

## TEMA VI – 744: ESTADO TRÓFICO DA ÁGUA DE GRANDES RESERVATÓRIOS BAIANOS PARA MÚLTIPLOS USOS

**Jorge Rosa dos Santos<sup>(1)</sup>**

Eng. Sanitarista e Ambiental - CETEC/UFRB, Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA/UFRB).

**Selma Cristina da Silva<sup>(2)</sup>**

Eng. Sanitarista e Ambiental. Pós Doutora em Saneamento, UFMG. Professora Associada do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA/UFRB).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** R. Rui Barbosa, 710 – Centro - Cruz das Almas/BA - CEP 44.380-00- Brasil - e-mail: [jorgerosa@aluno.ufrb.edu.br](mailto:jorgerosa@aluno.ufrb.edu.br)

### RESUMO

Nesse estudo, foi observada a variação dos Índices de Estado Trófico (IET) nos reservatórios de Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó, localizados no submédio e baixo da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Esses reservatórios, com destaque para Moxotó e Xingó, apresentaram casos recorrentes de eutrofização, provocando a proliferação excessiva de macrófitas aquáticas, cianobactérias e microalgas. O IET foi determinado considerando a concentração de clorofila-*a*, fósforo total e profundidade do disco de Secchi, usando as metodologias de cálculo e classificação de Carlson (1977) e Lamparelli (2004). Foram aplicados os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (KS) e Shapiro-Wilk (SW) para cada um dos quatro conjuntos de dados, com o objetivo de avaliar a distribuição dos dados de IET dos reservatórios. Para tanto, utilizou-se a série de dados de IET calculado a partir de 224 observações da qualidade da água no reservatório de Itaparica, 222 em Moxotó, 46 em Paulo Afonso IV e 92 em Xingó. Os resultados mostram que os reservatórios de Xingó e Moxotó foram mais impactados pela eutrofização, conforme a classificação de Carlson (1977), com, respectivamente, 55 (34%) e 13 (6%) casos de eutrofização. A classificação de Lamparelli (2004) evidenciou que, no reservatório de Xingó, não houve casos de hipereutrofização, situação mais crítica. No entanto, apresentou 49 (53%) casos de mesotrofização, 17 (19%) casos de eutrofização e 1 (1%) caso de supereutrofização. No reservatório de Moxotó, houve 59 (27%) casos de mesotrofização, 3 (1%) casos de eutrofização e 1 (1%) caso de supereutrofização. Os testes de KS e SW demonstram que, assim como diversos outros fenômenos da natureza, a distribuição dos dados de IET se aproxima de uma distribuição normal quando esse índice é calculado considerando a metodologia original proposta por Carlson (1977). Porém, se distancia de uma distribuição normal quando é utilizada a metodologia de Lamparelli (2004). Os autores Zhou et al. (2021) e Wang et al. (2018) comprovaram em seus trabalhos que a coloração da água medida pela Escala Forel-Ule (EFU) determinada por sensoriamento remoto possui uma correlação significativa com o IET. Dessa forma, é possível a construção de modelos preditivos e regressões capazes de explicar o IET em função das mudanças na EFU. Portanto, verificar a normalidade da distribuição dos dados é importante, pois facilita a aplicação de métodos estatísticos tradicionais, assegura a validade dos resultados e simplifica a construção e interpretação de modelos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eutrofização, Qualidade da Água, Algas e Cianobactérias.

### INTRODUÇÃO

Os ambientes aquáticos são os principais receptores de efluentes domésticos e industriais, e de escoamento superficial das áreas agrícolas e urbanas. Esses efluentes possuem em sua composição nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P), principais responsáveis pela eutrofização. Esse fenômeno causa problemas como: frequente floração de algas e cianobactérias que podem liberar toxinas nas águas; mortalidade de peixes e impactos na geração de energia elétrica e no abastecimento público de água (VON SPERLING, 2011).

Essas alterações da qualidade da água podem ser observadas por meio da transparência, concentração de clorofila-*a* e de fósforo total. A partir desses indicadores, observa-se o Índice do Estado Trófico (IET) da água, para se estabelecer medidas de controles do processo de eutrofização. O IET é geralmente dividido em três



categorias para lagos de climas temperados (CARLSON, 1977) ou 6 categorias para lagos e rios em climas tropicais (LAMPARELLI, 2004).

Os reservatórios de Itaparica, Moxotó e Paulo Afonso IV, vem sendo eutrofizado de forma recorrente. Em setembro de 2019, os casos de eutrofização nesses reservatórios foram alvos do Ministério Público Federal (MPF, 2019) e em 2023 outra investigação do MPF concluiu que a CHESF causou o surgimento de uma mancha escura de 25 km de extensão no Rio São Francisco ao realizar uma operação de redução do reservatório Delmiro Gouveia em 22/02/2015. Isso desencadeou um desequilíbrio ambiental, levando à proliferação de algas e cianobactérias, resultando na alteração da qualidade da água bruta do reservatório de Xingó (MPF, 2023).

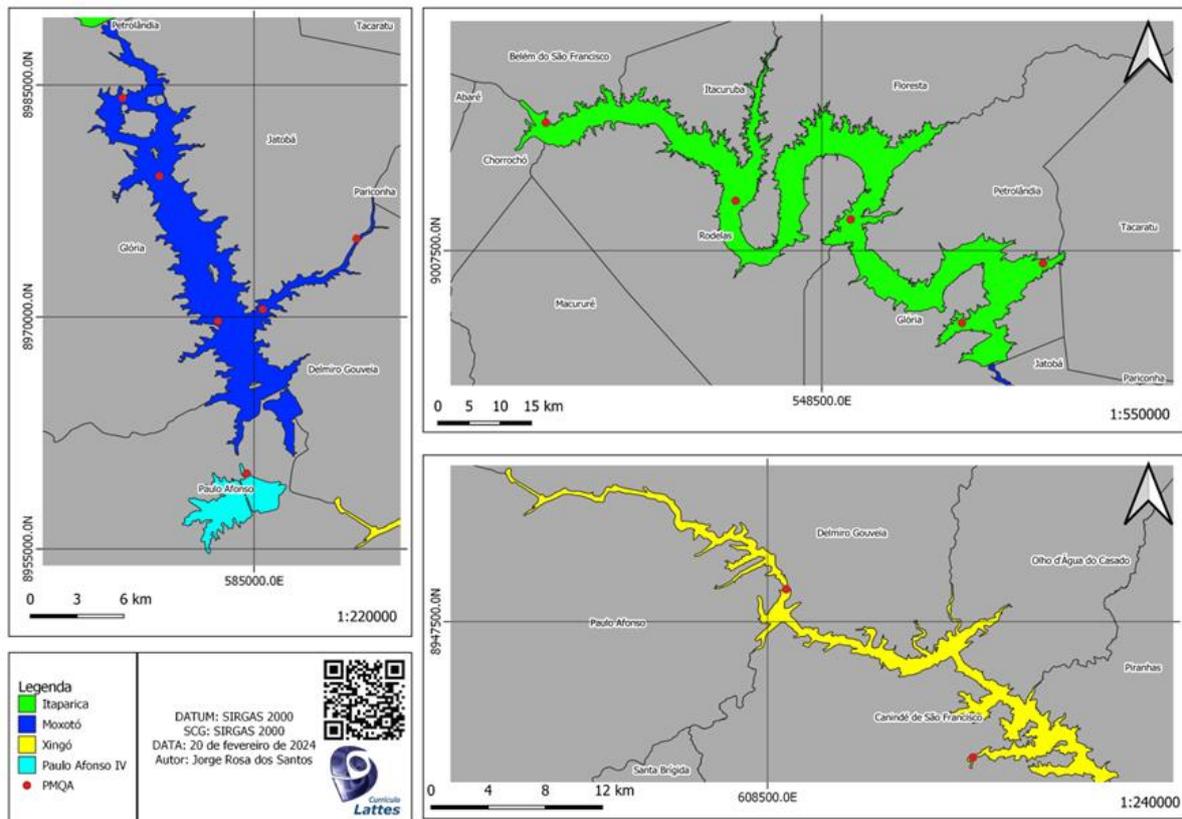
O monitoramento contínuo do IET dos reservatórios é fundamental para a detecção precoce de sinais de eutrofização, evitando desequilíbrios que podem impactar negativamente o uso da água. A observação antecipada do fenômeno contribui para uma tomada de decisão rápida para a eutrofização não evoluir (MPF, 2020; MPF, 2023). Além disso, o IET e análise da normalidade dos dados são utilizados para o desenvolvimento de modelos matemáticos que relacionam o IET com outras variáveis, entre elas, a coloração da água medida com base a paleta de cor da Escala Forel-Ule (ZHOU et al., 2021; WANG et al., 2018).

## OBJETIVO DO TRABALHO

Avaliar o estado trófico das águas dos reservatórios de Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso IV e Xingo a partir de dados secundários de qualidade da água usando a metodologias de Carlson (1997) e Lamparelli (2004), e usar os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para avaliar a distribuição normal dos dados utilizados.

## METODOLOGIA UTILIZADA

O IET será calculado com base duas metodologias, a de CARLSON (1977) e Lamparelli (2004), utilizando os parâmetros: fósforo total (P) em  $\mu\text{g/L}$ ; clorofila-*a* (C<sub>la</sub>), em  $\mu\text{g/L}$  e Profundidade do disco de Secchi (S), em m. Os dados de qualidade da água foram adquiridos do Programa de Monitoramento da CHESF para o período de outubro/2018 a setembro/2021, considerando 13 Pontos de Monitoramento da Qualidade da Água (PMQA), 5 no reservatório de Itaparica, cinco no reservatório de Moxotó, um no reservatório de Paulo Afonso IV e dois no reservatório de Xingó (**Figura 1**).



**Figura 1 – PMQA Considerados**

**Fonte: Próprio autor (2024)**

A metodologia de CARLSON, 1977 utiliza a **Equação 1** para o cálculo do IET em função do P, a **Equação 2** em função da Cla e a **Equação 3** em função de S.

$$IET (PT) = 10 \times \left( 6 - \left( \frac{\ln(48)}{\ln(2)} \right) \right) \quad \text{Equação 1}$$

$$IET (Cla) = 10 \times \left( 6 - \left( \frac{(2,04 - 0,68 \times \ln(Cla))}{\ln(2)} \right) \right) \quad \text{Equação 2}$$

$$IET (S) = 10 \times \left( 6 - \left( \frac{\ln(S)}{\ln(2)} \right) \right) \quad \text{Equação 3}$$

O IET ponderado proposto por CARLSON (1977) é classificado conforme mostra a **Figura 2**.

### OLIGOTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $\leq 40$  .

### MESOTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $40 < IET \leq 55$

### EUTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $IET \geq 55$

**Figura 2** - Classificação do IET  
**Fonte:** adaptado de Carlson (1977)

A metodologia de LAMPARELLI (2004) calcula o IET para ambientes lênticos utilizando a **Equação 4** e **Equação 5**, para o IET(S) é mantida a **Equação 3** de Carlson (1977).

$$IET(P) = 10 \times \left( 6 - \left( \frac{1,77 - 0,42 \times \ln(P)}{\ln(2)} \right) \right) \quad \text{Equação 4}$$

$$IET(Cla) = 10 \times \left( 6 - \left( \frac{0,92 - 0,34 \times \ln(Cla)}{\ln(2)} \right) \right) \quad \text{Equação 5}$$

A **Figura 3** mostra a classificação do IET ponderado proposta por Lamparelli (2004).

### ULTRAOLIGOTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $\leq 47$ .

### OLIGOTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $47 < IET \leq 52$

### MESOTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $52 < IET \leq 59$

### EUTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $59 < IET \leq 63$

### SUPEREUTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $63 < IET \leq 67$

### HIPEREUTRÓFICO

- Média dos valores de IET(P), IET (Cla) e IET(S) deve ser  $67 < IET$

**Figura 1** - Classificação do IET  
**Fonte:** adaptado de LAMPARELLI (2004)

Foi realizada a estatística descritiva e aplicado os testes Kolmogorov-Smirnov (KS) e Shapiro-Wilk (SW), utilizando o software Jamovi 2.3.28, a fim de verificar se os dados de IET se aproximam de uma distribuição normal e se a metodologia utilizada para o cálculo do IET influencia nos resultados.

Os testes de Normalidade foram realizados com grau de confiança de 95%, ou seja, nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Esses testes fornecem o parâmetro valor de prova (valor-p), a regra de decisão adotada para saber se a distribuição é ou não normal: se  $\text{valor-p} \leq \alpha$ , não se pode admitir que o conjunto de dados em questão tenha distribuição normal; se  $\text{valor-p} > \alpha$ , a distribuição normal é uma distribuição possível para o conjunto de dados em questão.

O teste de Kolmogorov-Smirnov é mais adequado para amostras de tamanho moderado a grande, enquanto o teste de Shapiro-Wilk é geralmente preferido para amostras pequenas (até cerca de 50 observações). Porém, não existe consenso na literatura sobre o tamanho das amostras, ou seja, número de observações limites para a aplicação de cada um dos testes.

## RESULTADOS

A **Tabela 1** mostra a estatísticas descritiva da série de dados do IET individualizada por reservatórios.

**Tabela 1** – Estatísticas Descritiva para cada Reservatório objeto de estudo.

	Reservatório	N	Média	Desvio-P	Mínimo	Máximo
CARLSON (1977)	Itaparica	224	44,8	3,81	33,1	56,0
	Moxotó	222	47,3	4,66	36,4	63,8
	Paulo Afonso IV	46	45,6	3,36	36,4	53,6
	Xingó	92	51,6	6,40	35,8	62,3
LAMPARELLI (2004)	Itaparica	224	47,8	2,83	40,2	61,2
	Moxotó	222	50,4	3,70	42,4	62,2
	Paulo Afonso IV	46	48,6	2,23	43,5	54,0
	Xingó	92	54,2	5,18	43,1	63,2

Fonte: Próprio autor (2024)

A **Tabela 2** apresenta os valores-p para o conjunto de dados de IET de cada um dos reservatórios. Para os reservatórios de Itaparica, Moxotó e Xingó será considerado o teste KS, visto que esses possuem número de observações (N) maior que 50. Para o reservatório de Paulo Afonso IV, será considerado o teste SW.

**Tabela 2** – Estatísticas Descritiva dos dados por PMQA dos reservatórios objetos de estudo

	ITAPARICA		MOXOTÓ		PAULO AFONSO IV		XINGÓ	
CARLSON (1977)	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS
	0,133	0,699	0,310	0,677	0,372	0,818	<0,001	0,178
LAMPARELLI (2004)	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS
	<0,001	0,151	<0,001	0,014	0,295	0,466	0,001	0,323

Fonte: Próprio autor (2024)

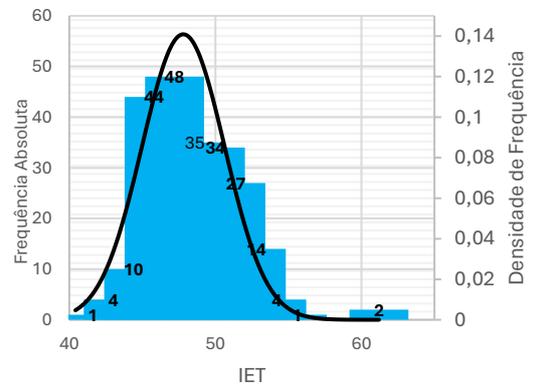
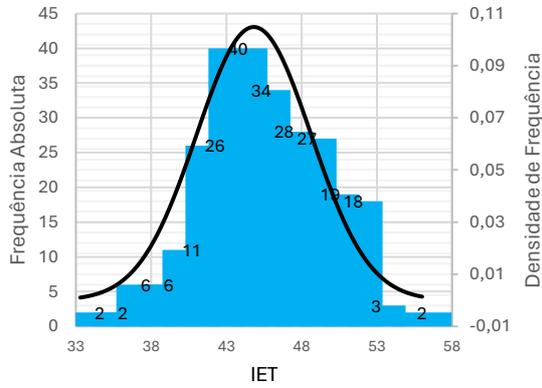
A fim de complementar os resultados dos testes de normalidade apresentados na **Tabela 2**, a **Figura 4** apresenta o histograma da frequência absoluta (Barra em azul) e densidade de frequência relativa (linha) dos dados de IET por reservatório.



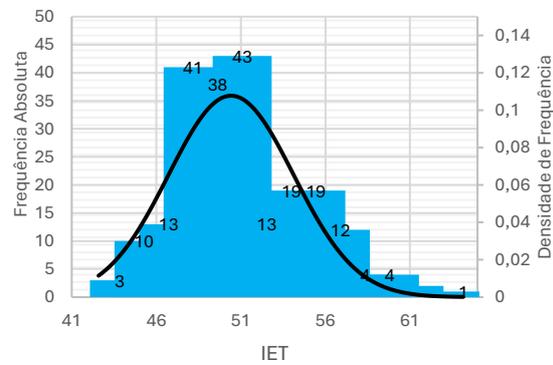
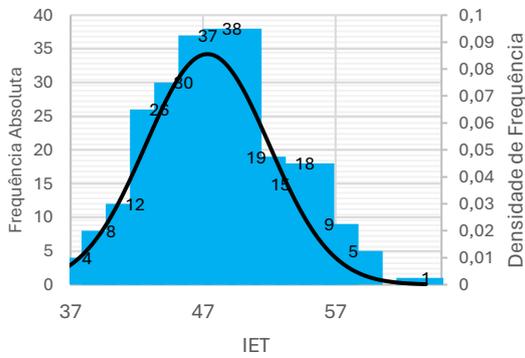
**CARLSON (1977)**

**LAMPARELLI (2004)**

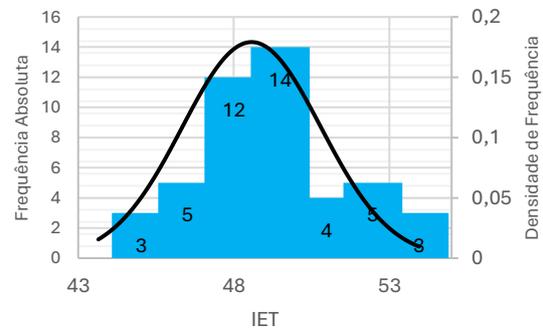
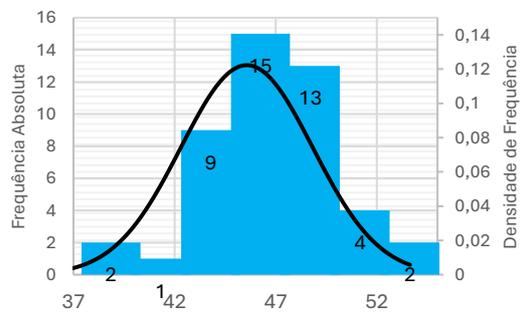
**Itaparica**



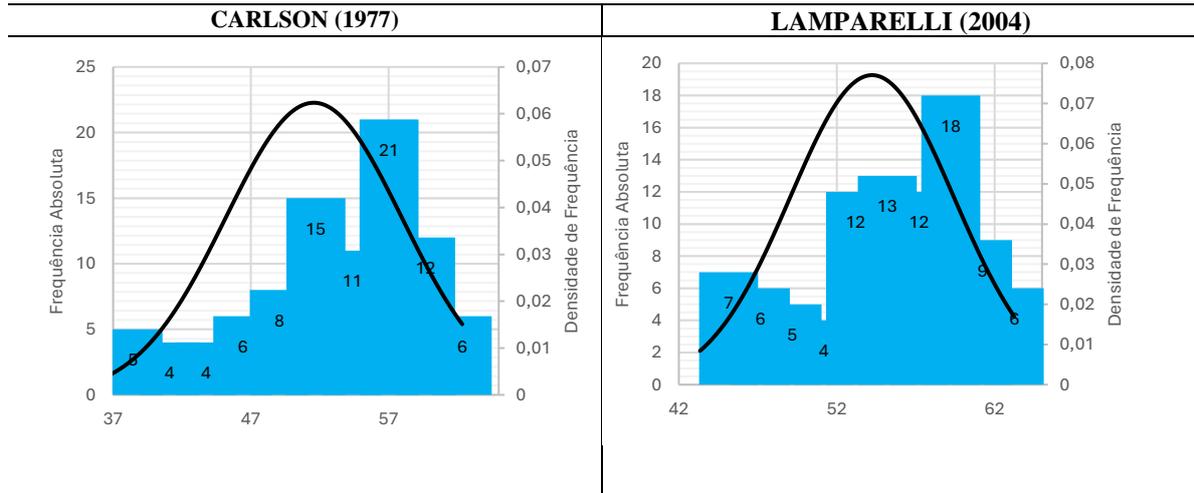
**Moxotó**



**Paulo Afonso IV**



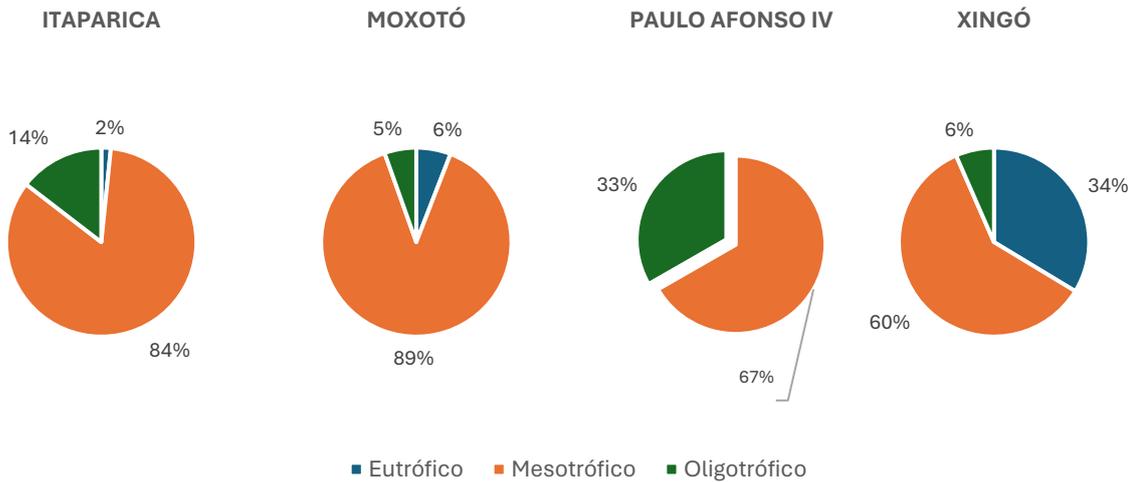
**Xingó**



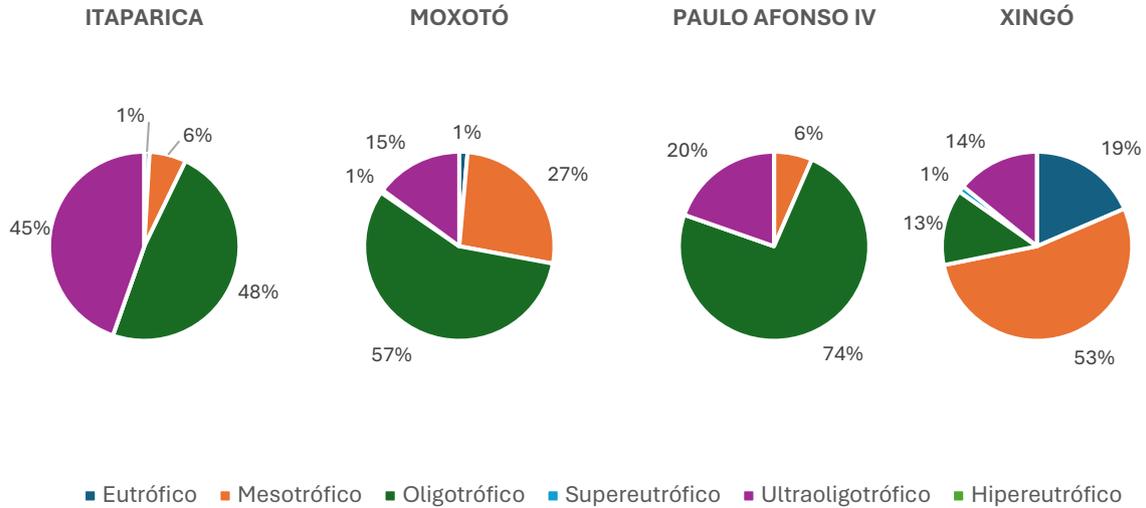
**Figura 4 - Histograma dados de IET por Reservatório**  
**Fonte: Próprio autor (2024)**

A **Figura 5** mostra a classificação do estado trófico de cada um dos reservatórios, usando a metodologia de Carlson (1977) e Lamparelli (2004). Das 124 observações realizadas no reservatório de Itaparica, apenas duas (2%) demonstram que o reservatório estava eutrofizado, o reservatório de Moxotó apresentou 13 (6%) casos de eutrofização para 222 observações e o reservatório de Xingó apresentou 55 (34%) caso de eutrofização. Não foram observados casos de eutrofização no reservatório de Paulo Afonso IV.

**CLASSIFICAÇÃO DO IET SEGUNDO CARLSON (1997)**



**CLASSIFICAÇÃO DO IET SEGUNDO LAMPARELLI (2004)**

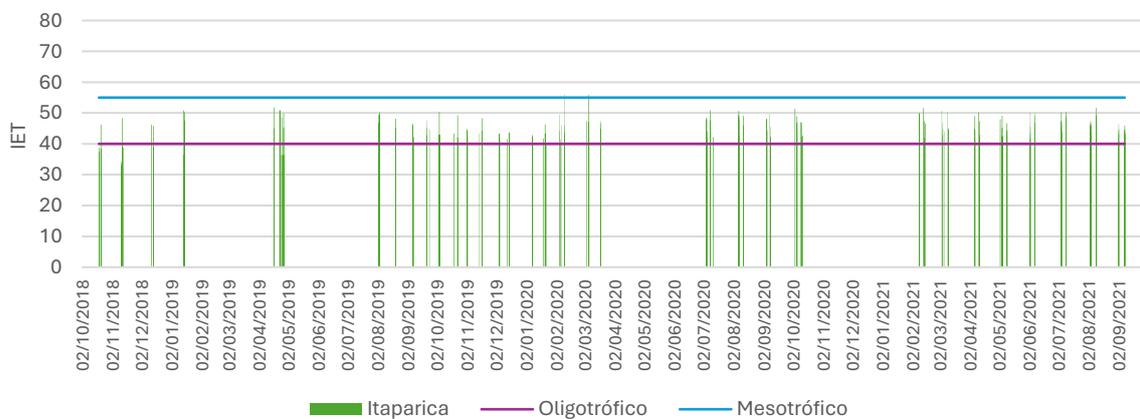


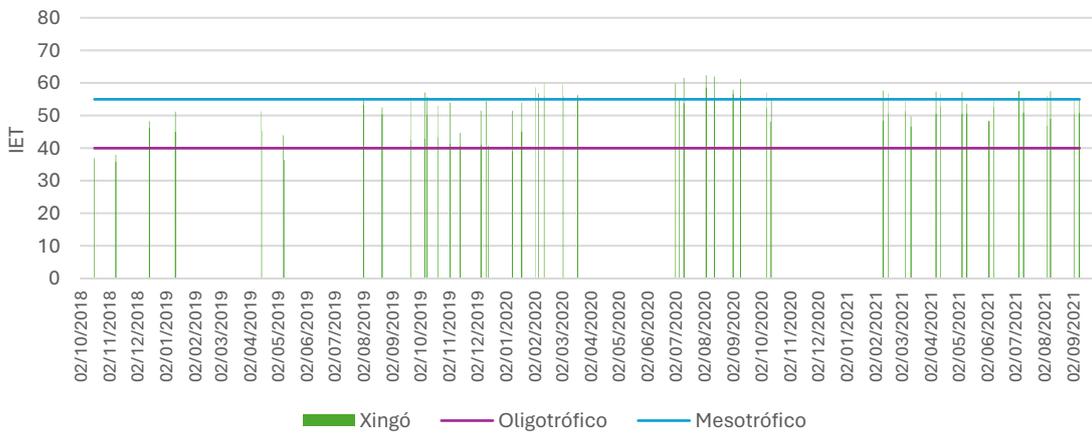
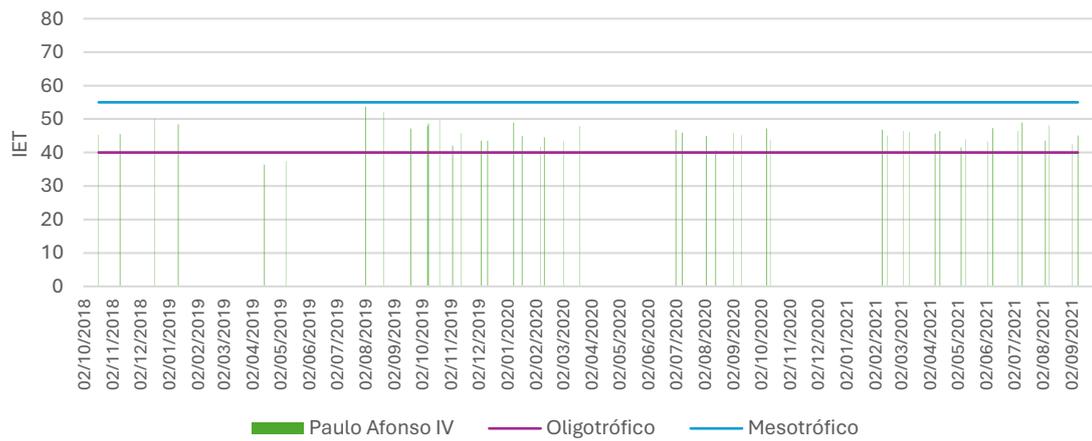
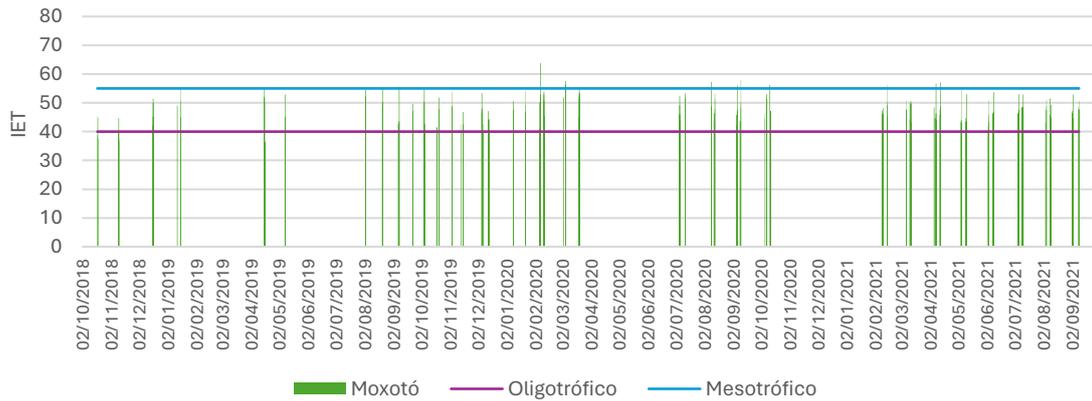
**Figura 5** – Frequências de Classificação do IET

A **Figura 5** mostra ainda a classificação do IET segundo Lamparelli (2004), na qual é possível observar que não houve casos de Hipereutrofização nos reservatórios. Porém o reservatório de Xingó apresentou, 49 (53%) casos de mesotrofização, 17 (19%) casos de eutrofização e 1 (1%) caso de Supereutrofização. O reservatório de Moxotó apresentou 59 (27%) casos de mesotrofização, 3 (1%) casos de eutrofização e um (1%) caso de Supereutrofização.

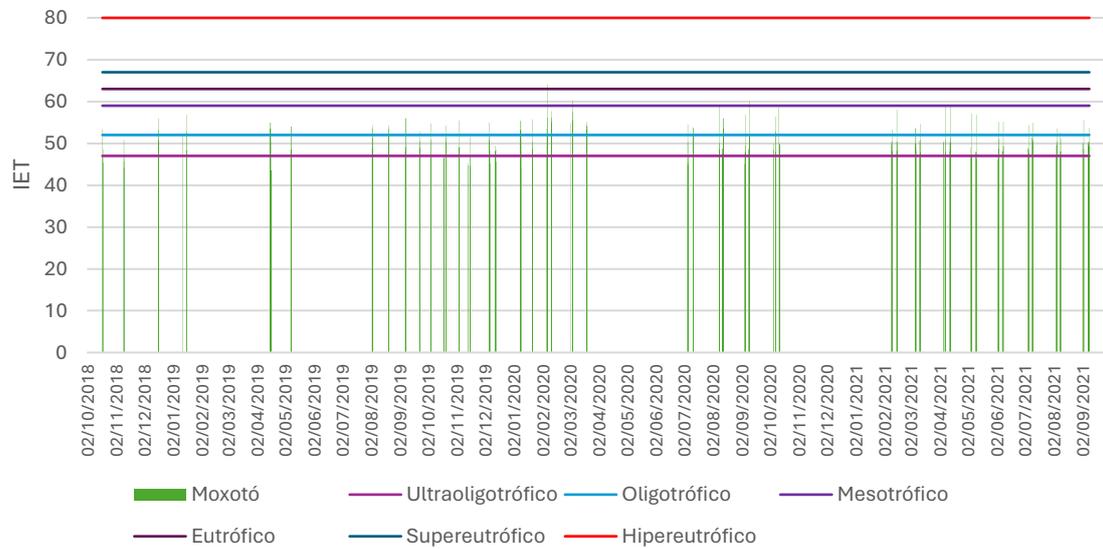
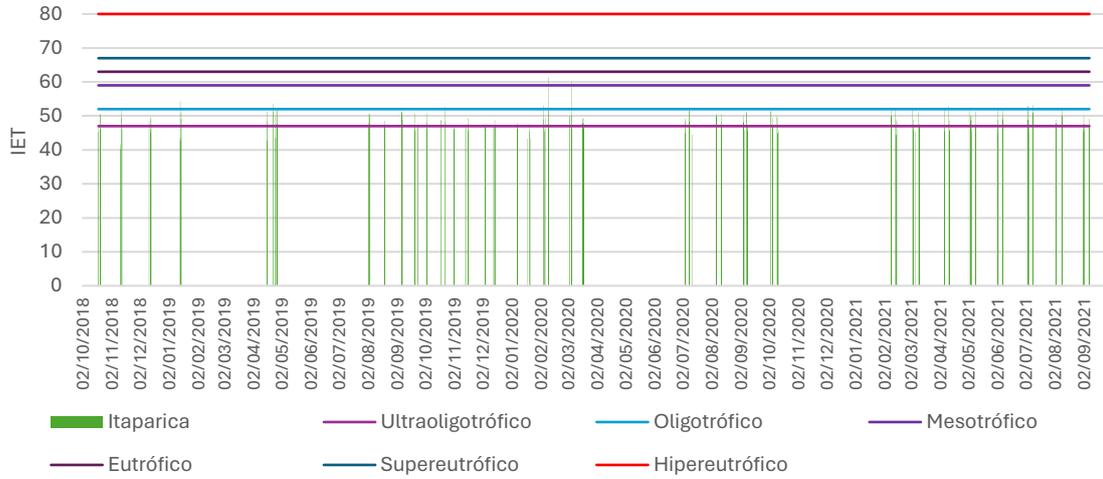
A **Figura 6** apresenta dados de IET observados durante o período do monitoramento, individualizados por reservatórios. Os maiores valores de IET para os reservatórios de Itaparica e Moxotó foram observados nos meses de fevereiro e março de 2020 e para o reservatório de Xingó em agosto e setembro 2020.

**CLASSIFICAÇÃO DO IET SEGUNDO CARLSON (1997)**





**CLASSIFICAÇÃO DO IET SEGUNDO LAMPARELLI (2004)**



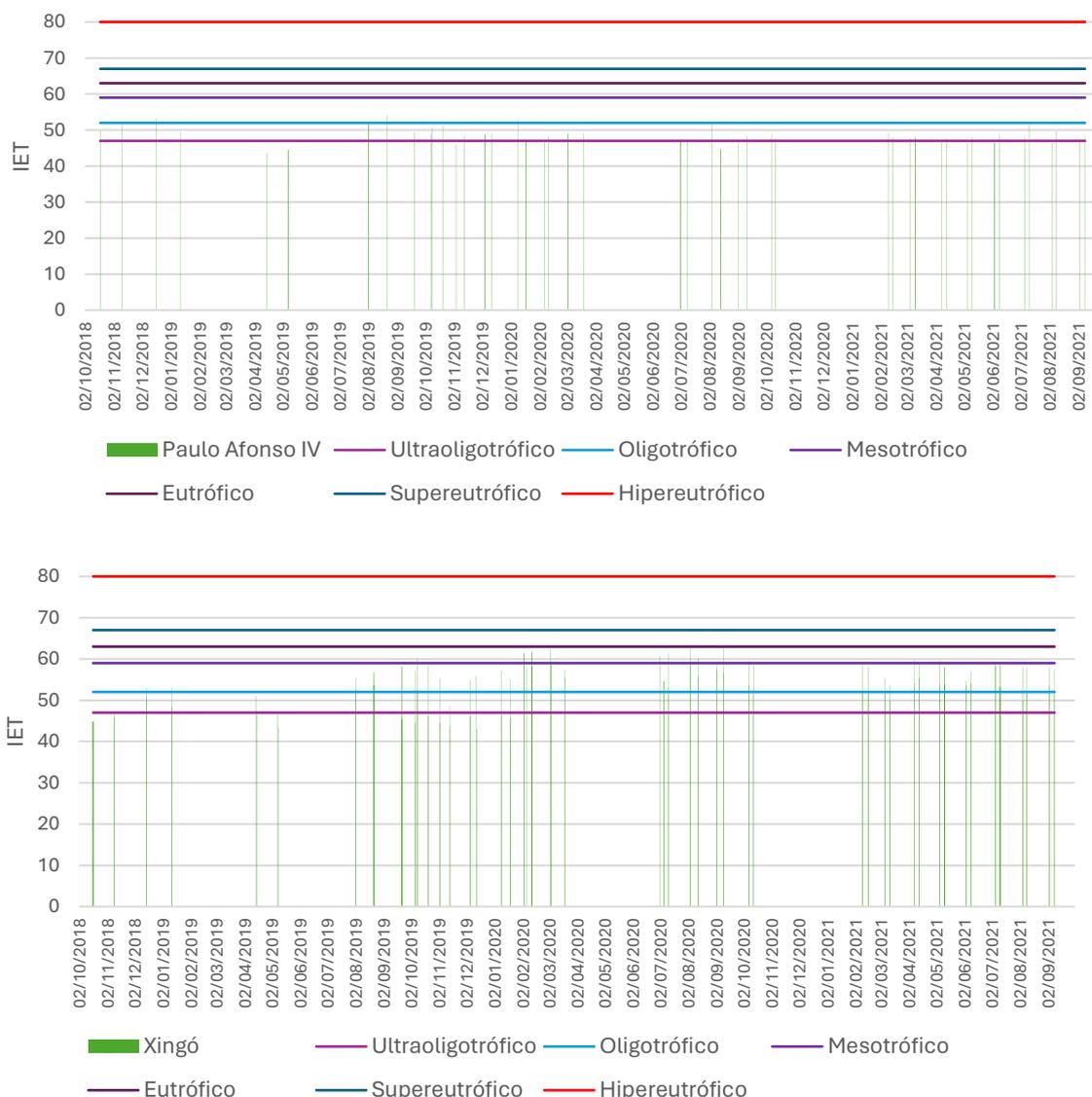


Figura 6 - Classificação do IET

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) mostraram que a distribuição dos dados de IET, proposto por Carlson (1977), para os reservatórios de Itaparica, Moxotó e Xingó se aproximam de uma distribuição normal, pois ambos apresentaram valor-p maior que 0,05. O reservatório de Paulo Afonso IV possui apenas 46 observações, diante disso foi considerado o teste Shapiro-Wilk (SW), o qual demonstrou que esses dados se aproximam de uma distribuição normal. Considerando a metodologia de Lamparelli (2004) para o cálculo e classificação do IET, e os teste de KS e SW, os reservatórios de Itaparica, Paulo Afonso IV e Xingó tem distribuição normal dos dados de IET (**Tabela 2**).

Saber se os dados possuem distribuição normal é crucial para a construção de modelos preditivos, pois muitas técnicas assumem essa distribuição. No caso da regressão por processos gaussianos, a suposição de normalidade facilita a inferência estatística e a interpretação dos parâmetros do modelo. Se os dados têm distribuição normal, o impacto no modelo de processos gaussianos é uma melhor adequação às suposições do método, resultando em estimativas mais confiáveis e intervalos de confiança mais precisos.



Observando os dados de IET conforme a metodologia de Carlson (1997), os reservatórios de Xingó e Moxotó apresentaram maiores percentuais de casos de eutrofização, cerca, respectivamente de 34% e 6% dos dados observados, enquanto o reservatório de Itaparica apresentou apenas 2% de casos de eutrofização. Os menores percentuais de oligotrófia foram para os reservatórios de Moxotó (5%) e Xingó (6%) (**Figura 5**), com casos de eutrofização mais frequentes nos meses de agosto, setembro e outubro (**Figura 6**).

Quando o índice do estado trófico é calculado segundo a metodologia de Lamparelli (2004), apenas os reservatórios de Xingó e Moxotó apresentam casos de supereutrofização, representando secura de 1% dos dados observados. Mas, o reservatório de Xingó apresentou maior percentual de casos de eutrofização (19%) em relação a Moxotó (1%) e Itaparica (1%). Houve casos de mesotrofização, oligotrofização e ultraoligotrofização em todos os reservatórios, maiores percentuais de em Paulo Afonso IV, Moxotó e Itaparica respectivamente (**Figura 5**).

## CONCLUSÃO

Os dados do IET demonstram que dos reservatórios estudados, Xingó e Moxotó foram os que apresentaram maiores níveis de estado trófico considerando as duas metodologias de cálculos e classificação (Carlson, 1977; Lamparelli, 2004). Os reservatórios apresentaram caso de eutrofização, maior nível trófico possível para a classificação de Carlson (1977) e casos de Supereutrofização, segundo maior nível trófico de acordo com a metodologia proposta por Lamparelli (2004), indicando a necessidade de medidas para o controle da eutrofização.

O reservatório de Paulo Afonso IV foi que apresentou melhores níveis tróficos, para ambas as metodologias, não apresentando caso de eutrofização, segundo a classificação de Carlson (1977) e maiores percentuais de oligotrofia para ambas a metodologias.

Os testes de normalidade demonstram que os dados de IET dos 4 reservatórios possuem distribuição normal quando o estado trófico da água é calculado considerando a metodologia de Carlson (1977). No entanto, quando esse índice é calculado usando a metodologia de Lamparelli (2004) a distribuição dos dados do reservatório de Moxotó não se aproxima de uma distribuição normal. Por tanto, a fim de assegurar normalidade da distribuição dos dados conclui-se que a metodologia de Carlson (1997) é mais adequada.

Os dados de Índice de Estado Trófico (IET) combinados com outras variáveis ambientais, como profundidade do disco de Secchi e coloração da água, podem ser utilizados como bases de dados específicas para o treinamento de algoritmos ou para outros tipos de projetos de Data Science. Um exemplo pode ser observado no trabalho de Zhou *et al.* (2021), no qual os autores utilizaram dados de IET e coloração da água extraídos de imagens do satélite Sentinel 2A para a construção de um modelo para a determinação do IET. Esse modelo foi construído usando regressão por processos gaussianos e conseguiu recuperar o IET com desempenho satisfatório, apresentando um erro quadrático médio (RMSE) de 4,8 e um erro percentual médio absoluto (MAPE) de 7% na fase de treinamento, e um RMSE de 5,8 e MAPE de 9% na fase de validação.

A distribuição normal desempenha um papel importante na construção de modelos por meio da regressão por processos gaussianos (GPR), pois a inferência nesse tipo de modelo é frequentemente realizada utilizando técnicas bayesianas, que assumem normalidade nos dados para realizar cálculos eficientes de posteriori e previsões. Além disso, a GPR fornece não apenas uma estimativa pontual do resultado, mas também uma estimativa da incerteza associada a essa previsão, a normalidade dos dados é crucial para uma interpretação adequada dessa incerteza.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARLSON, R.E. **A trophic state index for lakes**. 1977. *Limnology and Oceanography*, v. 22, n. 2, p. 361-369.
2. Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF). **Programa de Monitoramento do Rio São Francisco durante o Período de Vazão Reduzida**. Companhia Hidrelétrica do São Francisco, Departamento de Ações Socioambientais (DEAA). SALVADOR/BA: CHESF. Disponível em <<https://www.chesf.com.br/sustentabilidade/Pages/MeioAmbiente/Monitoramento-do-Rio-Sao-Francisco.aspx>>. Acesso em: fev. de 2024.



3. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção Agropecuária no Brasil 2022**. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: fev. de 2024.
4. LAMPARELLI, M.C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
5. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL NA BAHIA. **MP requer adição de Inema e Embasa como réus em ação para descontaminação do São Francisco em Paulo Afonso (BA)**. Assessoria de Comunicação do Ministério Público Federal na Bahia, 2019. Disponível em < <https://www.mpf.mp.br/ba/sala-de-imprensa/noticias-ba/mp-requer-adicao-de-inema-e-embasa-como-reus-em-acao-para-descontaminacao-do-sao-francisco-em-paulo-afonso-ba>>. Acesso em: fav. de 2024.
6. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL NA BAHIA. **TRF5 confirma sentença que condenou Chesf ao pagamento de mais de R\$ 6 milhões por mancha no Rio São Francisco**. Assessoria de Comunicação do Ministério Público Federal na Bahia, 2023. Disponível em < <https://www.mpf.mp.br/regiao5/sala-de-imprensa/noticias-r5/trf5-confirma-sentenca-que-condenou-chesf-ao-pagamento-de-mais-r-6-milhoes-por-mancha-no-rio-sao-francisco>>. Acesso em: fav. de 2024.
7. VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. 4. ed, v. 1, 2011.
8. Wang, S. *et al.* **Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index**. Remote Sensing of Environment. Volume 217, pag. 444 – 460, nov. de 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425718304012>>. Acesso em: jan. de 2023.
9. Zhao, Y. *et al.* **Recognition of Water Colour Anomaly by Using Hue Angle and Sentinel 2 Image**. Remote Sensing. Volume 12, fev. de 2020. Disponível em: < [https://www.mdpi.com/2072-4292/12/4/716/review\\_report](https://www.mdpi.com/2072-4292/12/4/716/review_report)>. Acesso em: fev. de 2023.