

ÍNDICE DE CLOROFILA POR DIFERENÇA NORMALIZADA EM AMBIENTE ESTUARINO: APLICAÇÕES NA BAÍA DO PONTAL – ILHÉUS, BAHIA

João Gabriel de Moraes Pinheiro¹

Bruno Sára Delmaschio²

André Luiz Nascentes Coelho³

RESUMO

Os estuários são ecossistemas com alta produtividade biológica, possuindo importantes funções socioambientais e que, devido à sua hidrodinâmica, são utilizados para diversas atividades ambientais, culturais e econômicas. Devido às pressões antropogênicas nesse ecossistema, a capacidade de dispersão e purificação de esgotos e efluentes é excedida, o que pode provocar a floração exagerada da clorofila-a (Chl-a), pigmento presente no fitoplâncton. A grande concentração desse elemento no corpo hídrico é indicativa de eutrofização, podendo comprometer a qualidade da água, a saúde individual e coletiva e os ecossistemas. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é analisar a aplicação do Índice de Clorofila por Diferença Normalizada (NDCI) por meio de técnicas de sensoriamento remoto no estuário da Baía do Pontal, no município de Ilhéus, no sul da Bahia, para identificar possíveis trechos com alta concentração de Chl-a e, a partir disso, determinar o seu nível trófico. O NDCI foi proposto por Mishra e Mishra (2012), no qual foram utilizadas bandas espectrais na faixa do vermelho e do infravermelho próximo do satélite Sentinel-2 para o cálculo do índice. Como resultados, identificou-se que 51,31% das amostras analisadas estiveram na faixa de NDCI de 0 a 0,1, possuindo concentração de 16–25 µg/L de Chl-a, sendo consideradas eutróficas, nas quais uma parte considerável da Baía do Pontal apresentou água com baixa transparência, ocorrendo alterações indesejáveis na qualidade da água.

Palavras-chave: Eutrofização; Qualidade da Água; Sensoriamento Remoto; Fitoplâncton.

INTRODUÇÃO

Os estuários são definidos como ambientes transicionais na interface entre continente e oceano, ocorrendo em diversas regiões do globo terrestre, sob diferentes tipologias climáticas e regimes de marés (Pereira *et al.*, 2010). Levando em consideração o aspecto hidrodinâmico, o estuário pode ser definido como um corpo hídrico costeiro com morfologia semifechada, possuindo uma conexão livre com o mar aberto, no qual existe um fator mensurável de diluição da água do mar com a água doce oriunda da drenagem continental (Perillo, 1995).

¹ Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, jgmpinheiro.bge@gmail.com;

² Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, brunosdelmaschio@gmail.com.

³ Professor orientador: Doutor em Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, alnc.ufes@gmail.com.

A degradação da qualidade da água em ecossistemas estuarinos configura-se como um desafio ambiental interdisciplinar. Esses impactos são impulsionados por atividades antropogênicas que ameaçam a integridade ambiental, os serviços ecossistêmicos e a saúde individual e coletiva (Stares *et al.*, 2025). Do ponto de vista da vulnerabilidade, os estuários são particularmente sensíveis devido ao seu caráter de transição, à sua hidrodinâmica complexa e por integrarem bacias hidrográficas com alta densidade populacional, com intensa atividade urbano-industrial e agropecuária (Rörig *et al.*, 2018).

O fitoplâncton configura-se como o grupo de produtores primários mais prolíficos do planeta, possuindo habitats em oceanos, lagos e estuários. De proporções microscópicas, o fitoplâncton possui relevância global, justamente por produzir cerca de metade do oxigênio respirável disponível na atmosfera. A clorofila- α (Chl-a) é um pigmento fotossintético de coloração verde, presente em todos os vegetais e bactérias fotoautotróficas. Esse pigmento é o principal responsável pela captura de luz, sendo essencial para a absorção dos raios solares necessários ao desenvolvimento da fotossíntese (Manuel; Blanco, 2023). A clorofila- α absorve a radiação eletromagnética nos comprimentos de onda do azul (440 nm) e do vermelho (próximo de 670 nm) do espectro eletromagnético, conferindo a coloração esverdeada característica de águas ricas em fitoplâncton (Matthews, 2017).

Devido à presença da Chl-a no fitoplâncton (incluindo algas e bactérias) e à sua forte correlação com a biomassa fitoplanctônica, esse pigmento é utilizado como *proxy* (indicador) da abundância de fitoplâncton em ecossistemas aquáticos naturais (Manuel; Blanco, 2023). Em razão de sua importância vital à comunidade aquática, a desestabilização do ambiente pode causar a floração desordenada de fitoplâncton, desencadeando o processo de eutrofização, caracterizado pelo crescimento exacerbado de algas e cianobactérias devido ao acúmulo de nutrientes como nitrogênio e fósforo, oriundos de atividades urbano-industriais e agropecuárias, que são aportados no corpo hídrico de maneira alóctone (Ferreira *et al.*, 2022). Dessa forma, a Chl-a é utilizada como um indicador do estado trófico do corpo hídrico, pois os valores medidos desse pigmento indicam o nível de floração do fitoplâncton e, consequentemente, o nível de eutrofização (Blanco *et al.*, 2020).

Destarte, a identificação de parâmetros bio-ópticos como a Chl-a pode ser realizada e mapeada por sensoriamento remoto, uma vez que este tem se demonstrado uma ferramenta eficiente para o mapeamento de constituintes opticamente ativos, superando as limitações espaciais e temporais das coletas in loco. Uma das formas de realizar essa análise é por meio da aplicação do *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI) – Índice de Clorofila por Diferença Normalizada, proposto por Mishra e Mishra (2012). O objetivo do presente trabalho é realizar a análise do estado trófico por meio da identificação da Chl-a, utilizando o NDCI no estuário da Baía do Pontal, no município de

Ilhéus, no sul do estado da Bahia. A pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender o estado trófico desse ecossistema estuarino, que sofre pressões antropogênicas devido aos seus diversos usos, e, a partir dessa identificação, indicar medidas de controle e monitoramento com vistas à estabilização das condições ecossistêmicas.

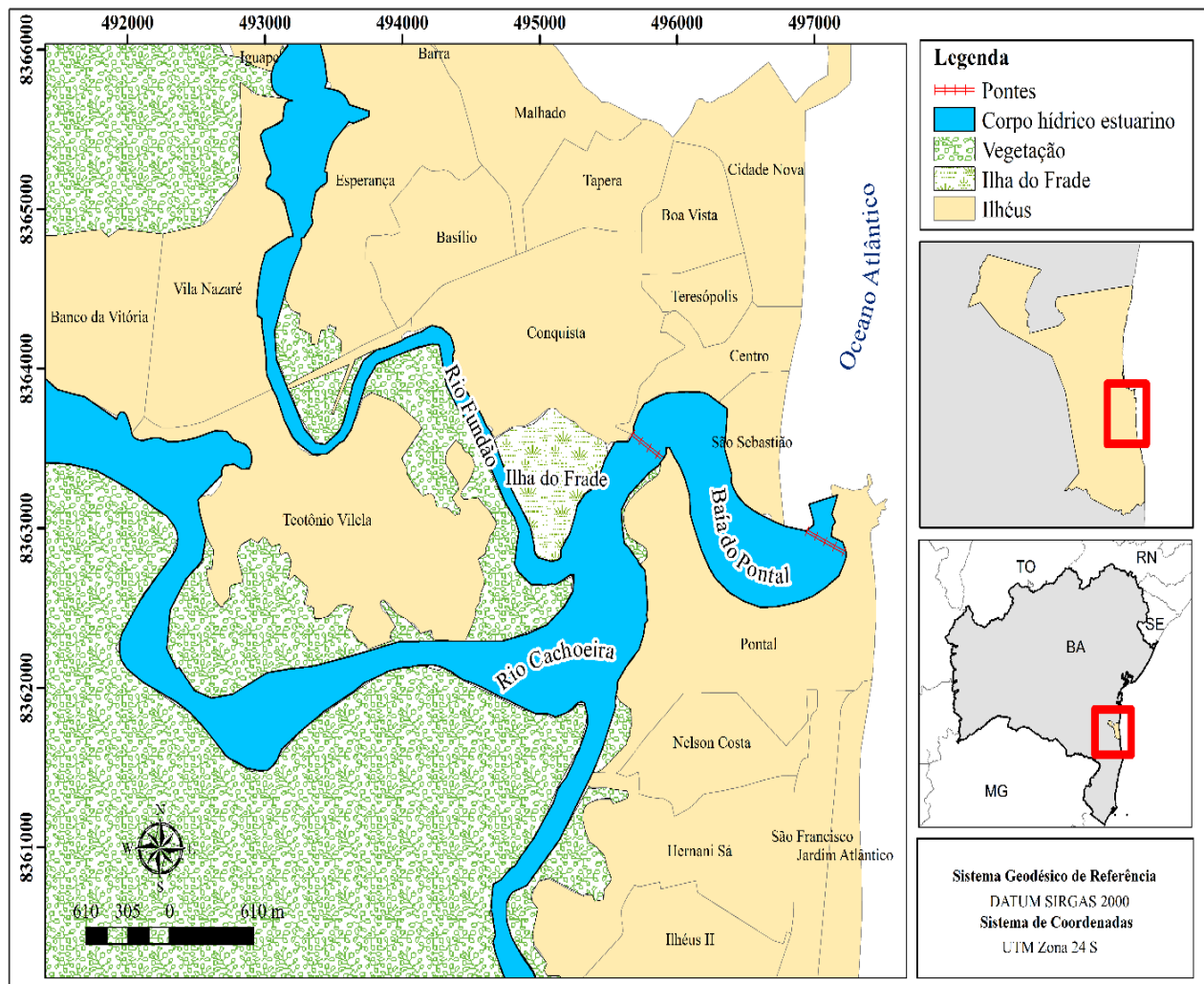
ÁREA DE ESTUDO

O município de Ilhéus está localizado na região intermediária de Ilhéus-Itabuna, no sul do estado da Bahia. O município possui uma área total de 1.588,556 km² e, de acordo com o Censo Demográfico realizado em 2022 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), possui 178.649 habitantes e uma densidade demográfica de 112,46 hab/km² (IBGE, 2022). A Baía do Pontal é um ecossistema estuarino localizado no bairro Pontal, em Ilhéus, e possui cerca de 16 km², apresentando uma altura média de maré de 1,8 metro (Figura 1).

Em termos de limites geográficos, a Baía do Pontal está limitada ao norte pela Avenida 2 de Julho, no centro da cidade, e ao sul pela Avenida Lomanto Júnior. No sentido oeste, estão presentes à Ilha do Frade e as fozes do Rio Cachoeira, Rio Itacanoeira e Rio Santana; e, a leste, é limitada pelo Morro de Pernambuco e pelo Oceano Atlântico (Silva, 2015).

No que concerne às características naturais, o município, assim como a Baía do Pontal, está inserido no bioma Mata Atlântica, especificamente na floresta ombrófila densa. Além disso, é predominante na área de estudo a presença de manguezais, que se configuram como um ecossistema costeiro lodoso, cujo desenvolvimento ocorre na interface entre ambientes terrestres e marinhos, sendo influenciado pelos regimes de marés (Schaffer-Novelli *et al.*, 2016). Em Ilhéus, as áreas mais representativas de manguezais estão próximas à zona urbana, às margens dos rios Almada, Cachoeira, Fundão e Santana, todos adjacentes à Baía do Pontal (Martins *et al.*, 2011).

Figura 1. Mapa de localização da Baía do Pontal, Ilhéus-Bahia.

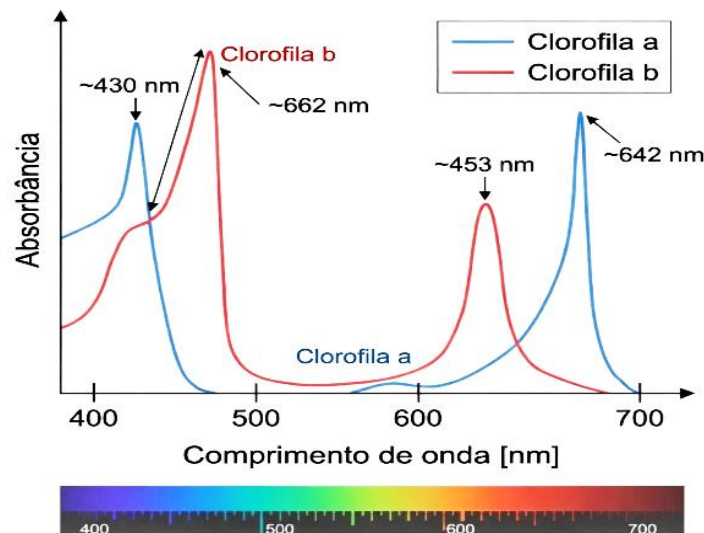


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para estimar o quantitativo de Chl-a e, consequentemente, o nível de eutrofização na Baía do Pontal pela floração exacerbada de fitoplâncton, utilizou-se o Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI). Esse índice, proposto por Mishra e Mishra (2012), está pautado na reflectância de duas regiões do espectro eletromagnético: uma com forte absorção pela clorofila (vermelho) e outra com menor influência (infravermelho próximo) (Figura 2).

Figura 2. Curvas de absorvância dos pigmentos de clorofila.



Fonte: Adaptado de Manuel; Blanco (2023).

Para o cálculo do NDCI, utilizaram-se as bandas do vermelho (665 nm) e do infravermelho próximo (842 nm), correspondendo às bandas 4 e 8, respectivamente, do satélite Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia (ESA), disponíveis de maneira gratuita e instantânea na plataforma Copernicus Open Access Hub. A equação executada para obtenção do NDCI, expressa por Stares et al. (2025), é representada por:

$$NDCI = \frac{R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2) + R_{rs}(\lambda_1)}$$

Em que R_{rs} representa a refletância de sensoriamento remoto nas respectivas bandas espectrais. O NDCI varia de -1 a 1 em áreas ausentes de cobertura de nuvens, nas quais os valores negativos indicam baixa concentração ou ausência de Chl-a, enquanto valores positivos indicam alta biomassa fitoplanctônica e, conseqüentemente, maiores concentrações de Chl-a. Dessa forma, tendo como base a absorção da clorofila e as características das bandas espectrais, espera-se que, nos trechos onde a água é opticamente clara, o valor de NDCI seja igual ou próximo a -1; de -0,3 até +1, a água possua biomassa algal de moderada a alta; e os trechos que estão entre 0,5 e 1,0 apresentem floração de algas, formando espuma superficial algal (camada visível na superfície da água).

Os valores de NDCI, a partir da análise da Baía do Pontal, foram convertidos em concentrações de clorofila-a, tendo como base os dados empíricos preconizados por Mishra e Mishra (2012), de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Valores de NDCI em relação à concentração de clorofila-a (Chl-a)

Faixa de NDCI	Faixa de Chl-a ($\mu\text{g/L}$)
$< -0,1$	$< 7,5$
$-0,1$ a 0	$7,5 - 16$
0 a $0,1$	$16 - 25$
$0,1$ a $0,2$	$25 - 33$
$0,2$ a $0,4$	$33 - 50$
$0,4$ a $0,5$	> 50
$0,5$ a 1	Floração severa

Fonte: Mishra e Mishra (2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, os valores de NDCI variaram de $-0,15$ a $0,5$ na Baía do Pontal. Por meio das análises a partir das imagens do Sentinel-2, foram identificados 25.176 pixels, cada um contendo um valor de NDCI; destes, 51,31% ($n = 12.919$) estão na faixa de 0 a $0,1$, o que corresponde à concentração de $16-25 \mu\text{g/L}$ de Chl-a. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), tendo como base o estudo de Lamparelli (2004), preconizou o Índice de Estado Trófico (IET), utilizando como parâmetros o fósforo total e a Chl-a, cujo resultado tem o objetivo de classificar o nível de trofia do corpo hídrico. Dessa forma, as classes de estado trófico variam de ultraoligotrófico (corpos hídricos com alto nível de limpeza) até hipereutrófico (corpos hídricos altamente comprometidos devido ao nível de nutrientes e matéria orgânica).

Nesse sentido, a maioria dos pixels que possuem NDCI na faixa de 0 a $0,1$, com concentração de $16-25 \mu\text{g/L}$ de Chl-a, é classificada como eutrófica, sendo esta caracterizada pela redução da transparência da água, afetada por atividades antropogênicas, ocorrendo alterações indesejáveis na qualidade da água. A segunda classe mais frequente de NDCI foi a de $-0,1$ a 0 , representando 46,72% (correspondendo a 11.763) dos pixels da Baía do Pontal, estando na faixa de $7,5-16 \mu\text{g/L}$, também sendo considerada como eutrófica.

A terceira classe de NDCI mais frequente foi a de $0,1$ a $0,2$, que correspondeu a 1,89% dos pixels analisados. Essa classe está contemplada na faixa de $25-33 \mu\text{g/L}$ de Chl-a, que, pelo IET, é considerada como supereutrófica. Essa classificação é caracterizada pela baixa transparência da água, com ocorrência de floração de algas devido ao aporte de nutrientes derivado das atividades antropogênicas, causando interferência nos usos múltiplos da água.

De maneira geral, as concentrações de Chl-a na Baía do Pontal estão localizadas em pontos específicos. A análise da estatística descritiva da Tabela 2 evidencia o predomínio dos valores mais baixos de NDCI, conforme mostrado pela média de 0,0095. A assimetria positiva de 1,40 identificada

na análise demonstra que a distribuição dos dados está à direita, indicando maior frequência de valores baixos. Todavia, a cauda da distribuição estende-se em direção aos valores mais altos, o que sugere que, embora exista o predomínio de valores mais baixos, há pontos com valores muito elevados que influenciam a média. Isso pode ser observado na diferença entre a média e a mediana, na qual a média tende a valores mais altos.

O NDCI na Baía do Pontal apresenta grande heterogeneidade, na qual existe a coexistência de valores próximos de zero, mas com ocorrências pontuais de valores mais elevados. Esse panorama é explicado pela curtose de 3,24, que indica uma distribuição platicúrtica, ou seja, os dados estão concentrados em torno da média, porém com a presença de valores mais altos com maior frequência.

Tabela 2. Estatística descritiva dos valores de NDCI

Estatística descritiva	NDCI
Média	0,009504441
Erro padrão	0,000192024
Mediana	0,00132567
Modo	0
Desvio padrão	0,03031853
Variância	0,000919213
Curtose	3,24
Assimetria	1,40
Intervalo	0,37
Mínimo	-0,15
Máximo	0,22

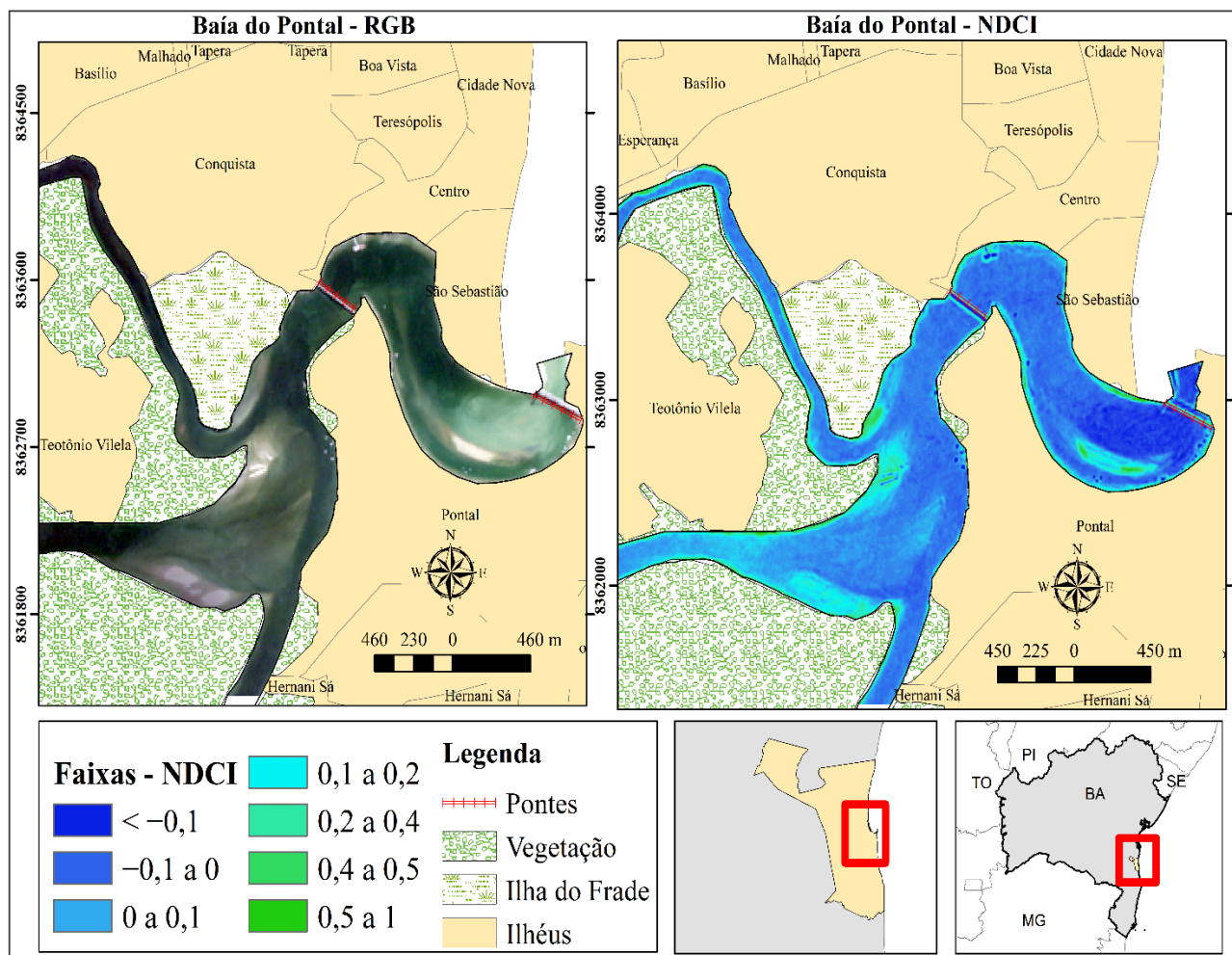
Fonte: autores (2026).

No rol de fenômenos que provocam a degradação ambiental de ambientes estuarinos, as florações de algas constituem uma problemática importante que afeta a qualidade da água. O crescimento exacerbado de espécies dominantes de fitoplâncton provoca danos ambientais justamente devido à perda de biodiversidade e à alteração nos ciclos biogeoquímicos. Esse fenômeno tem como consequência diversos impactos, como aumento de custos na saúde pública e no saneamento ambiental, impactos na pesca e desvalorização de áreas turísticas (Cabezudo *et al.*, 2025). Os efluentes de esgoto doméstico lançados nas bacias dos rios tributários e que chegam à Baía do Pontal, assim como a presença de espécies químicas oriundas desse lançamento, comprometem a qualidade da água da baía. O estudo de Silva (2015) evidenciou alterações na qualidade da água da Baía do Pontal devido à quantidade de matéria orgânica presente, favorecendo a escumação e o forte odor relatado pela população.

Na Figura 3, está representada a distribuição espacial do NDCI na Baía do Pontal. Os tons esverdeados indicam as áreas de concentração de Chl-a, sinalizando trechos da baía possivelmente

afetados pela eutrofização. A atividade microbiana aeróbica demanda grande quantidade de oxigênio dissolvido no corpo hídrico, o que provoca sua diminuição, levando à mortalidade de espécies aquáticas. Além disso, a decomposição da matéria orgânica aumenta ainda mais o consumo de oxigênio, criando um ambiente anóxico e elevando a demanda bioquímica de oxigênio.

Figura 3. Distribuição espacial do NDCI na Baía do Pontal, Ilhéus-Bahia



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A heterogeneidade espacial identificada nos dados de estatística descritiva da Baía do Pontal também foi observada no estudo de Laut et al. (2021), que, ao analisar a distribuição e concentração de elementos-traço e matéria orgânica na baía, identificou heterogeneidade espacial das variáveis ambientais e antropogênicas. No cenário estuarino da Baía do Pontal, onde a capacidade de dispersão e purificação de esgotos e efluentes é excedida, a qualidade da água e dos sedimentos pode ser comprometida devido ao acúmulo de nutrientes.

CONCLUSÕES

Através da aplicação de índices bio-ópticos como o NDCI no estuário da Baía do Pontal, evidenciou-se o panorama de floração e acúmulo de Chl-a. De todos os pixels analisados, 51,31% estão na faixa de 0 a 0,1, o que corresponde à concentração de 16–25 µg/L de Chl-a, que, de acordo com o IET, pode ser classificada como eutrófica. Destaca-se também uma parcela das amostras que estiveram na faixa de NDCI de 0,1 a 0,2, correspondendo a 25–33 µg/L de Chl-a, sendo classificada como supereutrófica. O panorama de análise dos dados evidenciou que a Baía do Pontal apresenta um padrão heterogêneo de concentração de Chl-a, no qual trechos da baía apresentam níveis de floração associados ao processo de eutrofização devido às atividades desenvolvidas nas áreas adjacentes.

Sendo assim, destaca-se o controle das fontes pontuais e difusas de poluição, bem como o manejo do uso e cobertura da terra nas áreas adjacentes à baía, visando reduzir o aporte de nutrientes. Destaca-se também a conservação das franjas de mangue presentes no entorno da baía e a recuperação das áreas de restinga e demais zonas ripárias como forma de conter os sedimentos e melhorar a qualidade da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santos (FAPES) pela concessão da bolsa que promoveu o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BLANCO, A. C. *et al.* Estimation of chl-a concentration in laguna lake using sentinel-3 olci images. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 17-21, 2020.
- CABEZUDO, M. M. *et al.* Assessment of spectral indices and water color combinations for detecting algal blooms in coastal subtropical shallow lakes. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, p. 101678, 2025.
- FERREIRA, L. D. S. *et al.* Concentração de Clorofila e Parâmetros Físico-Químicos para Avaliação de Níveis de Eutrofização do Rio Cereja Bragança-Pa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2153-2163, 2022.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 abr. 2026.
- LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia., 2004. 235 f. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2004.

- LAUT, L. *et al.* Indicadores geoquímicos e biodisponibilidade de elementos-traço em sedimentos do estuário do rio Cachoeira, Ilhéus-BA, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências–UFRJ**, v. 44, p. 35952, 2021.
- MANUEL, A.; BLANCO, A. C. Transformation of the normalized difference chlorophyll index to retrieve chlorophyll-a concentrations in Manila Bay. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 48, p. 217-221, 2023.
- MARTINS, P. T. A. *et al.* Fitossociologia e estrutura vegetal do Manguezal do rio Cururupe (Ilhéus, Bahia, Brasil). **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 11, n. 2, p. 163-169, 2011.
- MATTHEWS, M. W. Bio-optical modeling of phytoplankton chlorophyll-a. In: **Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters**. Elsevier, 2017. p. 157-188.
- MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 394-406, 2012.
- PEREIRA, M. D. *et al.* Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas (BA). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 3, p. 427-444, 2010.
- PERILLO, G. M. E. Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In: **Developments in sedimentology**. Elsevier, 1995. p. 17-47.
- RÖRIG, L. R. *et al.* Phytoplankton patterns and processes in a tropical-subtropical transition region: Santa Catarina Coast, Southern Brazil. **Plankton Ecology of the Southwestern Atlantic: From the Subtropical to the Subantarctic Realm**, p. 269-288, 2018.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *et al.* Climate changes in mangrove forests and salt marshes. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, n. spe2, p. 37-52, 2016.
- SILVA, E. B. Caracterização do ambiente no município de Ilhéus (BA): O caso da baía do pontal. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 1, p. 157-175, 2015.
- STARES, S. L. *et al.* High-resolution chlorophyll-a mapping in a subtropical coastal lagoon using UAS-derived normalized difference chlorophyll index (NDCI). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5678199> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5678199>, 2025.