



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Variações Espaço Temporais Da Qualidade Da Água Do Reservatório Da Usina Hidrelétrica De Tucuruí, Pará, Brasil

Valéria de Figueiredo Botelho¹; Gundisalvo Piratoba Morales²; Altem Nascimento Pontes³

¹Mestre em Ciências Ambientais, Universidade Estadual do Estado Pará, botelho.airelav@gmail.com

²Doutor em Geologia e Geoquímica, Universidade do Estado do Pará, gundymorales@gmail.com

³Doutor em Ciências Físicas, Universidade do Estado do Pará, altempontes@gmail.com

Artigo recebido em 25/06/2024 e aceito em 05/11/2024

RESUMO

Estudos sobre a qualidade dos corpos d'água são essenciais para entender os impactos das atividades humanas no meio ambiente. Este estudo objetiva avaliar a influência das variações sazonais sobre a qualidade da água no reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT), no Pará, bem como nos pontos localizados a montante e a jusante da barragem. A pesquisa buscou identificar os padrões de variação dos parâmetros de qualidade da água em diferentes estações do ano (chuvoso e seco), fornecendo subsídios para o monitoramento e a gestão ambiental da região. A metodologia adotou uma análise dos dados e elaboração de mapas por interpolação espacial para identificar a variação espaço-sazonal nos parâmetros físico-químicos (temperatura, oxigênio dissolvido, turbidez, condutividade elétrica, pH e cloreto), conforme a resolução CONAMA 357/2005. Utilizou-se também a Análise de Componentes Principais (ACP) na avaliação desses parâmetros. Em síntese, os resultados mostraram que, apesar de a qualidade da água permanecer dentro dos limites estabelecidos pela resolução, houve variações sazonais significativas. Na estação chuvosa, observou-se aumento de turbidez a montante, enquanto a temperatura e o oxigênio dissolvido foram menores na região central sul do lago. A condutividade elétrica e o pH diminuíram na região central norte e sul, respectivamente, assim como valores de cloreto. Na estação seca, a temperatura, oxigênio dissolvido a jusante, condutividade elétrica a montante, pH na região sul e os valores de cloreto aumentaram, mas permaneceram abaixo dos limites legislados. A análise estatística indicou que, na estação chuvosa, as componentes principais PC1, PC2 e PC3 representaram 77,4% da variabilidade, com pontos a jusante apresentando características semelhantes. Na estação seca, PC1 e PC2 totalizaram 70,7%, evidenciando boa correlação na identificação dos grupos de pontos a jusante, montante e no interior da UHT. O monitoramento contínuo da qualidade da água é essencial para compreender e responder às variações sazonais no reservatório da UHT.

Palavras-Chave: Barragens; Energia hidrelétrica; Parâmetros físico-químicos; Recursos hídricos.

Spatiotemporal Variations in Water Quality in the Reservoir of the Tucuruí Hydroelectric Plant, Pará, Brazil

ABSTRACT

Studies on the quality of water bodies are essential to understand the impacts of human activities on the environment. This study aims to assess the influence of seasonal variations on water quality in the reservoir of the Tucuruí Hydroelectric Power Plant (UHT), in Pará, as well as at points located upstream and downstream of the dam. The research sought to identify the patterns of variation in water quality parameters in different seasons of the year (rainy and dry), providing subsidies for environmental monitoring and management in the region. The methodology used data analysis and mapping by spatial interpolation to identify the spatial-seasonal variation in the physical-chemical parameters (temperature, dissolved oxygen, turbidity, electrical conductivity, pH and chloride), in accordance with CONAMA resolution 357/2005. Principal Component Analysis (PCA) was also used to evaluate these parameters. In summary, the results showed that although water quality remained within the limits set by the resolution, there were significant seasonal variations. In the rainy season, there was an increase in turbidity upstream, while temperature and dissolved oxygen were lower in the south central region of the lake. Electrical conductivity and pH decreased in the north and south central regions, respectively, as did chloride values. In the dry season, temperature, dissolved oxygen downstream, electrical conductivity upstream, pH in the southern region and chloride values increased, but remained below the legislated limits. Statistical analysis indicated that, in the rainy season, the principal components PC1, PC2 and PC3 accounted for 77.4% of the variability, with downstream points showing similar characteristics. In the dry season, PC1 and PC2 accounted for 70.7%, showing good correlation in identifying groups of points downstream, upstream and inside the UHT.

Keywords: Dams; Hydroelectric power; Physicochemical parameters; Water resources.

Introdução

A água representa um recurso de grande relevância para a sobrevivência da vida humana, sendo essencial para uma variedade de finalidades, destacando-se o abastecimento humano, o uso industrial, a irrigação, a geração de energia elétrica e as atividades de lazer e recreação (Castro, 2022). Segundo Anteneh et al. (2018), as águas superficiais estão altamente expostas à poluição e as descargas de águas residuais, o que as tornam mais suscetíveis à contaminação, levando a um declínio geral na qualidade da água.

De um modo geral, o aproveitamento dos recursos hídricos para a geração de energia passa pela concepção de barragens e reservatórios artificiais com grandes capacidades de armazenamento, promovendo a flexibilidade necessária para satisfazer as necessidades energéticas e diversificar os usos (Tundisi, 2018). Santos et al. (2018) explicam que um grande desafio na promoção de políticas energéticas sustentáveis é fornecer níveis mais elevados de serviços de energia e, ao mesmo tempo, reduzir a poluição ambiental e a qualidade da água. Comparadas aos países desenvolvidos, as hidrelétricas brasileiras geram 77% da eletricidade do país. A Amazônia brasileira detém 42,2% do potencial hidrelétrico do Brasil (Gauthier & Moran, 2018).

As usinas hidrelétricas desempenham um papel fundamental no abastecimento de energia no Brasil, que possui um dos maiores potenciais hidrelétricos do planeta. No país, a energia proveniente de fontes hidráulicas representa 71% da matriz energética, enquanto a média global é de apenas 17% (Brasil, 2020). Li et al. (2019) ressaltam que embora os reservatórios desempenhem um papel crucial para a sociedade devido aos seus múltiplos usos, sua construção acarreta diversos impactos socioambientais, incluindo mudanças na estrutura das comunidades aquáticas.

A barragem de Tucuruí tem 11 km de extensão e 78 m de altura, com o nível da água variando de 58 a 72 m de acordo com a estação. Seu reservatório cobre uma área de 2.850 km² quando cheio, com cerca de 0,341 km² por MW instalado. Em níveis mínimos de água (62 m), a área alagada reduz em cerca de 560 km². O rio que a abastece tem uma vazão média de 11.000 m³/s, com um pico registrado de 68.400 m³/s em março de 1980 (Eletricidade, 2020).

Mascoli Junior et al. (2020) relatam que as atividades antrópicas suscitam a degradação da qualidade da água dos corpos hídricos. Portanto, é essencial avaliar parâmetros físicos, químicos e biológicos para gerenciar adequadamente os recursos hídricos, implementar medidas de mitigação e programas governamentais

parapreservar a qualidade ambiental e manter um monitoramento constante dos corpos d'água.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº. 357/2005, classifica corpos hídricos e seus usos, considerando a qualidade da água, e o Ministério da Saúde, com a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece indicadores para garantir a qualidade da água para consumo humano (Conama, 2021). Ambas as legislações definem limites máximos para parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, visando à gestão e à redução dos impactos nos recursos hídricos, conforme mencionado em estudos de Abreu et al. (2015) e Chaves et al. (2020).

As variações espaço-temporais da qualidade da água em reservatórios de usinas hidrelétricas têm implicações diretas na saúde ecológica, na qualidade da água para consumo e nos processos de geração de energia. Para isso, é necessária uma gestão integrada e sustentável, para garantir a manutenção da qualidade da água e a conservação dos ecossistemas aquáticos (Dodds & Whiles, 2020).

No contexto, de acordo com Costa et al. (2022), pesquisas comprovam a correlação entre alterações no uso e cobertura da terra e a qualidade das águas que compõem uma mesma bacia, indicando sobretudo, os múltiplos fatores tendem a afetar a qualidade de suas águas, nos mais diversos tipos poluentes, como aqueles advindo da agricultura e urbanos.

Portanto, o monitoramento periódico de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos em corpos d'água, levando em consideração as variações espaço-sazonais, desempenha um papel essencial na avaliação da qualidade ambiental. Isso é crucial para a preservação e administração eficaz desses ecossistemas, sendo uma atividade estratégica de grande importância. Nesse contexto, o objetivo da pesquisa foi investigar como as variações sazonais influenciam a qualidade da água no reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) assim como seus pontos a montante e a jusante.

Material e métodos

Área de estudo

A construção da UHT, situada no sudeste do estado do Pará, teve início em 1975, durante o período do regime militar no Brasil, com o propósito de atender a interesses políticos e capitalistas (Oliveira et al., 2023). Conforme esses autores, seu término ocorreu em 1984 sendo reconhecida como a segunda maior hidrelétrica de produção exclusivamente brasileira e a sexta entre as maiores do mundo. A UHT possui uma extensa massa d'água, estendendo-se por 200 km a montante do barramento e seu reservatório apresenta um volume aproximado

de 50,8 milhões de m³, com uma notável vazão de água de 110.000 m³/s, alcançando sua cota máxima

a 74 m. A Figura 1 apresenta um mapa da área de estudo.

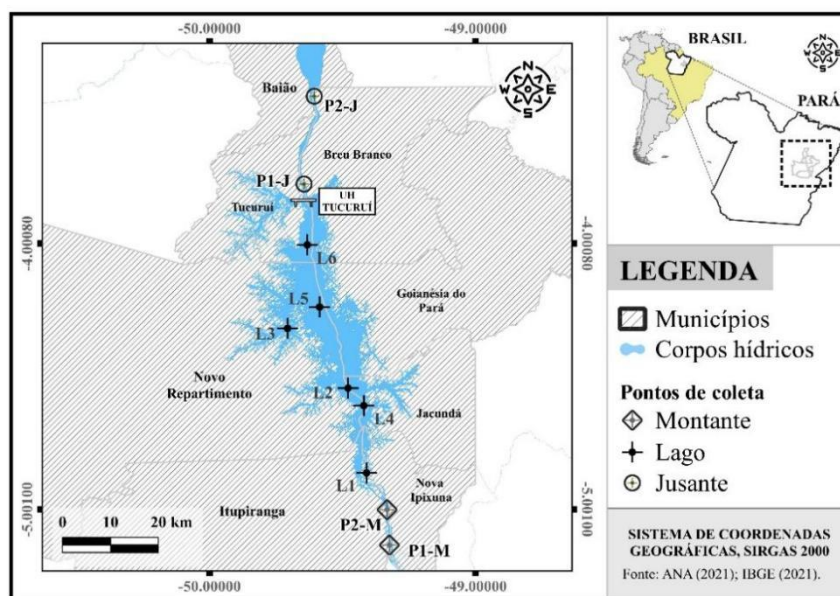


Figura 1. Mapa de localização da usina hidrelétrica de Tucuruí, Pará e identificação dos pontos de coleta.

De acordo com Hoffmann et al. (2018), a região de Tucuruí apresenta características geológicas distintas, sendo caracterizada por colinas baixas escarpadas que exibem ravinas e vales. A composição predominante dessas formações é de rochas magmáticas, com a porção setentrional exibindo a presença de arenitos e a região de Carapicó composta por rochas metamórficas. Os autores também observam que a geomorfologia do município de Tucuruí é marcada por uma topografia acidentada, com altitudes variando de 30 a 300 m.

A região da UHT apresenta uma média anual de precipitação em torno de 2.500 mm. O padrão de chuvas nessa área é caracterizado por um período chuvoso que se estende de dezembro a maio, seguido por uma temporada menos chuvosa nos meses de junho a novembro. A temperatura média anual na região gira em torno de 26 °C.

Na sub-região hidrográfica do Tocantins, o rio Tocantins percorre um pouco mais de 440 km de extensão, situando-se integralmente no estado do Pará, desde São João do Araguaia até sua desembocadura na foz do rio Anapu. O curso principal do Tocantins foi amplamente transformado em um extenso lago devido à represa de Tucuruí, sendo preservado apenas o trecho imediatamente a jusante da barragem até a fronteira com o município de Baião. Os grandes afluentes, como os rios Pucuruí, Repartimento e Caripé, tiveram partes significativas de seus baixos cursos inundadas pelo impacto da represa.

A cobertura do solo nos municípios da sub-região Tocantins é predominantemente composta por Floresta Ombrófila Densa Submontana. No que diz respeito ao uso e ocupação do solo, observa-se predominantemente atividades agrícolas e pecuárias.

Coleta, amostragem e análise da qualidade da água

Os dados de qualidade utilizados neste estudo foram adquiridos a partir do relatório de monitoramento da qualidade das águas do reservatório da UHT, assim como de seus pontos a montante e a jusante, disponibilizados pela Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará (SEMAS-PA). Os resultados desse monitoramento são arquivados no Núcleo Meteorológico e Hidrometeorológico (NMH) e podem ser acessados por meio do *site* do Hidromet.

Na seleção dos parâmetros de qualidade da água, priorizou-se aqueles mais representativos do ponto de vista sanitário e ambiental, comumente empregados em avaliações da qualidade hídrica. Adicionalmente, foram escolhidos os parâmetros que contavam com um maior volume de dados disponíveis no banco de dados consultado. Os parâmetros selecionados compreendem temperatura, turbidez, potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido (OD), alcalinidade, condutividade elétrica e cloreto.

As técnicas empregadas para amostragem, preservação e análise das amostras foram baseadas nos critérios estabelecidos na 23ª edição do *Standard Methods for the Examination of Water and*

Wastewater e seguiram as diretrizes estipuladas pela American Public Health Association (APHA, 2012).

Foram coletadas amostras em seis pontos no reservatório da UHT, assim como em dois pontos a

montante e dois pontos a jusante do reservatório da UHT, proporcionando uma visão abrangente da qualidade da água, como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas e localização dos pontos de amostragem, reservatório da usina hidrelétrica de Tucuruí, PA, montante e jusante.

Pontos	Município	Curso d'água	Latitude	Longitude
P1-M	Itupiranga	Tocantins	-5,00186	-49,33239
P2-M	Itupiranga	Tocantins	-5,13494	-49,32390
L 1	Itupiranga	Tocantins	-4,86365	-49,40939
L 2	Novo Repartimento	Tocantins	-4,54507	-49,47898
L 3	Novo Repartimento	Tocantins	-4,32030	-49,70663
L 4	Novo Repartimento	Tocantins	-4,61072	-49,41986
L 5	Novo Repartimento	Tocantins	-4,24012	-49,58617
L 6	Tucuruí	Tocantins	-4,00639	-49,63245
P1-J	Breu Branco	Tocantins	-3,77783	-49,64470
P2-J	Breu Branco	Tocantins	-3,44809	-49,60632

Quanto aos dados, estes foram registrados durante o período de 2019 a 2023, abrangendo um total de 10 campanhas de monitoramento. As campanhas foram conduzidas em dois períodos distintos: o período seco (agosto, setembro e outubro) e o período chuvoso (janeiro, fevereiro e

março). Após as análises, os dados das variáveis encontrados foram agrupados e formatados em planilhas eletrônicas e estão disponíveis no *site* da SEMAS-PA. As médias trabalhadas estão descritas na Tabela 2, por período seco e chuvoso.

Tabela 2 – Valores médios dos resultados dos parâmetros físico-químicos por estação seca e chuvosa dos anos de 2019-2023.

Pontos	Alcalinidade (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Condutividade Elétrica (µS/cm/L)	OD (mg/L)	pH	Temp (°C)	Turbidez (NTU)	Estação
L1	22,30	5,00	33,48	6,96	7,57	30,36	1,38	seco
L1	25,02	6,06	32,68	6,65	7,09	28,32	41,94	chuvoso
L2	18,17	10,33	34,82	6,68	7,32	30,37	1,55	seco
L2	22,22	5,96	32,09	6,29	6,92	29,45	14,18	chuvoso
L3	21,53	7,33	38,11	6,99	7,33	30,34	1,82	seco
L3	21,13	5,58	31,43	6,46	6,96	28,90	3,78	chuvoso
L4	18,55	6,33	36,06	6,75	7,28	30,31	1,52	seco
L4	20,50	5,86	32,90	6,32	6,81	28,27	20,92	chuvoso
L5	18,87	6,00	39,18	7,14	7,28	30,06	0,91	seco
L5	22,60	6,56	34,27	6,54	7,15	29,20	4,98	chuvoso
L6	18,37	9,33	36,85	7,08	7,23	29,64	1,61	seco
L6	21,28	6,58	30,28	6,65	7,04	28,83	4,97	chuvoso
P1-M	22,33	11,67	40,60	7,28	7,21	29,98	9,24	seco
P1-M	20,44	5,62	35,10	6,59	7,33	29,02	27,04	chuvoso
P2-M	23,17	9,00	42,04	7,12	6,98	30,03	10,24	seco
P2-M	21,44	5,38	37,77	6,46	7,34	28,73	29,86	chuvoso
P1-J	19,65	6,00	38,26	6,96	7,07	28,58	4,43	seco
P1-J	23,48	5,73	34,39	7,48	6,94	28,18	9,83	chuvoso
P2-J	20,53	7,00	40,48	7,12	7,03	28,96	4,77	seco
P2-J	22,15	5,00	36,13	6,94	6,99	28,99	9,34	chuvoso

Os resultados dos parâmetros de qualidade da água foram submetidos a uma comparação com os limites estabelecidos para águas de classe 2, conforme delineado pela Resolução CONAMA n.º

357, de 17 de março de 2005. A Tabela 3 descreve as variáveis físico-químicas de campo e de laboratório com suas respectivas metodologias de análise.

Tabela 3 – Variáveis físico-químicas e biológicas de campo e de laboratório com suas respectivas metodologias de análise.

Parâmetros	Sigla	Unidade	Método
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L O ₂	Sonda multiparamétrica AK88 - ASKO
pH	pH		
Temperatura	Temp.	°C	
Turbidez	Turb	UNT	
Alcalinidade	Al	mg/L	
Condutividade Elétrica	CE	µS/cmL	
Cloreto	CT	mg/L	

Análise estatística

A avaliação e monitoramento da qualidade da água é um dos aspectos mais importantes para garantir uma boa saúde ambiental. Vários métodos e modelos estatísticos têm sido utilizados para a avaliação da qualidade e quantidade das águas, dentre eles se destaca a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas que ajudam a identificar possíveis fatores e/ou fontes que influenciam os sistemas hídricos e oferecem uma ferramenta

robusta para o gerenciamento confiável dos recursos hídricos, bem como uma solução rápida para problemas de poluição em muitas partes do mundo (Centeno & Ceconello, 2018). Tais métodos estatísticos são apropriados para lidar com parâmetros múltiplos e variáveis que, quando combinadas, podem contribuir para a avaliação da qualidade da água (Li et al., 2018).

Interpolação Espacial

Com o intuito de obter a distribuição espacial das médias dos parâmetros físico-químicos durante os períodos de 2019 a 2023 na região especificada, foram utilizados os resultados encontrados tanto nos períodos chuvosos quanto nos períodos secos. Estes dados foram processados utilizando o software *Surfer Education* (versão 25) da *Golden Software*, que possui funcionalidades para a criação de mapas de contorno por meio da interpolação de dados de campo em uma malha regular.

O software empregou o método de Krigagem para realizar a interpolação das médias dos resultados dos parâmetros analisados. Esse método parte do princípio de que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais semelhantes do que pontos mais distantes, permitindo assim a geração de mapas que representam a distribuição espacial dos dados de forma mais precisa.

De acordo com Miranda et al. (2018), a interpolação espacial é um processo que visa estimar os valores de propriedades em locais não amostrados com base nos dados observados em locais conhecidos. Esse procedimento permite transformar um conjunto de valores pontuais, obtidos a partir de amostras de uma população, em uma superfície contínua na mesma escala dos valores da grandeza em análise.

Os métodos de interpolação espacial são utilizados para espacializar dados pontuais, possibilitando a transformação de um conjunto discreto de dados em uma superfície contínua. Isso permite a obtenção de valores em locais onde não há observações diretas, ampliando assim o entendimento da distribuição e variação espacial das variáveis em estudo.

Resultados e discussão

Caracterização físico-química da água do reservatório da UHT e seus pontos a montante e a jusante

Os resultados das análises dos parâmetros foram examinados e comparados com os valores verificados durante o período de 2019 a 2023, levando em consideração os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005. Neste contexto, a classificação padrão adotada foi a classe II para águas doces, uma vez que no Estado do Pará não há

um enquadramento específico definido para os corpos hídricos.

A Figura 2 representa a interpolação das médias dos valores de temperatura estimados para os períodos chuvoso e seco. A temperatura da água no reservatório apresentou variações ao longo dos anos, seguindo um padrão uniforme em todos os pontos com uma queda de temperatura durante o período chuvoso (Figura 2a), com médias variando de 29,45 °C a 28,18 °C, por outro lado, houve um aumento da temperatura durante o período seco (Figura 2b), quando o reservatório estava mais vazio, com médias variando de 30,37 °C a 28,58 °C.

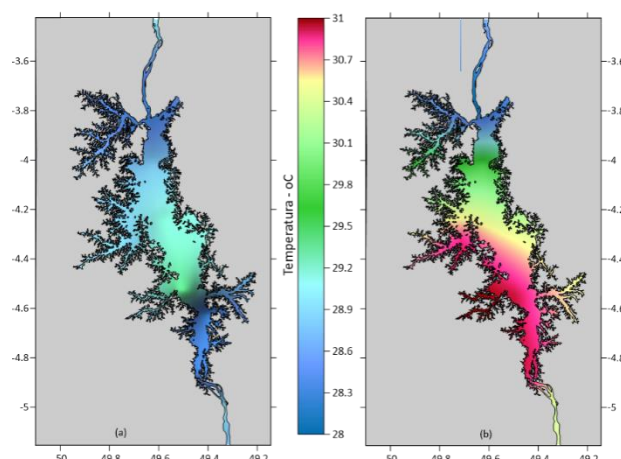


Figura 2 – Média dos valores de temperatura (°C), para estação chuvosa (a) e estação seca (b). Interpolação espacial para o período 2019-2023. Fonte: Autores (2024).

Observa-se um padrão de aumento de temperatura durante o período seco no reservatório e em suas áreas a montante. Esta variação pode ser atribuída a fatores como a redução do volume de água, que tende a absorver e reter mais calor, e possíveis influências climáticas locais. Kasper et al. (2014) em seus estudos no reservatório de Balbina encontrou resultados de temperatura similar a esse estudo, visto que a região amazônica não apresenta diferenças climáticas muito expressivas. A temperatura da água é suscetível a diversos fatores naturais, como variações sazonais, localização geográfica, fluxo e profundidade, além de intervenções humanas, como descargas de efluentes, represamento e desmatamento nas margens de rios ou igarapés.

Nos trabalhos de Chen et al. (2020) ao índice de qualidade da água superficial na Bacia Hidrográfica de Mitidja, Norte da Nigéria, observaram que as propriedades físicas e químicas da bacia têm heterogeneidade espacial óbvia, com diferenças significativas entre oito variáveis avaliada in loco, tais como para $\text{NH}_4\text{-N}$, BOD_5 , COD, SS, $\text{PO}_4\text{-P}$, DO e pH, muito por conta da grande presença de

assentamentos e terras agrícolas que tornam-se os fatores dominantes que levam à poluição do rio.

A Figura 3 ilustra a variação do oxigênio dissolvido nos períodos chuvoso e seco. Durante o período seco, o ponto P1-J registrou o maior valor de oxigênio dissolvido, atingindo 7,48 mg/L. O menor valor de OD, foi registrado na região central sul do lago (ponto L2), com 6,29 mg/L, durante o período chuvoso. Todos os valores de oxigênio dissolvido (OD) permaneceram dentro da classe 2 da Resolução CONAMA 357, que estabelece um mínimo de 5 mg/L. Durante o período menos chuvoso, a concentração de oxigênio na água aumenta devido à maior atividade dos organismos fotossintetizantes, aproveitando a penetração direta dos raios solares. Os estudos conduzidos por Nascimento et al. (2021) revelaram que os padrões de valores de oxigênio dissolvido (OD) nos reservatórios hidrelétricos amazônicos, incluindo o de Samuel no rio Jamari, são consistentes com as descobertas nesta pesquisa. Esses achados corroboram com os resultados obtidos por Paulo et al. (2020) na usina hidrelétrica de Curuá-Una, onde os níveis de OD permaneceram

dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357.

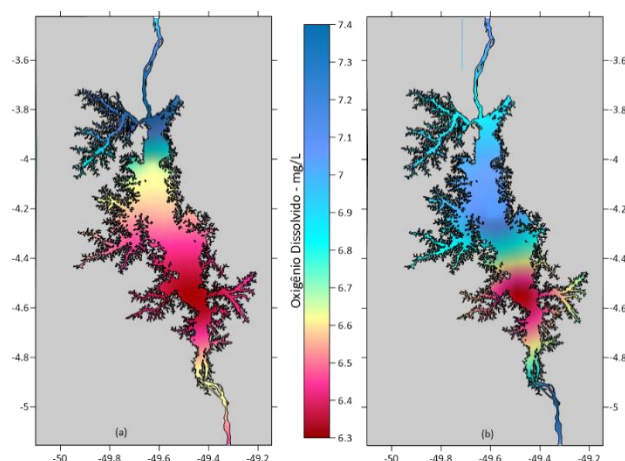


Figura 3 – Média dos valores de OD (mg/L), (a) estação chuvosa, (b) estação seca. Interpolação espacial para o período 2019-2023. Fonte: Autores (2024).

Outra característica inerente aos rios amazônicos é a turbidez, um parâmetro que pode ter origem tanto natural quanto antropogênica (CETESB, 2019). Esse indicador reflete o nível de interferência na penetração da luz através da água e, juntamente com outros parâmetros, pode sinalizar a presença de contaminação por organismos patogênicos (Piratoba et al., 2017; Nascimento et al., 2021).

A Figura 4 mostra que a turbidez permaneceu dentro dos valores aceitáveis para classe 2 da

Resolução CONAMA 375/2005 (até 100 UNT), evidenciando as boas condições da água do reservatório, apresentando valores de 0,91 UNT no período seco e 41,94 UNT no chuvoso. Segundo Cetesb (2009), durante as estações chuvosas, é comum observar um aumento na turbidez, o qual geralmente é causado pela movimentação de sedimentos em áreas rasas, erosão das margens devido à ausência de vegetação ripária e o transporte de folhas e galhos de árvores para dentro do corpo hídrico por influência dos ventos e da correnteza.

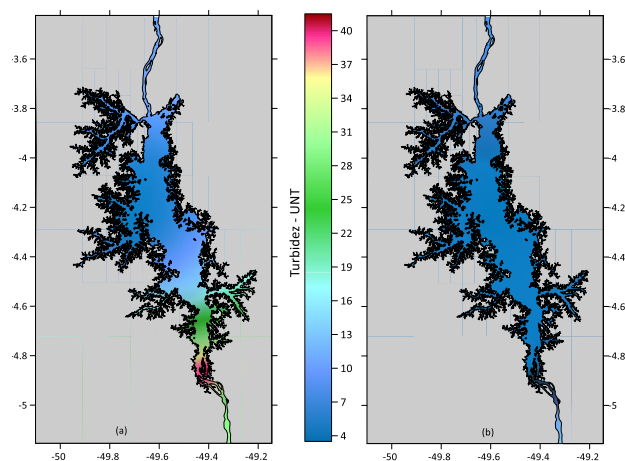


Figura 4 – Média dos valores de turbidez (UNT), (a) estação chuvosa, (b) estação seca. Interpolação espacial para o período 2019-2023. Fonte: Autores (2024).

É interessante observar que durante o período chuvoso houve um aumento na turbidez nas extremidades do reservatório à montante adentrando o reservatório. Segundo Cetesb (2009) esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento do fluxo do rio durante o período de chuvas, que pode transportar sedimentos e materiais em suspensão para o

reservatório. Os resultados do estudo realizado por Santos et al. (2020) no reservatório de Curuá-Una demonstram uma concordância significativa com os achados deste estudo em relação à variação sazonal da turbidez, com maiores valores no período chuvoso.

A condutividade elétrica é um parâmetro sensível à presença de íons dissolvidos, como sais, ácidos e bases nos corpos d'água, quando presentes na água doce encontram-se normalmente em quantidades relativamente pequenas, porém significativas, e originam-se da dissolução ou intemperização das rochas e solos (Nascimento et al., 2021). Valores elevados podem sugerir poluição por efluentes industriais, agrícolas ou domésticos,

enquanto valores baixos podem indicar água de boa qualidade com poucas impurezas dissolvidas (Piratoba et al., 2017; Tan et al., 2022). Existe uma correlação estatística entre a condutividade elétrica d'água e a concentração de substâncias ionizáveis. Nas regiões tropicais a condutividade está relacionada com as características geoquímicas da região e as condições, climáticas e sazonais (Figura 5) (Cunha et al., 2020).

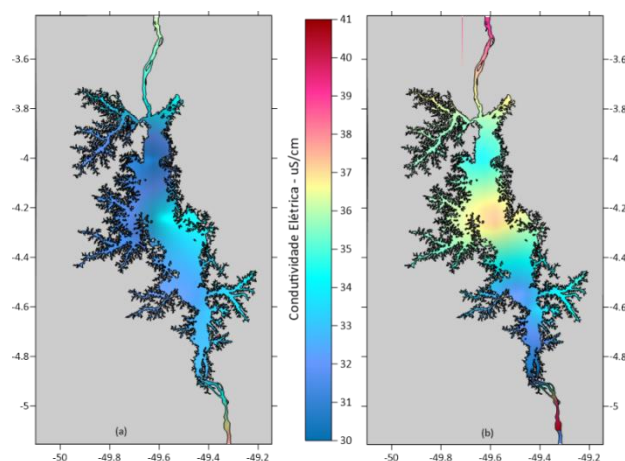


Figura 5 – Média dos valores de Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$.), (a) estação chuvosa, (b) estação seca. Interpolação espacial para o período 2019-2023. Fonte: Autores (2024).

Durante o período chuvoso, o menor valor médio de condutividade elétrica foi registrado na região central norte do lago (ponto L6), atingindo aproximadamente $30,28 \mu\text{S}/\text{cm}$. Esse valor pode ser influenciado pela diluição causada pelas chuvas, que tendem a reduzir a concentração de íons na água devido à entrada de água mais pura e à diluição dos contaminantes. Por outro lado, durante o período seco, observou-se o maior valor médio de condutividade elétrica na região a montante do lago (ponto P2-M), alcançando cerca de $42,04 \mu\text{S}/\text{cm}$. Esse aumento pode ser atribuído a diversos fatores, como a redução do volume de água disponível durante o período seco, o que pode levar a uma maior concentração de íons dissolvidos devido à evaporação e à menor diluição. Tendência semelhante foi encontrado por Nascimento et al. (2021) que ao estudar os parâmetros do reservatório de Belo Monte no Pará, encontrou valores de condutividade elétrica maiores para período seco quando comparado ao chuvoso, muito por conta devido a pós instalação da usina no rio Xingu promoveu alterações nas características limnológicas quando se leva em conta a variável sazonalidade.

As atividades humanas, como agricultura e urbanização, também podem contribuir para o aumento da condutividade elétrica, devido à introdução de produtos químicos e resíduos na água

(Chen et al., 2020). Apesar das variações observadas, os valores médios de condutividade elétrica permaneceram dentro dos padrões aceitáveis para a qualidade da água.

Os valores médios de pH não apresentaram oscilações significativas ao longo dos períodos chuvoso e seco, indicando uma relativa estabilidade desse parâmetro, conforme indica a Figura 6. Porém, a análise revelou diferenças sutis entre os pontos de amostragem e os períodos de coleta. Durante o período seco, o valor médio máximo de pH foi observado na região sul a montante (ponto L1), atingindo $\text{pH} = 7,57$, o qual esse valor pode ser influenciado por uma série de fatores, como a menor influência de águas pluviais e a presença de substâncias alcalinas na água, que podem elevar o pH. Por outro lado, durante o período chuvoso, o valor médio mínimo de pH foi registrado na região central sul do lago (ponto L4), com $\text{pH} = 6,81$. Essa leve redução no pH pode ser atribuída à influência das chuvas, que podem introduzir ácidos orgânicos e inorgânicos na água, resultando em uma diminuição temporária do pH (Tan et al., 2022). Freire et al. (2017), encontrou resultados semelhantes no reservatório de Tucuruí (7,17) durante esse mesmo período. A acidificação do pH durante o período chuvoso pode estar associada à disponibilidade de ácidos fulvicos e húmicos provenientes da matéria orgânica.

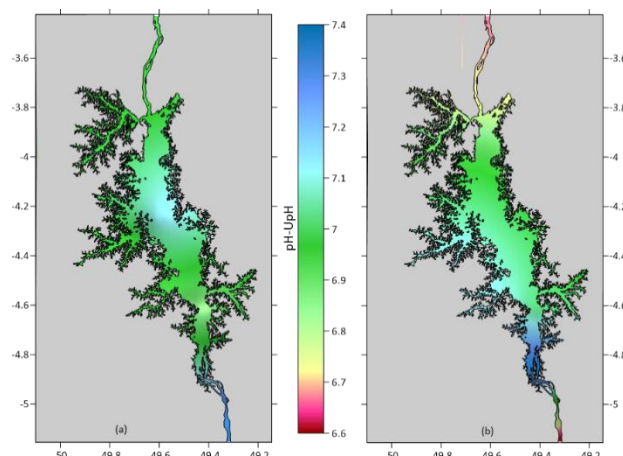


Figura 6 – Média dos valores de pH (UpH), (a) estação chuvosa, (b) estação seca. Interpolação espacial para o período 2019-2023. Fonte: Autores (2024).

Apesar dessas variações, todos os valores médios de pH permaneceram dentro da faixa de aceitação para águas classe 2 definida pela Resolução Conama 357/2005. O pH da água é um indicador importante da acidez ou alcalinidade, e variações fora da faixa adequada podem afetar a saúde dos organismos aquáticos e influenciar processos químicos e biológicos na água (Melo Junior et al., 2018).

De acordo Piratoba et al. (2017) o cloreto pode ter origem antrópica e geológica, sendo a lixiviação de rochas, esgotos domésticos e industriais a sua principal origem. O cloreto é um importante para a potabilidade da água, uma vez que em altas concentrações altera o sabor da água, tornando-a salgada e pode ocasionar problemas quanto à corrosão de tubulações hidráulicas (Freitas, 2017; Dodds & Whiles, 2020). Conforme a Resolução

CONAMA 357/2005, que estabelece os padrões de qualidade da água para o consumo humano e proteção da vida aquática, o limite máximo permitido para cloreto em águas de Classe 2 é de 250 mg/L. Os valores médios de cloreto permaneceram significativamente abaixo do valor legislado, com menores valores registrados na época Chuvosa nas regiões a montante, central e jusante, com teores variando de 5,0 a 5,96 mg/L (pontos L2, L3, L4, P1-J, P2-J, P1-M e P2-M). A concentração de Cloreto registrou um ligeiro aumento na época de seca, mudando de 5.0 a 11,67 mg/L, sendo a região a montante do barramento a área com maior teor de cloreto (pontos L2 e P1-M), conforme a Figura 7. Os resultados das análises indicam que as águas do reservatório estão em conformidade com a legislação para os dois períodos de coleta.

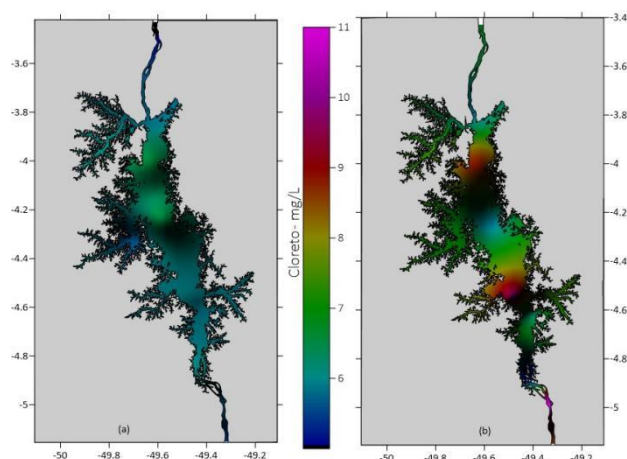


Figura 7 – Média dos valores de Cloreto (mg/L), (a) estação chuvosa, (b) estação seca. Interpolação espacial para o período 2018-2023. Fonte: Autores (2024).

Análise estatística dos dados do reservatório*Período chuvoso*

A Figura 8 apresenta a análise de componentes principais (PCA) dos pontos da amostra, para o período chuvoso. Esse resultado foi obtido a partir de uma matriz de (10 x 8), com as linhas representando os 10 pontos amostrais (2 a montante, 2 a jusante e 6 dentro do reservatório da UHT) e as colunas reproduzindo os 8 parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados, a saber: alcalinidade total, cloreto, sólidos totais, condutividade, oxigênio dissolvido, pH, temperatura da água e turbidez. Os dados amostrados dos autovalores e autovetores da

matriz de correlação apresentou um valor de PC1 = 30,9%, PC2 = 26,0% e PC3 = 20,4%, cuja soma das três componentes principais é igual a 77,4%, o que indica uma boa correlação entre as variáveis em estudo. Esses resultados demonstram que os pontos a jusante apresentam características semelhantes como era de se esperar, mas o que chama atenção é o ponto P1, interno à UHT, apresentar características mais semelhantes aos pontos à montante do reservatório. Isso se justifica devido à proximidade destes pontos.

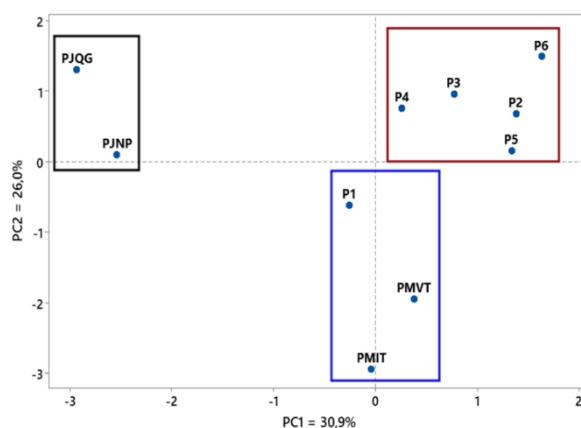


Figura 8 – Análise de componentes principais (ACP) dos pontos da amostra, para a estação chuvosa. Fonte: Autores (2024).

Na perspectiva de confirmar os resultados obtidos na Figura 8, implementou-se a elaboração do dendrograma dos pontos da amostra obtido a partir da análise de agrupamento hierárquico (HCA), para o período chuvoso, conforme indica a Figura 9. Os resultados descritos na HCA (Figura 9) confirmam

de forma inequívoca aqueles obtidos pela PCA (Figura 8), considerando a formação de 3 grupos, um para jusante, um para montante e outro para os pontos internos à UHT. Além disso, o dendrograma mostra claramente a formação do grupo à montante em conjunto com o ponto P1.

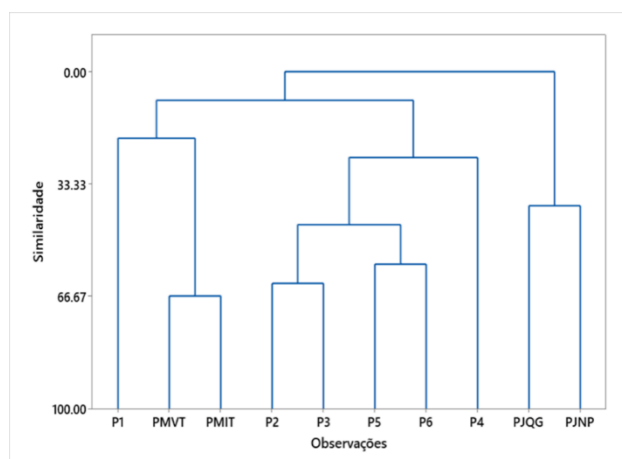


Figura 9 – Pontos de amostragem obtidos por meio da análise de agrupamento hierárquico (HCA), para a estação chuvosa. Fonte: Autores, 2024.

Período seco

O procedimento metodológico empregado no procedimento para a obtenção da PCA o período chuvoso foi replicado para o período seco (Figura 10). Neste caso, a matriz de correlação de autovalores e autovetores indicou para as PC1 = 47,9% e PC2 = 22,8%, cuja soma destas

componentes deu um total de 70,7%, indicando uma boa correlação entre as variáveis da matriz (10 x 8). No período seco a PCA foi capaz de identificar os três grupos de pontos medidos a jusante, a montante e no interior da UHT.

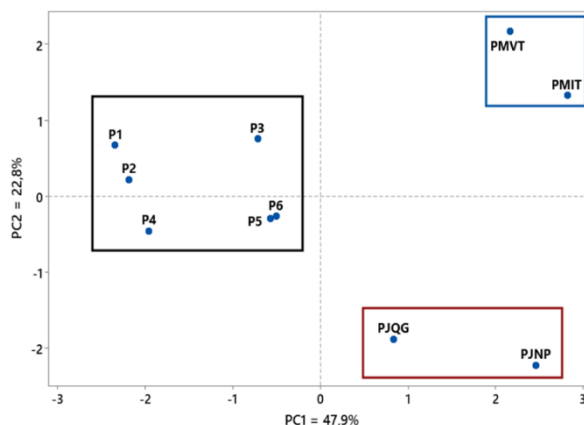


Figura 10 – Análise de componentes principais (ACP) dos pontos da amostra, para a estação seca. Fonte: Autores, 2024.

O dendrograma dos pontos da amostra obtido a partir da HCA (Figura 11) demonstra a formação de três grupos (a jusante, a montante e interno à UHT), confirmando assim o resultado já descrito na PCA da

Figura 10. No período seco os parâmetros físico-químicos da água conseguem ser diferenciados para os três ambientes amostrados, indicando que cada local apresenta características próprias.

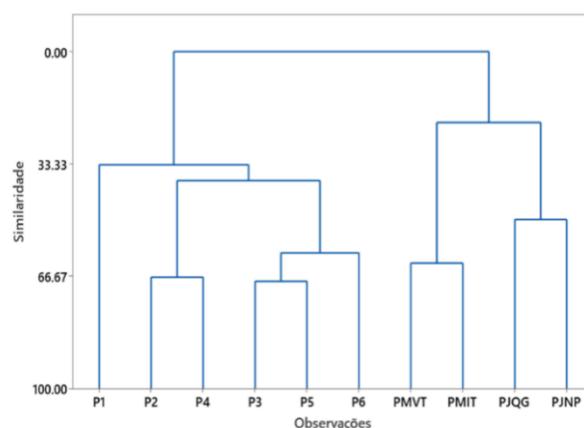


Figura 11 – Pontos de amostragem obtidos por meio da análise de agrupamento hierárquico (HCA), para a estação seca.

Nos estudos de Christofaro et al. (2017) ao realizar variações espaço-temporais da qualidade da água no reservatório Nova Ponte, Bacia do Rio Araguari, Brasil, as análises da PCA demonstraram mudanças temporais na qualidade da água em todos os grupos, ilustrando modificações na importância dos parâmetros ao longo do tempo na região. A mesma técnica também revelou que as principais

causas da deterioração da água de 1995 a 2005 estavam relacionadas às atividades agrícolas e pecuárias.

Considerações Finais

A pesquisa revelou que o reservatório apresenta variações significativas nos parâmetros de qualidade da água ao longo do tempo e do espaço,

influenciadas principalmente pela sazonalidade (estação chuvosa e seca) e pela localização dos pontos de amostragem (montante, jusante e dentro do reservatório).

A análise temporal indicou que na estação chuvosa foi caracterizado por maior turbidez e aumento no transporte de sedimentos, enquanto na estação seca observou-se elevação na temperatura da água e diminuição nos níveis de oxigênio dissolvido, possivelmente devido à menor movimentação da água e à maior exposição solar.

A análise espacial destacou a importância das características geográficas e hidrodinâmicas nos diferentes pontos de coleta, evidenciando que os parâmetros variam consideravelmente conforme a localização.

Já a análise estatística, por meio de técnicas multivariadas como ACP e HCA, identificou padrões claros entre os diferentes pontos de amostragem, sugerindo três agrupamentos principais: a montante, a jusante e dentro do reservatório, o qual mostram que há uma clara distinção entre os pontos a montante, a jusante e internos ao reservatório, com características físico-

químicas próprias para cada ambiente, tanto na estação seca quanto na chuvosa.

Esses resultados fornecem informações valiosas para a gestão do reservatório e podem servir de base para a implementação de políticas de monitoramento e mitigação dos impactos ambientais. A análise multivariada, em particular, mostrou-se eficaz para correlacionar parâmetros e identificar padrões, reforçando a necessidade de um monitoramento contínuo e integrado para garantir a preservação da qualidade da água e a sustentabilidade do ecossistema.

Portanto, a pesquisa reforça a importância do monitoramento contínuo dos parâmetros físicos, químicos e biológicos para garantir a preservação dos recursos hídricos e a sustentabilidade dos usos múltiplos do reservatório, em especial para a geração de energia e manutenção da qualidade ambiental. O uso de ferramentas estatísticas como a PCA e HCA auxilia na compreensão das dinâmicas espaciais e temporais, permitindo uma gestão mais eficiente dos corpos hídricos frente aos desafios ambientais e climáticos.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Estado do Pará. Agradecemos também a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS/PARÁ) e ao Núcleo de Monitoramento Hidrometeorológico (NMH/SEMAS).

Referências

- Abreu, C. H. M. de, & da Cunha, A. C. (2015). Qualidade da água em ecossistemas aquáticos tropicais sob impactos ambientais no baixo Rio Jari-AP: Revisão descritiva. *Biota Amazônia*, 5(2), 119-131.
- American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (Vol. 22, pp. 125) ed. Washington D.C.: APHA.
- Anteneh, A., Alemayehu, T., Legesse, W., Tadesse, S., & Tesfaye, M. (2018). Assessment of surface water quality in Legedadie and Dire catchments, Central Ethiopia, using multivariate statistical analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 38(1), 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.05.005>
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energetica. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Brasília: MME/EPE, 2020. 393 p.
- Castro, C. N. de C. (2022). *Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica*. (Vol. 1, pp. 281). Publicar. https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11115/1/%C3%81gua_problemas_complexos.pdf
- Centeno, L. N., & Cecconello, S. T. (2018). Análise temporal da qualidade da água do Rio Tramandaí/RS. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 9(5), 99-105. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0010>
- Chaves, H. S., de Moraes, D. G., Dantas Filho, H. A., Dantas, K. D. G. F., Beirão, A. T. M., da Silva, K. P., & Carvalho, F. I. M. (2020). Aplicação estatística multivariada para a avaliação físico-química na qualidade da água subterrânea na cidade de Parauapebas (Sudeste do Estado do Pará). *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11(5), 261-272.

- Chen, D., Elhadj, A., Xu, H., Xu, X., Qiao, Z. (2020). A Study on the Relationship between Land Use Change and Water Quality of the Mitidja Watershed in Algeria Based on GIS and RS. *Sustainability*, 12(9), 3510-3522. <https://doi.org/10.3390/su12093510>
- Christofaro, C., Leão, M. M. D., Oliveira, S. C., Viana, D. T., Amorim, C. C., & Carvalho, M. D. (2017). Spatio-temporal variations of water quality in Nova Ponte Reservoir, Araguari River Basin, Brazil. *Water Science & Technology: Water Supply*, 17(6), 1507-1514. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/ws.2017.055>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). (2009). *Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem*. São Paulo.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). (2019). *Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2019*. São Paulo: CETESB.
- Costa, P. da, Barroso, G. R.; Oliveira, K. L. de; Starling, M. C. V. M., & Oliveira, S. (2022). Dinâmica espaço-temporal da qualidade das águas superficiais de dois grandes reservatórios de usinas hidrelétricas brasileiras. *Eng. Sanit. Ambient.* 27(5), 1-12. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210233>
- Cunha, D. P. R. da, Barbosa, D. M., Henrique, R., de Oliveira Silva, L. K., de Oliveira, R. C., Luz, J. M. Q., & da Silva Arruda, A. (2020). Uso de bioindicadores na avaliação da qualidade da água do município de Ipameri-Goiás. *Brazilian Journal of Development*, 6(12), 100812-100825.
- Dodds, W. K. & Whiles, M. R. (2020). Lakes and reservoirs: physiography. In: DODDS, W.K. (org.). *Freshwater ecology* Massachusetts: Academic Press, (Vol. 1, pp. 155-187).
- Freire, J. C. A., Hauser-Davis, R. A., da Costa Lobato, T., de Moraes, J. M., & de Oliveira, T. F. (2017). Influence of the Amazon hydrological regime on eutrophication indicators of a hydroelectric power plant reservoir. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 98(5), 677-681. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2030-9>
- Freitas, M. D. F. P. P. (2017). *Avaliação de variáveis físicas e de qualidade das águas em reservatórios de usinas hidrelétricas de Minas Gerais para gestão das águas do estado* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/IGCM-AQXNHT>
- Gauthier, C., & Moran, E. (2018). Public policy implementation and basic sanitation issues associated with hydroelectric projects in the Brazilian Amazon: Altamira and the Belo Monte dam. *Geoforum*, 97(1), 10-21.
- Hoffmann, E. L., Dallacort, R., Carvalho, M. A. C., Yamashita, O. M., & Barbieri, J. D. (2018). Variabilidade das chuvas no Sudeste da Amazôniparaense, Brasil (Rainfall variability in southeastern Amazonia, Paraense, Brazil). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(4), 1251-1263.
- Li, C., Gibbs, M., Chen, C., Wang, X., & Chen, X. (2018). A comparative assessment of Australia's Lower Lakes water quality under extreme drought and post-drought conditions using multivariate statistical techniques. *Journal of Cleaner Production*, 190(1), 1-13.
- LI, Z.; MA, J.; GUO, J.; PAERL, H.W.; BROOKES, J.D.; XIAO, Y.; FANG, F.; OUYANG, W.; LU, L. Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992–2016). *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 19, n. 3, p. 317-327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.08.005>
- Mascoli Junior, R., Anjos, R. C., Sousa, Y. de L. & Ribeiro, M. L. (2020). Análise Temporal da Qualidade da Água de Corpos Hídricos Urbanos. *Revista AIDIS De ingeniería Y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo Y práctica*, 13(2), 263–272. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.64563>
- Melo Júnior, A. S., Bento Filho, R. C., Papadopoli, G. U., Moraes, A. C., Hock, L. B. J., & Chirinos, G. J. (2018). Avaliação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em uma lagoa facultativa. *INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation*, 6(2), 300-319. <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovae/article/view/1876/1386>
- Memória da Eletricidade. (2020). Banco de Usinas – Usina Hidrelétrica de Tucuruí. <https://www.memoriadaeletricidade.com.br/acervo/4420/usina-hidreletrica-tucuruui>
- Miranda, G. H. B., Medeiros, N. G., Santos, A. P., & Santos, G. R. (2018). Análise de Qualidade de Amostragem e Interpolação na Geração de MDE. *Revista Brasileira de Cartografia*, 70(1), 226-257.
- Nascimento, A. C., Araújo, K., & Dias-Silva, K. (2021). Variação Espaço-Temporal e Correlatos das Variáveis Limnológicas do Rio Xingu a Montante da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, Altamira-PA. *Enciclopedia Biosfera*, 18(36), 347-360.

- <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2021B/variacao.pdf>
- Oliveira Cruz, L. de, de Aguiar Cavalcante, M. M., & Nascimento, F. R. do. (2023). Sismos Induzidos pelo Reservatório da UHE Tucuruí/PA - Primeira Aproximação ao Tema. *Geoconexões*, 1(15), 295-313.
- Piratoba, A. R. A., Ribeiro, H. M. C., Morales, G. P., & Gonçalves, W. G. e. (2017). Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, 12(3), 435-456. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1910>
- Santos, M. A., Damázio, J. M., Rogério, J. P., Amorin, M. A., Medeiros, A. M., Abreu, J. L. S., Maceira, M. E. P. & Melo, A. C.; Rosa, L. P. (2018). Estimates of GHG emissions by hydroelectric reservoirs: The Brazilian case. *Energy*, 133(2), 99-107.
- Santos, P. R. B., de Sousa, J. S. C., Sousa, K. N. S., de Melo, S., & Pereira, A. C. (2020). Variabilidade espacial-temporal da comunidade fitoplanctônica no reservatório da usina hidrelétrica de Curuá-Una. *Brazilian Journal of Development*, 6(7), 42632-42649.
- Tan, W., Zhang, J., Wu, J., Sheng, Y., Liu, X., Lei, M., & Zhang, Z. (2022). Correlation analysis of water temperature and dissolved oxygen based on water quality monitoring data. *Advances in Artificial Intelligence and Security*, 12(1), 340-352. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06761-7_28
- Tundisi, J. G. (2018). Reservoirs: new challenges for ecosystem studies and environmental management. *Water Security*, 4(5), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2018.09.001>