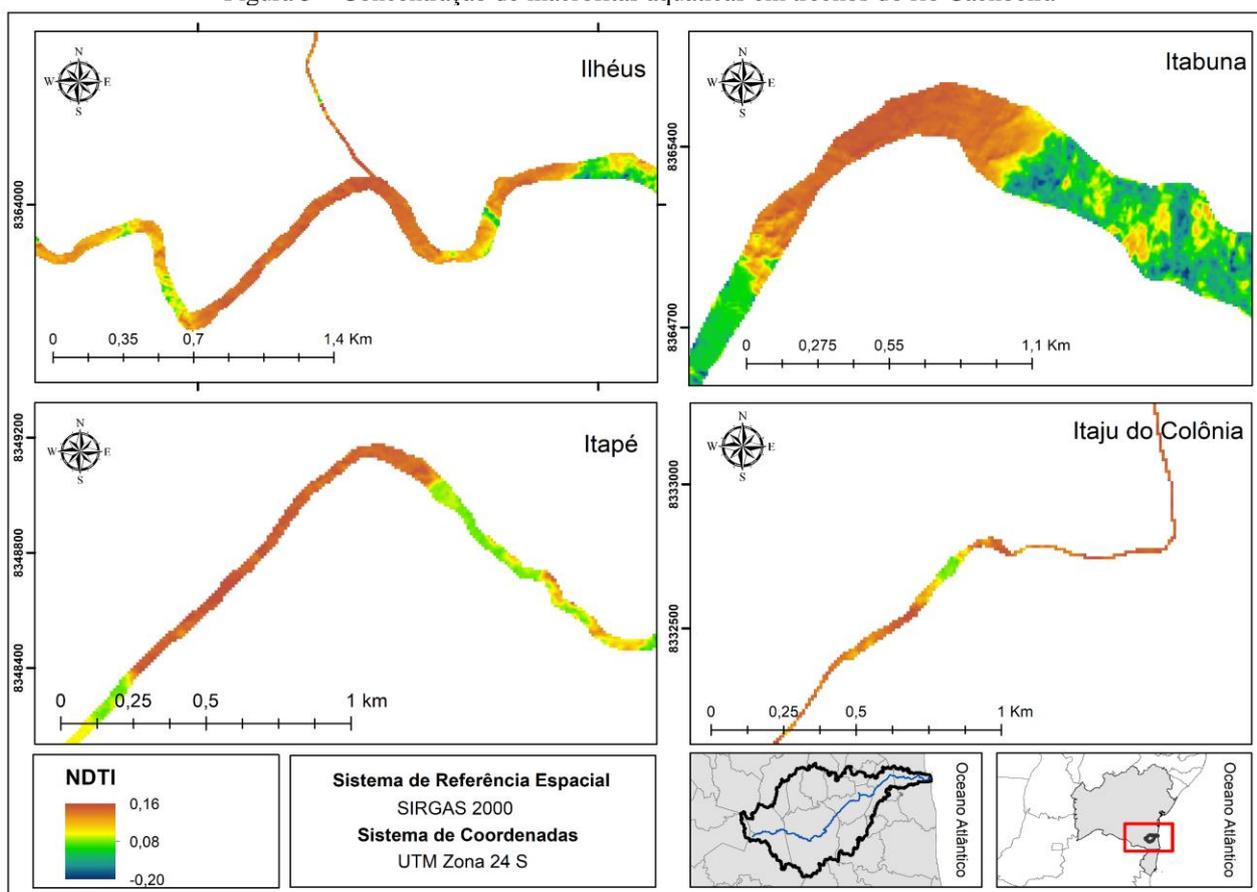


Fonte: elaborado pelos autores

No município de Itapé, a mediana também é negativa (correspondendo a -0,05), com aproximadamente 70% dos dados abaixo de zero, sugerindo boa qualidade da água na maior parte do

tempo. O município apresentou menor dispersão dos dados em relação a Itabuna, indicando condições mais estáveis. Apesar disso, valores máximos positivos alcançam aproximadamente +0,08, representando momentos de turbidez moderada. Em Itaju do Colônia a mediana do NDTI está muito próxima de zero, indicando um equilíbrio entre águas puras e turvas. Estima-se que cerca de 60% dos valores estejam abaixo de zero, e os valores máximos positivos chegam a cerca de +0,08. Isso revela uma situação intermediária, com níveis de turbidez ligeiramente mais frequentes que em Ilhéus ou Itapé, mas menos intensos que em Itabuna (Figura 5).

Figura 5 – Concentração de macrófitas aquáticas em trechos do rio Cachoeira



Fonte: elaborado pelos autores

Os altos níveis de turbidez está associado não somente à presença de sólidos suspensos, mas também ao processo de eutrofização dos corpos hídricos, este processo dificulta a entrada de luz solar na coluna de água. O processo de eutrofização está relacionado predominantemente ao aporte excessivo de nutrientes, como o nitrogênio e fósforo, que promove o intenso crescimento e desenvolvimento de macrófitas aquáticas e algas. A presença dessas espécies químicas na água do rio é devido a presença de matéria orgânica oriunda de atividades antropogênicas como o lançamento de esgoto doméstico, efluentes industriais e a lixiviação de fertilizantes químicos, bem como origem natural, devido a decomposição da matéria orgânica alóctone e autóctone (Santos *et al.*, 2024).

O parâmetro da turbidez exerce influência significativa na manutenção do ecossistema aquático, afetando diretamente os ciclos desse sistema. O uso dos sensores presentes nos satélites oferecem diversos benefícios em relação aos métodos tradicionais de medição de turbidez, bem como uma avanço metodológico para o levantamento hidrológico e de qualidade da água em escalas maiores (Lin *et al.*, 2023). No que concerne à saúde pública, a turbidez demonstra-se como um

indicador da presença de microrganismos patogênicos, sendo um dos parâmetros monitorados pelas Estações de Tratamento de Água (ETA) (Nakano *et al.*, 2022).

Figura 6 – Turbidez e amostra de água do rio Cachoeira em período chuvoso



Fonte: autores (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação do NDVI para o monitoramento das macrófitas aquáticas no rio Cachoeira revelou a presença de alguns pontos com uma concentração superior de sedimentos, ocasionados pelo lançamento de esgoto doméstico e efluentes industriais no corpo hídrico. No trecho do rio localizado no município de Itabuna, apresentou 50% dos dados de NDTI na faixa de valor positiva, indicando uma maior presença de águas turvas. O trecho do rio Cachoeira, no sentido da foz, no município de Ilhéus, apresentou um perfil mais favorável em termos de qualidade de turbidez comparado à Itabuna, em Ilhéus, apenas 25% das amostras tiveram valores superiores a zero. .

A utilização de ferramentas de geoprocessamento, bem como do sensoriamento remoto, demonstrou ser uma metodologia eficiente para subsidiar o monitoramento dos recursos hídricos. O controle e o monitoramento da poluição pontual e difusa são imprescindíveis para a recuperação da qualidade do rio Cachoeira e para a promoção de sua autodepuração. Dessa forma, os instrumentos de gestão preconizados na Política Nacional de Recursos Hídricos e na Política Estadual de Recursos Hídricos precisam ser implementados no âmbito da bacia hidrográfica, considerando-a como unidade de planejamento, sendo as ações e diretrizes voltadas à conservação validadas pelo comitê de bacias hidrográficas em todas as suas instâncias.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. et al. “*Aplicação do Índice de Turbidez de Diferença Normalizada (NDTI) Para Avaliação do Aporte de Sedimentos no Reservatório da Usina Hidrelétrica Marechal Mascarenhas de Moraes-Mg*”. *Geoambiente On-line*, n. 51, 2025.
- CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente. “*Resolução N° 357, de 17 de Março de 2005*”. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 2005. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em: 06 maio 2025.
- LACAUX, J. P. et al. “*Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal*”. *Remote sensing of environment*, v. 106, n. 1, p. 66-74, 2007.
- LIN, X. et al. “*Water turbidity dynamics using random forest in the Yangtze River Delta Region, China*”. *Science of the Total Environment*, v. 903, p. 166511, 2023.
- MAPELLI, L. R. “*Aplicação de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina na estimativa de turbidez de corpos hídricos*”. 2025. 53 f. Monografia. Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- NAKANO, N. M. et al. “*Saúde e meio ambiente: um estudo sobre a qualidade da água em um Assentamento Rural em Ribeirão Preto, SP*”. *Enfermagem Brasil*, v. 21, n. 6, p. 740-752, 2022.
- OGASHAWARA, I. “*Improving Remote Sensing Algorithms Towards Inland Water Cyanobacterial Assessment From Space*”. Indiana University-Purdue University Indianapolis, 2021.
- ROCHER, J. et al. “*Low-cost turbidity sensor to determine eutrophication in water bodies*”. *Sensors*, v. 23, n. 8, p. 3913, 2023.
- SANTOS, A. B. L. P. et al. “*Saneamento e Qualidade de Água: uma análise sob as perspectivas dos bairros incluídos no percurso do riacho das Piabas em Campina Grande – PB*”. *Revista Contemporânea*, v.4, n.1, 2024.
- SOMVANSI, S. et al. (2011). “*Water Turbidity Assessment in Part of Gomti River Using High Resolution Google Earth’s Quick-bird Satellite Data*”. *Dimensions and Directions of Geospatial Industry* (pp. 18–21). Geospatial WorldForum.
- TOMPERI, J. et al. “*Functionality of turbidity measurement under changing water quality and environmental conditions*”. *Environmental technology*, v. 43, n. 7, p. 1093-1101, 2022.
- VALERIANO, M. M. TOPODATA: “*Guia para Utilização de Dados Geomorfológicos Locais*”. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São Paulo: INPE, 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>. Acesso em: 25 abr. de 2025.