



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Avaliação Comparativa entre Dados de Sensor Remoto e *In Situ* para Predição do Índice de Estado Trófico a partir da Clorofila “a” na região do Marajó

Valéria Monteiro Carrera Moraes¹; Hebe Morganne Campos Ribeiro²; Éder Silva de Oliveira³; Ailson Renan Santos Picanço⁴; Rafael Ribeiro Meireles⁵; Tayany Coelho de Almeida⁶; Felipe da Costa da Silva⁷; Washington Aleksander Savaris dos Santos⁸; Clarissa Campos Ribeiro Anaisse⁹; Carla Renata de Oliveira Carneiro¹⁰

¹Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Universidade do Estado do Pará, email: valeriacarreralive@gmail.com, ²Coordenadora do Laboratório de Águas da Amazônia, Universidade do Estado do Pará, email: hebemcr@gmail.com, ³Doutor em Agronomia, Universidade do Estado do Pará, email: ederso@uepa.br, ⁴Doutor em Pesquisa Operacional, Universidade do Estado do Pará, email: ailson.picanco@outlook.com, ⁵Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado do Pará, email: rafarm1997@gmail.com, ⁶Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Universidade do Estado do Pará, email: tayany.almeida@icb.ufpa.br, ⁷Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Universidade do Estado do Pará, email: silvafelipe375@gmail.com, ⁸Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Universidade do Estado do Pará, email: alex.uepa@gmail.com, ⁹Bacharel em Direito, Universidade do Estado do Pará, email: clarissaribeiro46@gmail.com, ¹⁰Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado do Pará, email: carlacarneiro007@gmail.com.

Artigo recebido em 19/03/2023 e aceito em 17/11/2023

RESUMO

A contaminação ou poluição da água, geram diversos fenômenos, um deles é a eutrofização. Em virtude disso, com a finalidade de gestão sustentável dos recursos hídricos, o Índice de Estado Trófico foi desenvolvido para possibilitar a classificação das águas de corpos hídricos em diferentes graus de trofia, sendo o sensoriamento remoto uma das ferramentas capazes de determinar tal índice. Dessa forma, o objetivo deste estudo é comparar os níveis tróficos obtidos por meio das análises do sensoriamento remoto com as análises limnológicas de amostras de clorofila “a” em laboratório. A presente pesquisa é composta por três etapas de análises, primeiro serão coletadas amostras de água ao longo de sete pontos da baía de Portel-PA, que por sua vez serão analisadas em laboratório, em seguida, será feita a coleta e o tratamento das imagens de satélite para a predição da clorofila “a”, e então a comparação qualitativa dos valores obtidos com as etapas anteriores através do IET. A aplicação da metodologia permitiu observar que em todos os pontos os valores de IET verificados pelo sensoriamento remoto estão próximos da análise feita em laboratório tendo como classificação predominante entre os pontos a mesotrófica. Logo, análises espaciais como esta, demonstram a importância do sensoriamento remoto como ferramenta para a identificação das áreas de ocorrência de clorofila “a”, contudo, as técnicas de sensoriamento remoto utilizadas neste trabalho, não foram capazes de substituir os trabalhos de campo. Elas apenas permitiram um planejamento e monitoramento remoto mais eficiente das ações a serem realizadas na etapa conclusiva. Palavras-chave: Sustentabilidade; Qualidade da água; Imagem de satélite.

Comparative Evaluation between Remote Sensor and *in situ* Data for Predicting the Trophic State Index from Chlorophyll “a”

ABSTRACT

Contamination or water pollution generates several phenomena, one of which is eutrophication. As a result, with the aim of sustainable management of water resources, the Trophic State Index was developed to enable the classification of water resources in different degrees of trophicity, with remote sensing being one of the tools capable of determining such an index. Thus, the objective of this study is to compare the trophic levels obtained through remote sensing analyzes with limnological analyzes of Sample of chlorophyll “a” in the laboratory. This research consists of three stages of analysis, first a water sample will be collected along seven points in the bay of Portel-PA, which in turn will be laboratory results, then the collection and treatment of satellite images will be carried out. for the prediction of chlorophyll “a”, and then the qualitative comparison of the values obtained with the previous steps through the IET. The application of the methodology allowed observing that at all points the TSI values verified by remote sensing are close to the analysis carried out in the laboratory, with the predominant classification among the points being mesotrophic. Therefore, spatial analyzes such as this one, demonstrate the importance of remote sensing as a tool for identifying the areas of occurrence of chlorophyll

“a”, however, as remote sensing techniques used in this work, they were not able to replace field work. They only allowed a more efficient remote planning and monitoring of the actions to be carried out in the final stage.

Key-words: Sustainability; Water quality; Satellite images.

Introdução

A água pode ser considerada elemento chave para a existência da vida, nenhum ambiente se torna apropriado ao desenvolvimento de seres vivos sem água (Bacci e Patata, 2008). Nesse sentido, a região amazônica é privilegiada por obter a maior bacia fluvial do mundo que abrange uma área de 6,2 milhões de km², aspecto que reflete na não uniformidade dos corpos d'água amazônicos onde são encontradas diferenças tanto morfológicas quanto químicas e biológicas (Silva, 2018).

Apesar de toda a sua dimensão, vários estudos com objetivo de analisar a qualidade da água amazônica apontam resultados negativos com baixo nível de qualidade, principalmente causados por despejos de esgoto doméstico sem o tratamento adequado (Queiroz e Melo, 2017; Sant'Ana et al., 2019; Silva et al., 2020). Este cenário é consequência da despreocupação quanto à quantidade de água para o abastecimento populacional, pois, a grande disponibilidade quantitativa induz a sociedade a desperdiçar e poluir os recursos hídricos, diminuindo a disponibilidade qualitativa (Soares de Souza, 2017; Ferreira, 2017).

Tal contaminação ou poluição da água, geram diversos fenômenos, um deles é a eutrofização, que foi definida por Chen et al. (2016) como o enriquecimento de um determinado corpo d'água por nutrientes, principalmente, nitrogênio e fósforo, que ao serem lançados de maneira excessiva no meio aquático provocam o aumento do crescimento de biomassa algal, ou seja, resulta no aparecimento da clorofila “a”, um pigmento fotossintético e primeiro sintoma de eutrofização, se tornando o principal aspecto indicador da degradação (Baumgarten e Pozza, 2021).

Esses pigmentos verdes são comuns em todas as células fotossintéticas, ou seja, estão presentes em todos os organismos que realizam fotossíntese oxigênica (Streit, 2005). Devido esta propriedade, Kirk (1986) e Vieira Barreto et al. (2013) afirmaram que o parâmetro pode se estimado através de sensores ópticos, uma vez que a clorofila “a” absorve parte da radiação eletromagnética no visível, esta absorção depende da concentração e das características do pigmento e das características da água.

Dessa forma, com a finalidade de gestão sustentável dos recursos hídricos, o Índice de Estado Trófico foi desenvolvido para possibilitar a classificação das águas de corpos hídricos em diferentes graus de trofia, avaliando a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes, com esta ferramenta é possível realizar o cálculo do índice de rios e reservatórios por meio da análise laboratorial da clorofila “a” (Lamparelli, 2004).

Contudo, Monteiro (2020) corrobora afirmando que apesar do método de análise *in loco* ser bastante preciso as lacunas das medições está na dificuldade em realizá-las de forma suficiente para viabilizar a criação de mapas de distribuição estaticamente significativo para a região inteira que se quer analisar, e na exigência de grande esforço laboratorial. Além disso, Bodulla et al. (2016) criticam esse tipo de amostragem por ela não possibilitar o monitoramento contínuo sistemático dos ambientes aquáticos.

Por meio desse contexto, o sensoriamento remoto se torna uma alternativa promissora, pois oferece diversas vantagens como baixo custo, dados constantes e sinóticos, facilidade de coleta e atualização de informações de várias propriedades dos alvos, possibilitando o estudo da dinâmica de variáveis limnológicas em corpos hídricos, em diferentes escalas espaciais e temporais, fator vital para a correta avaliação e gestão dos corpos d'água (Sayers et al., 2019).

Ademais, Medeiros, Zoffoli e Kampel (2023) confirma que um dos parâmetros da água mais estudado recentemente através de técnicas de sensoriamento remoto tem sido a clorofila “a” que possui características de refletância, evidenciando a intensa expansão dos métodos de detecção remota nas questões de monitoramento da qualidade da água de corpos hídricos.

Sendo assim, o objetivo deste estudo é comparar os níveis tróficos obtidos por meio das análises do sensoriamento remoto com as análises limnológicas de amostras de clorofila “a” em laboratório.

Materiais e método

Área de Estudo

A presente pesquisa determinou a Baía localizada no município de Portel na mesorregião do Marajó no estado do Pará, como apresenta a Figura 1, a baía pertence à região hidrográfica Portel-Marajó.

O município faz parte do arquipélago do Marajó e se distancia da capital Belém, 270 km, via terrestre,

no entanto, o acesso ao local se dá apenas por meio da navegação com viagem de 16 horas de duração.

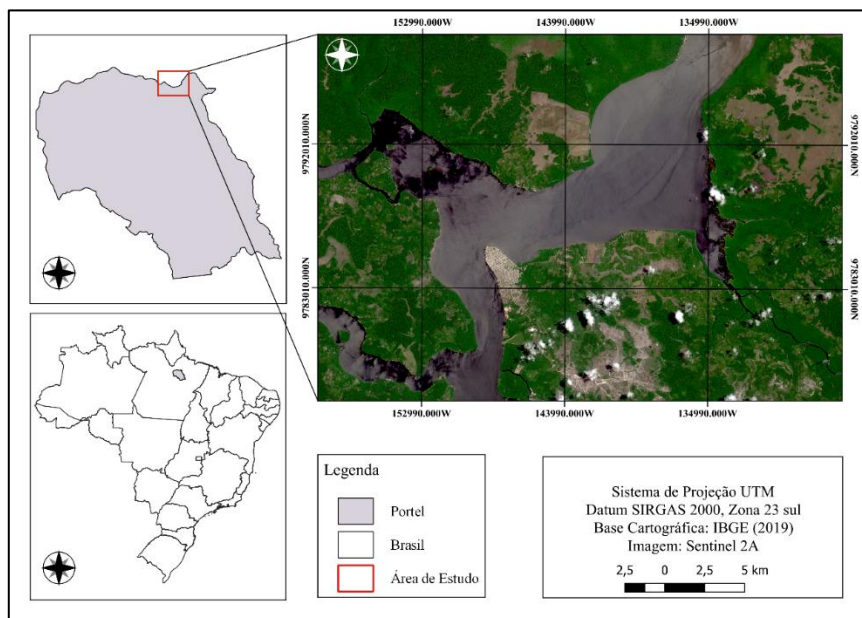


Figura 1. Localização da área de estudo

De acordo com a classificação de Köppen, o clima do município é caracterizado como tropical úmido, com precipitação mais intensa em fevereiro, março e abril e menos intensa em agosto, setembro e outubro, a variação da temperatura em média tem como mínima 23°C atingindo 35°C ao longo do ano (INMET, 2023).

No município de Portel são encontrados índices sanitários preocupantes. Conforme o Instituto Trata Brasil apresenta, utilizando os dados mais recentes disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento- SNIS (2022), o município não possui um sistema de tratamento de esgoto, a população, basicamente, utiliza fossa séptica ou fossa rudimentar, este cenário, por sua vez, reflete na indisponibilização do acesso à água por rede de abastecimento público, que nesta região chega a 97% da população local. Hodiernamente, pouco se discute no âmbito acadêmico acerca dos reflexos dessa realidade, principalmente, no que tange a qualidade da água.

Método da Pesquisa

O estudo de caso em questão pode ser classificado como descritivo de caráter exploratório. Para a pesquisa do tipo descritiva Gil (2008) e Oliveira e Oliveira (1999) definem como aquela que permite a identificação de relações entre

variáveis ou a simples descrição de uma população ou um fenômeno, e ainda ressalta que a principal característica desta pesquisa está na padronização de técnicas de coleta de dados, dessa maneira, esta forma de pesquisa requer planejamento rigoroso para a aplicação de tal coleta.

No entanto, quando o tema em estudo foi pouco explorado. A pesquisa exploratória é desenvolvida no sentido de proporcionar uma visão geral acerca de determinado fato, procurando buscar padrões, ideias ou hipóteses (Collis e Hussey, 2005).

O procedimento metodológico dessa pesquisa é composto por três etapas, primeiro serão coletadas amostras de água, em pontos pré-definidos, na baía de Portel, as amostras por sua vez serão analisadas em laboratório, em seguida, será feita a coleta e o tratamento das imagens de satélite para a predição da clorofila “a”, e então a comparação qualitativa dos valores obtidos com as etapas anteriores através do Índice de Estado Trófico (IET) a partir do parâmetro clorofila “a”.

Coleta das amostras de água

As amostras de água da baía, para a análise de clorofila “a”, foram coletadas no dia 18 de setembro de 2022 entre 09:00 e 12:00 horas em sete pontos da área de estudo (Figura 2).

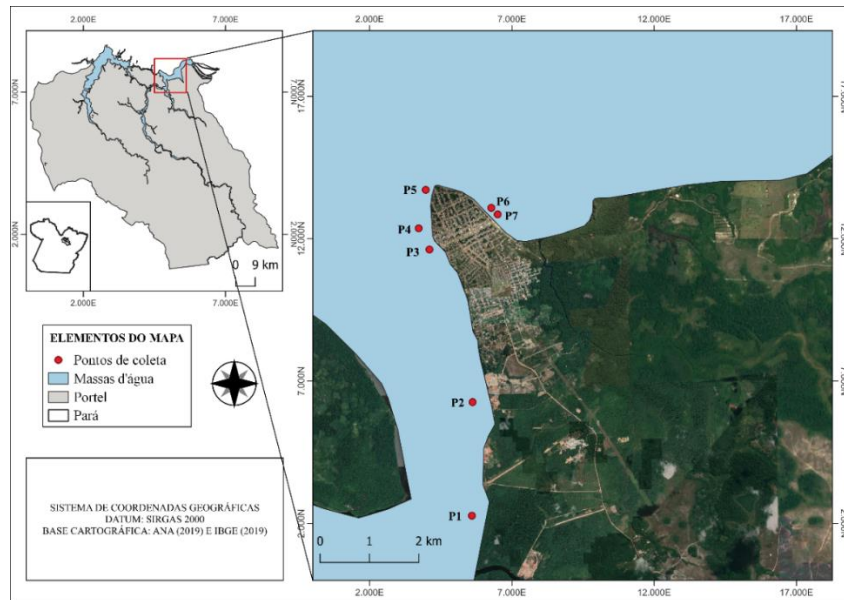


Figura 2. Pontos de coleta de amostras de água

Estes pontos foram escolhidos seguindo o critério de atividades realizadas a margem da baía descritos na Tabela 1 e ainda fundamentado no orçamento para a realização da amostragem e

análises. Para a execução das campanhas de amostragem seguiu-se as orientações proposta pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (CETESB; ANA, 2011).

Tabela 1. Descrição dos pontos de coleta

P1	Ponto de controle (perto da vegetação)
P2	Serraria
P3	Portos e Postos de combustível
P4	Mercado municipal
P5	Praia do Tucano
P6	Cemitério
P7	Bares e Restaurantes

A análise das amostras de clorofila “a” coletadas *in situ* foi fundamentada no método de determinação de clorofila e feofitina da CETESB (2014), que dispõe das diretrizes e equipamentos necessários para as etapas de filtragem, extração e leitura das amostras. As verificações foram realizadas dentro de 48h, tempo limite para filtração das amostras, no Laboratório de Qualidade de Água da Amazônia – Labágua da Universidade do Estado do Pará. Após a leitura no espectrofotômetro, os dados foram tabulados e tratados no software *Excel* 2016 para a determinação da clorofila “a” de cada ponto em µg/L.

Coleta e Tratamento das Imagens de Satélite

O estudo utilizou como entrada de dados bandas do satélite Sentinel 2A, considerando o livre acesso na plataforma da Agência Espacial da

Europa (ESA). Buscou-se a data de imageamento do satélite mais próximo da data da coleta *in loco* e com a menor cobertura de nuvens no local, considerando os aspectos supracitados e o tempo de retorno do Sentinel 2A de cinco dias, a melhor varredura a ser coletada foi a do dia 15 de setembro de 2022, observando que todas as imagens do sensor são feitas às 13:00 horas.

As bandas utilizadas foram as correspondentes as faixas do visível (RGB-B04, B03 e B02) de 10 m de resolução espacial e do infravermelho próximo (B08) do espectro de 20 m de resolução espacial. Após a coleta, o tratamento das imagens foi realizado através do *software QGIS* versão 3.22, no qual foi delimitada a área de estudo por meio do recorte da baía de Portel em todas as camadas raster das bandas selecionadas. Em seguida, quantificou-se a clorofila “a” para o recorte de toda a Baía de Portel por meio da adaptação do modelo de Londe et al. (2013)

apresentado na Equação 1, em função das bandas vermelho (B04) e infravermelho (B08) do satélite.

Equação 1. Modelo de concentração de clorofila “a”

$$chl = 2,1171 + 1,68 \log_{10}\left(\frac{B08}{B04}\right)$$

Para destacar os valores de teor de clorofila “a” vizinhos aos pontos de coleta das amostras de água *in loco*, recortou-se circunferências na camada raster da baía de diâmetro de aproximadamente 200 metros em volta de cada coordenada do ponto de coleta. Após esse processamento, gerou-se sete circunferências com concentrações de clorofila “a”, além disso, para adquirir esses valores em tabela de atributos, converteu-se os pixels do raster em pontos e extraiu-se separadamente os valores, em formato x/sx, integrantes de cada circunferência determinada.

Utilizando o *software Excel* 2016, verificou-se o desvio padrão, a média, o valor máximo e o valor mínimo das concentrações que

compõe cada uma das sete circunferências, com o intuito de melhor discutir os resultados.

Determinação do IET

Para a realização da comparação verificou-se as médias das concentrações de clorofila “a” obtidas com o sensoriamento remoto e os valores da amostragem no local de estudo em cada um dos sete pontos. Além disso, com os resultados das análises tanto de sensoriamento remoto quanto laboratorial, determinou-se o IET em função do parâmetro clorofila “a”, conforme a Equação 2 definida por Carlson (1977) alterado por Lamparelli (2004) para ecossistemas tropicais em ambiente lótico.

Equação 2. Índice de Estado Trófico a partir da clorofila “a”

$$IET (CL) = 10 \times \left[6 - \left\{ \frac{-0,7 - 0,6 \times \ln[CL]}{\ln[2]} \right\} \right] - 20$$

Através da equação foi possível classificar o nível trófico da baía de Portel, de acordo com os intervalos da Tabela 2.

Tabela 2. Classificação do estado trófico modificado segundo Lamparelli (2004)

Estado trófico	Clorofila a (µg/L)	IET (CL)(µg/L)
Ultraoligotrófico	CL ≤ 0,74	IET (CL) ≤ 47
Oligotrófico	0,74 < CL ≤ 1,31	47 < IET (CL) ≤ 52
Mesotrófico	1,31 < CL ≤ 2,96	52 < IET (CL) ≤ 59
Eutrófico	2,96 < CL ≤ 4,70	59 < IET (CL) ≤ 63
Supereutrófico	4,70 < CL ≤ 7,46	63 < IET (CL) ≤ 67
Hipereutrófico	7,46 < CL	67 < IET (CL)

Fonte: Adaptado de Lamparelli (2004).

Resultados e discussão

Dada a coleta das amostras em campo, analisou-se em laboratório com os procedimentos padrões para clorofila “a”, as informações estão dispostas na Tabela 3. Considerando o limite do

parâmetro clorofila “a”, da Resolução do CONAMA nº 357/2005 para rios de Classe 2, nota-se que os valores encontrados em todos os pontos de coleta, na análise em laboratório estão de acordo com que estabelece a resolução (até 30 µg/L).

Tabela 3. Resultados da análise laboratorial de Clorofila “a” e IET (CL).

Pontos	Clorofila "a" µg.L ⁻¹	Classificação	IET (CL)	Classificação
P1	1,6038	Mesotrófico	54,1878	Mesotrófico
P2	2,8512	Mesotrófico	59,1683	Eutrófico
P3	2,1384	Mesotrófico	56,6781	Mesotrófico
P4	3,2076	Eutrófico	60,1878	Eutrófico
P5	1,2474	Oligotrófico	52,0124	Mesotrófico
P6	0	-	0	-
P7	1,4256	Mesotrófico	53,1683	Mesotrófico
■ Oligotrófico ■ Mesotrófico ■ Eutrófico				

É necessário destacar em P6, em frente ao cemitério, na análise pelo laboratório não foi possível identificar concentração de clorofila “a”, esse resultado é justificado pela agitação da água neste ponto no dia da coleta degradando a clorofila “a” e prejudicando a leitura, impossibilitando a classificação trófica. Apesar disso, em uma avaliação visual macroscópica é possível identificar fragmentos de clorofila “a” no rio, como observado na Figura 3.

Segundo Mendes (2019) e Silveira, Okumura e Yamaguchi (2021), o aumento da velocidade da corrente d’água está associada a ressuspensão do sedimento de fundo, elevando a turbidez da água e dificultando a passagem de luz, um dos fatores limitantes ao desenvolvimento da clorofila “a”.

Ademais, em P4, próximo ao Mercado Municipal, foi classificado como eutrófico (CL=3,20 e IETCL= 60,18), ou seja, com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos (Lamparelli, 2004). Condição alarmante para um corpo de água lótico, esse comportamento também foi observado no estudo de Ribeiro et al. (2014) ao analisar o IET do rio Maratauíra no município de Abaetetuba-PA, no qual os maiores valores do índice estavam próximo ao mercado municipal.



Figura 3. Clorofila “a” na baía de Portel

Fonte: Autores (2022)

Nos pontos P2 e P5 ocorreram diferentes classificações tróficas entre as análises da clorofila “a” e do IET (CL). Apesar disso, na verificação dos valores limites na Tabela 2, nota-se que, o intervalo classificatório do IET (CL) é de $52 < \text{IET (CL)} \leq 59$ para mesotrófico, dessa forma, o valor do IET (CL) em P2 (59,1683) pode ser considerado mesotrófico, devido a pouca variação entre os valores 59 e 59,1683. De maneira semelhante acontece em P5, no entanto, o valor do IET (CL) de 52,0124, pode ser classificado como oligotrófico, tendo em vista as justificativas anteriormente citadas. Neste contexto, P5 foi o único ponto que apresentou a classe oligotrófica caracterizada por

corpos d’água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes.

Embora, as dificuldades da coleta, e a sensibilidade do parâmetro clorofila à inúmeros fatores, foi possível constatar que o nível de trofia mais frequente entre os pontos é o mesotrófico, nessa classe se enquadram corpos d’água com produtividade intermediária e possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos (Lamparelli, 2004). Outras pesquisas também identificaram tal predominância de classificação em rios brasileiros

(Gomes e Paula, 2019; Chagas et al., 2020; Farias et al., 2020; Costa et al., 2022).

De acordo com Lamparelli (2004) a alta relação entre o volume de água e a região marginal, em ambientes lóticos, além de maior velocidade das águas, quando comparados aos ambientes lênticos, são encontradas menores concentrações de clorofila “a”. Entretanto, não se diminui a importância da realização de estudos a respeito da eutrofização em rios, visto que, o conhecimento das classificações possibilita a criação de medidas

de monitoramento dos recursos hídricos, principalmente os da região amazônica.

Na determinação da clorofila “a” utilizando as imagens do satélite Sentinel 2 no recorte da baía de Portel, obteve-se uma variação entre 1,92 e 2,98 $\mu\text{g.L}^{-1}$, como apresentado na Figura 4. Portanto, todos os valores estão de acordo com o que preconiza a resolução do CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2, considerando os limites dos parâmetros de clorofila “a” (até 30 $\mu\text{g.L}^{-1}$).

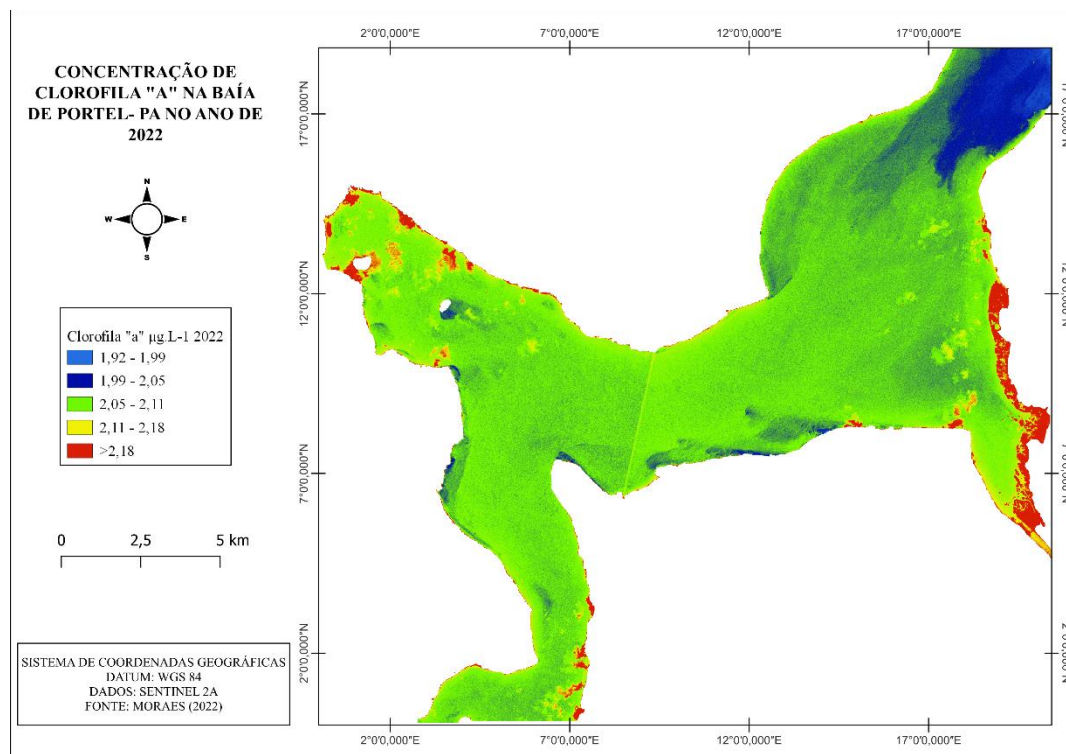


Figura 4. Concentração de clorofila “a” na Baía de Portel em 2022

Fonte: Autores (2022).

Ademais, pode-se observar a presença de um trecho no rio a leste com a coloração vermelha, onde foram encontrados os maiores valores de clorofila “a” ($>2,00 \mu\text{g.L}^{-1}$) nessa área se encontra fortemente a presença de baronesa (Figura 5), ao longo de toda baía de Portel é notada a presença dessa planta aquática (*Eichornia Crassipes*) uma planta originária da América do Sul, com ampla

distribuição nos rios da bacia amazônica, é considerada como uma das 100 plantas de maior potencial invasor e se desenvolve em ambientes poluídos e são capazes de se deslocarem do local de origem para outros locais, podendo ser um indicador do alto nível de poluição (Vásquez, 2019).



Figura 5. Baronesa na Baía de Portel
Fonte: Autores (2022)

No estudo desse mesmo autor onde ele aplicou a *Eichhornia crassipes* no tratamento de efluentes da ETE do distrito de Copallín na Província de Bagua no Peru, concluiu que a aplicação se mostrou significativamente eficiente para depurar o efluente, já que a planta diminuiu 46,1653%.

Além disso, vale ressaltar que as menores concentrações de clorofila “a” estão apresentadas a nordeste do mapa próximo a cidade de Melgaço, com a coloração azul, nessa região encontra-se uma zona de mistura (Figura 6) entre águas brancas e águas pretas de acordo com a classificação de Harold Sioli de 1956.

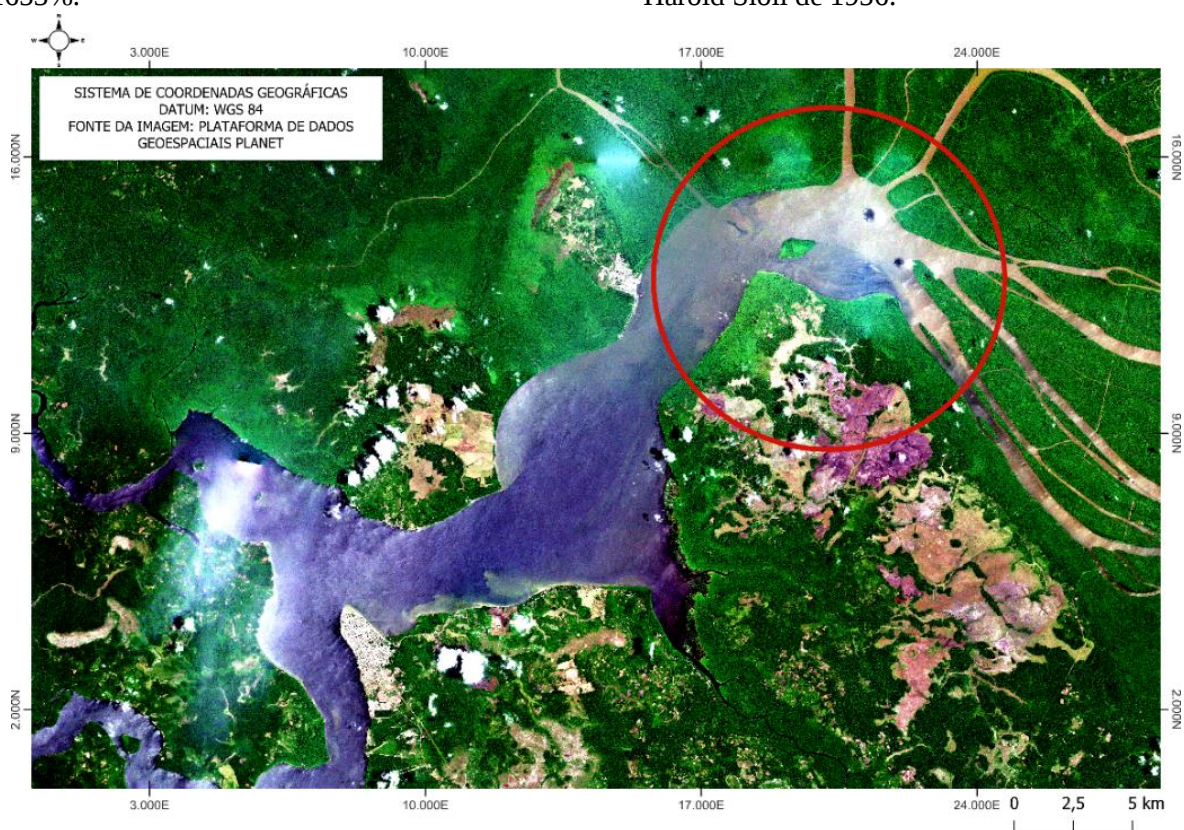


Figura 6. Destaque para zona de mistura de águas

As águas Brancas possuem altas cargas de sedimentos, são materiais argilosos e siltosos em suspensão, advindo dos processos erosivos causado por rios andinos, por isso a coloração barrenta, caracterizada por baixa transparência (Barros e

Carvalho, 2020). Enquanto, as águas pretas são caracterizadas com a coloração escura devido os ácidos húmicos presentes na água, com aparência de “chá de folhas”, possuem maior transparência.

Dessa maneira, os sólidos na região supracitada alteram os resultados de reflectância da água para os sensores, pois possuem menor zona fótica, dificultando a determinação da concentração da clorofila “a”, de maneira oposta, essa condição não acontece na região próxima da área urbana de Portel, permitindo uma melhor leitura do sensor e consequentemente resultados mais próximos da realidade.

Além desses resultados, na avaliação também se identificou, a oeste do local estudado, a concentração em larga escala de clorofila “a”, no entorno desta região é predominante a vegetação densa e possui alta transparência da água, e ainda é curso do rio Anapu que leva a Unidade de

Conservação da Floresta Nacional de Caxiuanã. Em uma pesquisa de relação entre transparência da água e clorofila “a” de Filho et al (2019) verificou que a melhor correlação entre a clorofila “a” e a reflectância foi nas amostras obtidas nas maiores profundidade do disco de *Secchi*, equipamento utilizado para medição do parâmetro transparência.

Após a análise de maneira geral da baía de Portel, foi necessário realizar a delimitação para próximo dos pontos de coleta com uma circunferência de 200 m de diâmetro (Figura 7), visando a redução dos dados encontrados na baía (mais de um milhão de pixels), e assim facilitar o tratamento dos valores tabulados.

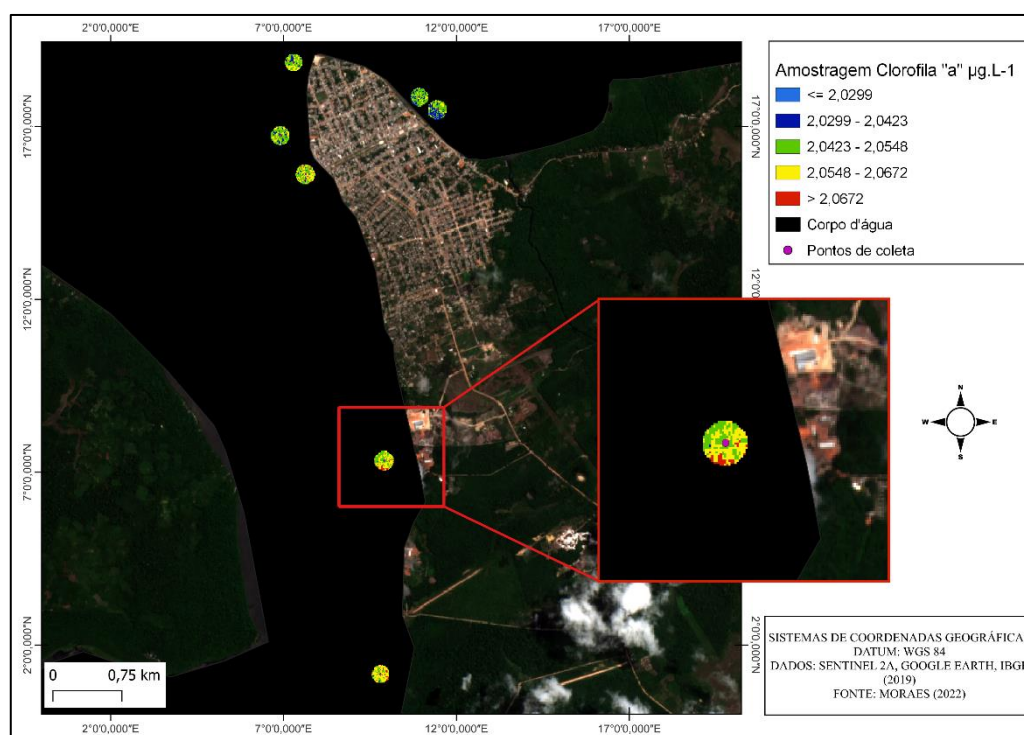
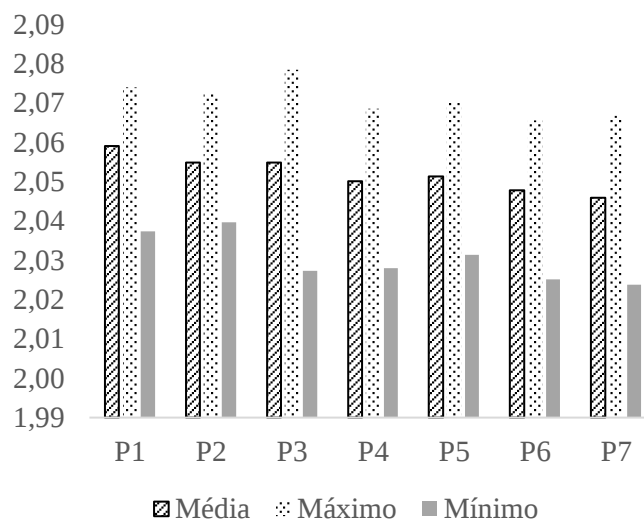


Figura 7. Amostragem dos sete pontos na camada Raster da Baía

Através desse processo foram obtidos um total de 1946 valores de pixels nas sete circunferências recortadas, sendo que para cada ponto foram estabelecidos 278 valores. Neste recorte, houve a redução significativa nos intervalos de concentração de clorofila “a”

variando de 2,02 a 2,079 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Portanto, determinou-se as concentrações médias, máximas e mínimas de clorofila “a” para cada conjunto de dados exportados. O Gráfico 1 expõe os valores médios, máximos e mínimos para os dados dos sete pontos.

Gráfico 1. Média, Máximo e Mínimo dos recortes de valores dos pixels.



Na análise do Gráfico 1 foi constatado em P1 a predominância de valores altos e a maior média (2,0591), isso se deve a presença de nuvens próximo a este ponto no momento da varredura do satélite, os pixels interferidos por nuvens contaminam os valores calculados pois são tratados como válidos, essa problemática é inevitável, prejudicando a análise quantitativa da imagem (Minatti et al., 2023).

Também é possível observar com o Gráfico 1 o maior valor de clorofila “a” em P3, se aproximando de $3,0 \mu\text{g.L}^{-1}$, neste ponto localizam-se postos de combustível e portos, nos quais, ribeirinhos de regiões distantes se instalam por longos dias e vivendo nas embarcações despejam os resíduos e efluentes domésticos diretamente no rio, o que justificava a maior produtividade nesse ponto, isto pois, esgoto doméstico possui uma alta carga de nitrogênio e fósforo, nutrientes causadores do surgimento de clorofila “a”. Oliveira (2023)

exemplifica as origens dos nutrientes presentes nos efluentes domésticos, como o nitrogênio tem formas variadas e pode ser adquirido até mesmo através da retirada do ar por algumas algas, o fósforo total é o nutriente com maior eficiência de análise da poluição devido ter sua origem principalmente em detergentes superfosfatados empregados em larga escala domesticamente, além da própria matéria fecal, que é rica em proteínas.

Em contrapartida, em P7 revelou-se o menor valor de clorofila “a” ($2,0238 \mu\text{g.L}^{-1}$), por estar em um meandro do rio, nessa região há maiores turbulências na água que por sua vez ocasiona a suspensão de sólidos e reduz a transparência do rio, mascarando os resultados reais.

Mediante as médias encontradas para as concentrações de clorofila “a” em cada ponto avaliado, estimou-se o IET (CL) permitindo a classificação trófica como expõe a Tabela 4.

Tabela 4. Resultados da Análise com sensoriamento remoto de Clorofila “a” e IET (CL).

Pontos	Clorofila SR* $\mu\text{g.L}^{-1}$	Classificação	IET (CL) SR*	Classificação
P1	2,0591	Mesotrófico	56,3508	Mesotrófico
P2	2,0568	Mesotrófico	56,3411	Mesotrófico
P3	2,0550	Mesotrófico	56,3338	Mesotrófico
P4	2,0497	Mesotrófico	56,3114	Mesotrófico
P5	2,0514	Mesotrófico	56,3185	Mesotrófico
P6	2,0479	Mesotrófico	56,3036	Mesotrófico
P7	2,0449	Mesotrófico	56,2909	Mesotrófico
*SR= sensoriamento Remoto				■ Mesotrófico

Consoante a Tabela 4 verificou-se a baixa variação entre os valores numéricos dos pixels resultando no enquadramento de todos os pontos de amostragem na categoria mesotrófica, tanto para a concentração de clorofila “a” quanto para o IET (CL). Os resultados apresentados podem conter interferências da média/baixa resolução espacial do satélite Sentinel 2A, que com a falha de falta de detalhes nas fotos de sensoriamento remoto de baixa e média resolução espacial, apenas se pode distinguir recursos extensos, como pontes, canais e padrões de ruas, ou seja, a dimensão do pixel define a resolução espacial da imagem, quanto menor a sua dimensão, maior é a resolução espacial da imagem, e maior a capacidade de distinguir e definir alvos pequenos (EOS data analytics, 2023).

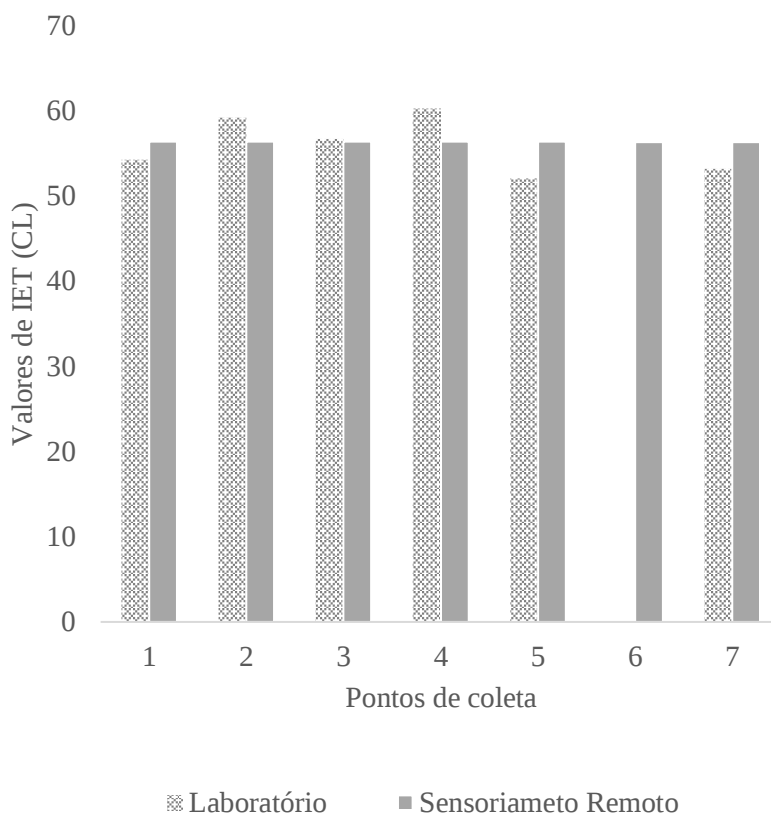
Problemas semelhantes foram identificados no estudo de Amaral (2009), que avaliou a comparação entre métodos de classificação de imagens para o mapeamento de sucessão vegetal e a separação entre as classes

resultaram em valores com baixo nível de exatidão, o que pode ser explicado pela semelhança espectral existente entre os alvos (estádios inicial, médio e avançado de sucessão florestal), pequena variação entre os valores numéricos dos pixels, existência de sobreposição entre classes e pela baixa resolução espectral dos sensores.

Contudo, em uma avaliação qualitativa das análises de amostras de água e do sensoriamento remoto, nota-se o predomínio da classe mesotrófica, não isentando o uso da metodologia para o prognóstico do nível de trofia do rio, visto que, a classificação em destaque foi a mesma nas duas análises, permitido o uso da detecção remota, com a posterior validação dos dados em campo.

Com a finalidade de melhor visualização, os dados do índice de estado trófico a partir da clorofila “a” determinados em laboratório e por sensoriamento remoto foram plotados graficamente, demonstrados no Gráfico 2.

Gráfico 2. Comparação entre IET (CL) determinado no laboratório e por sensoriamento remoto.



No Gráfico 2 constata-se a proximidade dos valores de IET (CL) verificados pelo sensoriamento remoto das análises feitas em laboratório em todos os pontos de coleta. Vale enfatizar a ausência de dados de laboratório em P6, como justificado anteriormente, além disso, verificou-se que a menor diferença encontrada

entre os métodos de análises foi em P3 com 0,3443 de diferença, e a maior foi observada em P4 com 3,8744 de diferença.

A estimativa do índice para rios por meio do sensoriamento remoto é de fato um grande desafio para a comunidade acadêmica, em virtude da alta dinâmica dos recursos hídricos e a

velocidade do fluxo de água em ambientes lóticos. Pereira et al. (2020) ao avaliar o IET a partir da clorofila “a” no rio Urupá também observou a instabilidade da ferramenta para a avaliação do potencial de eutrofização do manancial, tendo em vista que o regime de escoamento do rio poderia estar mascarando o resultado ao inibir a floração de algas, e ressaltou que não necessariamente indica o não potencial.

A pesquisa de Valerio et al. (2015) que também objetivou a comparação entre os métodos de análise *in situ* e com o sensor MODIS-aqua identificou um alto desvio padrão com a verdade de campo originada da estimativa por sensoriamento remoto para uma pequena quantidade de amostras. Contudo, os autores concluíram que mesmo os testes estatísticos demonstrem que os dados *in situ* e de satélite não tenham diferença significativa, é necessário avaliar uma quantidade maior de dados para quantificar a acurácia entre as medidas.

Embora, o método de resposta óptica tenha suas limitações, esse quadro é eficientemente aproveitado para determinar o IET (CL) de corpos d’água interiores. Serbetto et al. (202) aplicaram do modelo de distribuição da concentração de clorofila “a” em sua pesquisa, e o estudo obteve resultados satisfatórios no que tange ao monitoramento espacial e temporal da clorofila “a” auxiliando na gestão do reservatório. Além deste, o estudo de Aviz (2021) que utilizou o sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do lago água preta em Belém-PA, confirmou a utilização de dados a partir de sensoriamento remoto como uma excelente ferramenta para a análise ambiental de ecossistemas aquáticos, podendo ser utilizada nas águas amazônicas, já que esta metodologia já foi aplicada em diversos outros climas e biomas.

Análises espaciais como estas e as da pesquisa em questão, demonstram a importância do sensoriamento remoto como ferramenta para a identificação das áreas de ocorrência de clorofila “a”, indicando uma possível poluição. Apesar de a classe identificada nesta pesquisa seja a de produtividade mediana, Stager et al. (2018) destaca que é mais fácil prevenir do que reverter o processo de eutrofização e que esse fenômeno necessita de um monitoramento intenso, sistemático e constante para manter esse cenário de equilíbrio ambiental.

Conclusão

Portanto, o sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta eficiente para estudos de ecossistemas aquáticos na região de Portel no estado do Pará. Considerando que os dados obtidos através da análise das imagens do satélite se

aproximaram das obtidas em laboratório, alcançando a mesma classificação de estado trófico. Ademais, a distância da capital até a cidade e apenas uma alternativa de acesso, limita as amostragens *in situ*, inclusive as condições exigem uma grande equipe, transporte de equipamentos, custos com passagens, hospedagem, alimentação, coletas, reagentes, equipamentos, entre outros.

Apesar das interferências de nuvens e sedimentos nas análises principalmente nos P1 e P2, o monitoramento pode ser feito continuamente na região de estudo e abranger para outros pontos, visto que o local não possui qualquer fiscalização no que tange a qualidade da água. Além disso, a realização desta pesquisa contribui para o pequeno acervo de trabalhos nesta temática, superando assim desafios encontrados no processo de consumação deste estudo.

Para trabalhos futuros sugere-se a coleta de dados de campo em diferentes épocas, a fim de analisar diferentes imagens de diferentes satélites, tendo uma gama maior de possibilidades a serem selecionadas, podendo dessa forma verificar os padrões temporais da clorofila “a” com resoluções espaciais variadas. Ademais, recomenda-se a ampliar a quantidade de amostras de água coletadas na região, a fim de tornar a estimativa mais próxima da realidade de campo.

Logo, pode-se constatar que as técnicas de sensoriamento remoto utilizadas neste trabalho, para fins de comparação, não foram capazes de substituir os trabalhos de campo. Elas apenas permitiram um planejamento e monitoramento remoto mais eficiente das ações a serem realizadas na etapa conclusiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade do Estado do Pará por possibilitar a realização desta pesquisa e ao Laboratório de Água da Amazônia – Labágua, que executou todas as análises necessárias do estudo. Aos financiamentos das seguintes agências de fomento: FAPESPA (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas) e CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências

Amaral, M. V. F., Souza, A. L. de, Soares, V. P., Soares, C. P. B., Leite, H. G., Martins, S. V., Fernandes Filho, E. I., & Lana, J. M. de., 2009. Avaliação e comparação de métodos de classificação de imagens de satélites para o mapeamento de estádios de sucessão florestal.

- Revista Árvore [Online] 33. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000300019>. Acesso em: 25 set. 2022.
- Aviz, M. D. de., 2021. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Água Preta. [Www.bdta.ufra.edu.br](http://www.bdta.ufra.edu.br). <http://www.bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1924>.
- Bacci, D. de L. C., & Pataca, E. M., 2008. Educação para a água. Estudos Avançados, [Online] 22. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-40142008000200014>. Acesso em 14 jul. 2022.
- Barros, A. A. de O., & Carvalho, A. Á. dos S., 2022. Estudo de Viabilidade Técnica do Aproveitamento de Águas Superficiais de Rios de Águas Brancas para Abastecimento Público em Parintins-AM. Recursos Hídricos: Gestão, Planejamento E Técnicas Em Pesquisa [Online] 2. Disponível em: <https://doi.org/10.37885/220207611>. Acesso em: 20 set. 2022.
- BaumgartenCOL, M. da G. Z., Pozza, S. A., 2021. Qualidade de águas: descrição de parâmetros referidos na legislação ambiental. In repositorio.furg.br. Ed. da FURG. <http://repositorio.furg.br/handle/1/9571>. Acesso em: 14 jul. 2022.
- Bodulla, V., Ramaswamy, L., Pasumarthi, R., Mishra, D., 2016. Data Driven Analysis of Algal Bloom Activity for Effective Water Sustainability. 2016 IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications, [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/bdcloud-socialcom-sustaincom.2016.69>. Acesso em: 18 jul. 2022.
- Carlson, R.E., 1977. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography*, 22, 361-369. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2014. Determinação de Clorofila a e Feofitina a: método espectrofotométrico. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/L5306.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- CETESB, ANA. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2011. Guia Nacional De Coleta E Preservação De Amostras. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Guia-nacional-de-coleta-e-preservacao-de-amostras-2012.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- Chagas, P. F., Lucena, K. O. C. de, Castro, M. P. S., Santos, S. H. L. dos, Silva, F. J. A. da., Araújo, J. K. de., 2020. Índice de estado trófico de um manancial receptor de efluente de estação de tratamento de esgoto baldo – RN. *Brazilian Journal of Development* [Online] 2. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-069>. Acesso em: 03 jan. 2023.
- Chen, C.-W., Ju, Y.-R., Chen, C.-F., Dong, C.-D., 2016. Evaluation of organic pollution and eutrophication status of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *International Biodeterioration & Biodegradation*, [Online] 113. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.024>. Acesso em: 18 jul. 2022.
- Collis, J., Hussey, R., 2005. Pesquisa em administração: um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação. Bookman.
- Costa, G. M. M., Ribeiro, H. M. C., Pantoja, D. N. S. M., 2022. Classificação do Nível de Trofia de um Trecho do Rio Guamá, Belém - Pará. *Revista Georaguaia*, [Online] 12. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/11681>. Acesso em 03 jan. 2023.
- EOS Data analytics, 2023. Resolução Espacial no Sensoriamento Remoto: Tipos e Análise. Eos.com. <https://eos.com/pt/blog/resolucao-especial/>
- Ferreira, M., 2017. O Desafio da Gestão Pública Hídrica Sustentável no Município de Belém e seus Aspectos Legais.
- Filho, W., da Rosa, C., Kremer, G., Dezordi, R., 2019. Clorofila-A Na Coluna De Água E Reflectância Espectral. *Galoá Proceedings*. <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/clorofila-a-na-coluna-de-agua-e-reflectancia-espectral?lang=pt-br>.
- Gil, A. C., 2008. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. <https://ayanrafael.files.wordpress.com/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9nicas-de-pesquisa-social.pdf>
- Gomes, F. B. M., De Paula, D. P., 2019. Determinação e Avaliação do Índice de Estado Trófico (IET) em Rio Urbano Localizado no Estado do Ceará, Brasil. *Revista Da Casa Da Geografia de Sobral*

- (RCGS), [Online] 21. Disponível em: <https://doi.org/10.35701/rcgs.v21n2.487>. Acesso em: 25 set. 2022.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2023. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/pa/portel>. Acesso em: 20 out. 2023.
- Kirk, J., Miller, M., 1986. Reliability and Validity in Qualitative Research. SAGE.
- Lamparelli, M. C., 2004. Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. www.teses.usp.br. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde-20032006-075813/pt-br.php>.
- Londe, L. D. R., Novo, E. M. L. de M., Barbosa, C. C. F., Araujo, C. A. S. de, Rennó, C. D., 2013. Proposal for a remote sensing trophic state index based upon Thematic Mapper/Landsat images. *Ambiente e Água - an Interdisciplinary Journal of Applied Science*, [Online] 8. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1229>. Acesso em: 16 ago. 2022.
- Medeiros, T. A. G., Zoffoli, M. L., Kampel, M., 2023. Avaliação de Algoritmos para Estimativa de Clorofila-a nos Recifes de Coral do Banco de Abrolhos. Trabalho apresentado em Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.
- Minatti, E., Ribeiro, A. A., Encina, C. C. C., Paranhos Filho, A. C., 2023. Mutli-temporal analysus of satellite and NDVI images in a conservation unit. *Research, Society and Development*, [Online] 12. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.40839>. Acesso em: 15 out. 2023.
- Monteiro, N. B. D. C., 2020. Aprendizagem de máquina na estimativa de clorofila-a via sensoriamento remoto. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/218122>. Acesso em 20 set. 2023.
- Oliveira, G. M. T. da S. de., 2023. Avaliação da concentração de nutrientes, metais pesados e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos nos sedimentos de fundo do lago água preta (Belém- Pará). [Repositorio.ufra.edu.br](http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1885). <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1885>
- Oliveira, M., Oliveira, M., 1999. Investigações cognitivas. Artmed.
- Pereira, E. da S., Souza, R. dos A. de, Silva, N. R. da, Webler, A. D., Hurtado, F. B., 2020. Eutrofização e mudanças no regime hidrológico: um risco na bacia do Rio Urupá, Amazônia brasileira. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, [Online] 11. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0043>. Acesso em: 15 set 2022.
- Queiroz, T. M. de, Melo, M. T. de., 2017. Índices de qualidade da água do riacho queima pé no município de Tangará da Serra/MT, região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, [Online] 8. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/spc2179-6858.2017.004.0007>. Acesso em: 25 set. 2022.
- Ribeiro, H. M.C., Cruz, L.D.F., Picanço, A.R.S. Morales, G.P., 2014. Avaliação de recursos hídricos a partir de indicadores de qualidade de água e níveis de btrx na região portuária de Belém. *Rev. So.debras*. 9.
- Sayers, M. J., Bosse, K. R., Shuchman, R. A., Ruberg, S. A., Fahnenstiel, G. L., Leshkevich, G. A., Stuart, D. G., Johengen, T. H., Burtner, A. M., Palladino, D., 2019. Spatial and temporal variability of inherent and apparent optical properties in western Lake Erie: Implications for water quality remote sensing. *Journal of Great Lakes Research*, [Online] 45. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.03.011>. Acesso em: 26 set. 2022.
- Serbeto, L. F., Mendes, G., Ribeiro, C. B. de M., Pereira, R. de O., 2021. Determinação da Concentração de Clorofila-a por Sensoriamento Remoto no Reservatório de Chapéu d'Úvas (MG), Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [Online] 14. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3583-3598>. Acesso em 14 ago. 2022.
- Silva, J. P., Mesquita, K. F. C., Pereira, J. A. R., Sousa, R. R. de, Varela, A. W. P., Sousa, P. H. C., Santos, R. M., Santos, M. de L. S., 2020. Índices de qualidade da água no sistema de captação de água da região amazônica (Brasil). *Scientia Plena*, [Online] 15. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.124301>. 20 jun. 2022.
- Silva, V. A. B. da., 2018. Cooperação internacional para proteção e utilização sustentável dos recursos hídricos da bacia amazônica. [Repositorio.uninter.com](http://repositorio.uninter.com). <https://repositorio.uninter.com/handle/1/253>
- SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2022. Diagnostico Temático Gestão Técnica de Esgoto.

- http://antigo.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/diagnostico_tematico_gestao_tecnica_de_esgoto_ae_snis_2022.pdf.
- Soares de Souza, D., Oliveira da Silva Araújo, R. C., Vera-Sousa, M., de São Pedro Filho, F., Aguilar Madeira, M. J., Soares de Souza, D., Oliveira da Silva Araújo, R. C., Vera-Sousa, M., de São Pedro Filho, F., Aguilar Madeira, M. J., 2017. Estudo Socioambiental na Amazônia Brasileira com foco na Qualidade da Água. *Revista Internacional de Investigación En Ciencias Sociales*, [Online] 13. Disponível em: <https://doi.org/10.18004/riics.2017.julio.76-92>. Acesso em: 24 set. 2022.
- Stager, J. C., Wiltse, B., Hubeny, J. B., Yankowsky, E., Nardelli, D., Primack, R., 2018. Climate variability and cultural eutrophication at Walden Pond (Massachusetts, USA) during the last 1800 years. *PLOS ONE*, [Online] 13. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191755>. Acesso em: 12 ago. 2022.
- Streit, N. M., Canterle, L. P., Canto, M. W. do, Hecktheuer, L. H. H., 2005. As clorofilas. *Ciência Rural*, [Online] 35. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782005000300043>. Acesso em: 02 ago. 2022.
- Valerio, L., Kampel, M., Gaeta, S., 2015. Análise comparativa da concentração de clorofila-a estimada pelo sensor MODIS-Aqua e medidas in situ no litoral norte de São Paulo: Estação Antares-Ubatuba. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1109.pdf>.
- Vásquez, R., Enrique, C., 2019. Eficiencia del jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*) para la depuración del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales del Distrito de Copallin, Provincia de Bagua, Región Amazonas. *Repositorio.untrm.edu.pe*. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1685>.
- Vieira Barreto, L., Mariani Barros, F., Bonomo, P., Rocha, F., Da, J., Amorim, S., 2013. Eutrofização em Rios Brasileiros. <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/biologicas/eutrofizacao.pdf>.