

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM  
INSTITUTO DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS – IFCHS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

CRISTIANE NUNES FERNANDES

**DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA NO LAGO DE  
BALBINA, PRESIDENTE FIGUEIREDO – AM**

MANAUS - AM

2024

**CRISTIANE NUNES FERNANDES**

**DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA NO LAGO DE  
BALBINA, PRESIDENTE FIGUEIREDO – AM**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, como nível de Mestrado, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Geografia, linha de pesquisa Domínios da Natureza na Amazônia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho

MANAUS - AM

2024

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

F363d Fernandes, Cristiane Nunes  
Dinâmica espacial e temporal da qualidade da água no lago de Balbina, Presidente Figueiredo – AM / Cristiane Nunes Fernandes . 2024  
76 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Rogério Ribeiro Marinho  
Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Rio Uatumã. 2. Parâmetros físico-químicos. 3. Concentração de sedimento suspenso. 4. Sensor MODIS. I. Fernandes, Rogério Ribeiro. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CRISTIANE NUNES FERNANDES

**DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA NO LAGO DE  
BALBINA, PRESIDENTE FIGUEIREDO – AM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia na Universidade Federal do Amazonas – UFAM, para obtenção do título de Mestre em Geografia.

**Aprovado em:** 19/06/2024

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho  
Presidente

---

Prof. Dr. Flávio Wachholz  
Membro Externo

---

Prof. Dr. Adorea Rebello da Cunha Albuquerque  
Membro Interno

Manaus-AM – 2024

Em memória dos meus pais, Nilson e Irineia

## Agradecimentos

Todo o meu agradecimento a Deus pela fé e força que recebi e que me manteve de pé para encarar o desafio do mestrado.

Também quero agradecer a minha família que foi meu alicerce, meu marido Edson e filhos Eva Maria e Estevão, por compreenderem a minha ausência quando foi necessário. As minhas irmãs Adriane, Nielcy e Victoria porque agora, mais do que nunca, precisávamos nos manter unidas.

As minhas amigas, Jacilane, Natália e Val, que sempre foram as minhas maiores incentivadoras a estudar. Aos amigos que fiz durante o curso até a conclusão de mais essa etapa e espero poder levar para o resto da minha vida, entre elas a Sayane e a Dani.

À Fundação de Amparo e Pesquisas do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro (POSGRAD UFAM Edição 2023/2024).

Ao projeto intitulado “AQUATUMÃ – Avaliação da qualidade d’água na Rebio Uatumã e Lago de Balbina por sensoriamento remoto” (Edital Nº 007/2021 - BIODIVERSA/FAPEAM) pela oportunidade de aprofundar esta pesquisa.

Ao Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM) pela disponibilização dos relatórios de análises físico-químicos.

Ao analista ambiental do ICMBio Gilmar Klein pelo apoio na pesquisa e permissão na entrada da Rebio Uatumã.

A Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPG-GEOG) pela oportunidade de ter sido selecionada neste curso.

Aos professores que proporcionaram momentos de aprendizagem e escuta, sempre compartilhando seus conhecimentos, em especial ao Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho, pela orientação dada, por ser tão paciente e compreensivo comigo ao longo da pesquisa.

Aos professores integrantes da banca julgadora desta pesquisa, Dra. Adorea Albuquerque e Dr. Flávio Wachholz, serei sempre grata pelos direcionamentos indicados.

## RESUMO

O Rio Uatumã é um importante tributário da margem esquerda do Rio Amazonas com extensa diversidade biológica e ecossistêmica. Sua paisagem é destacada pela presença de uma rica fauna e flora, com diversas espécies endêmicas e ameaçadas de extinção. O lago de Balbina se formou a partir do represamento deste rio pela construção da UHE Balbina finalizada em 1987, alterando de forma significativa as características físicas e químicas da água. Este trabalho teve como objetivo geral analisar a dinâmica espacial e temporal da qualidade da água no Lago de Balbina, Presidente Figueiredo – AM. Os objetivos específicos foram: i) analisar a variação espacial e temporal de parâmetros da qualidade da água na área de influência do Lago de Balbina; ii) estimar a concentração de sedimentos suspenso através de imagens do sensor MODIS; iii) Investigar a relação entre as transformações no espaço e a qualidade da água no Lago de Balbina. Dados dos laudos limnológicos do IPAAM foram utilizados para analisar aos parâmetros físico-químicos da água no lago de Balbina entre 2020 e 2021 em conjunto com dados da reflectância do sensor MODIS (2003-2017) para estimar a concentração de sedimento suspenso (CSS). Os resultados indicaram os seguintes valores médios anuais dos parâmetros físico-químico no Lago de Balbina: a) condutividade elétrica de 9,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; b) pH de 6,4; c) Oxigênio Dissolvido de 7,1 mg/L; d) turbidez de 1,6 NTU; e) Sólidos Totais Dissolvidos de 5,9 mg/L; f) Sólidos Totais em Suspensão de 3,3 mg/L; g) Sólidos Totais 6,2 mg/L. A CSS estimada com uso de imagens MODIS indicou média anual de 2,19 mg/L na UHE de Balbina, de 3,49 mg/L no Rio Uatumã a montante da UHE e de 6,33 mg/L no Rio Pitinga. As concentrações do material particulado em suspensão observadas indicam que na vazante ocorre uma maior retenção de sedimento suspenso à montante da UHE.

**Palavras-chave:** Rio Uatumã; Qualidade da Água; Concentração de sedimento suspenso; Sensor MODIS.

## ABSTRACT

The Uatumã River is a notable tributary situated on the left bank of the Amazon River. It is distinguished by its extensive biological and ecosystem diversity. The region is notable for its rich fauna and flora, which includes numerous endemic and endangered species. The formation of Balbina Lake was the result of the construction of the Balbina Hydroelectric Plant (UHE Balbina), which was completed in 1987. The construction of this dam significantly altered the physical and chemical properties of the water. This study sought to examine the spatial and temporal dynamics of water quality in Balbina Lake, situated in Presidente Figueiredo, Amazonas State, Brazil. The specific objectives were as follows: i) To analyze the spatial and temporal variation of water quality parameters in the area influenced by Balbina Lake; ii) To estimate the concentration of suspended sediments using MODIS sensor imagery; iii) To investigate the relationship between spatial transformations and water quality in Balbina Lake. To analyze the physicochemical parameters of the water in Balbina Lake from 2020 to 2021, limnological reports from the IPAAM were utilized in conjunction with MODIS sensor reflectance data (2003-2017) to estimate suspended sediment concentration (SSC). The results indicated the following annual average values for physicochemical parameters in Balbina Lake: (a) electrical conductivity of 9.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; (b) pH of 6.4; (c) dissolved oxygen of 7.1 mg/L. d) Turbidity of 1.6 NTU; e) Total dissolved solids of 5.9 mg/L; f) Total suspended solids of 3.3 mg/L; g) Total solids of 6.2 mg/L. The estimated SSC using MODIS imagery indicated an annual average of 2.19 mg/L in the Balbina UHE, 3.49 mg/L in the Uatumã River upstream of the UHE, and 6.33 mg/L in the Pitinga River. The observed concentrations of suspended particulate matter suggest that during the dry season, there is greater retention of suspended sediments upstream of the UHE.

**Keywords:** Uatumã River; Water Quality; Suspended sediment concentration; MODIS sensor.

## Lista de Figuras

Fig. 1: Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d'água) e sensor orbital.....	28
Fig. 2: Lago de Balbina antes e depois da UHE.....	33
Fig. 3: Geologia da Bacia Hidrográfica do Rio Uatumã .....	34
Fig. 4: Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Uatumã .....	35
Fig. 5: Declividade da Bacia do Rio Uatumã. ....	37
Fig. 6: Pedologia da Bacia Hidrográfica do Rio Uatumã .....	38
Fig. 7: Hidrografia da BH Rio Uatumã .....	39
Fig. 8: Nível médio mensal (Cota) da estação fluviométrica 16080000 no Rio Uatumã antes e depois da construção da UHE de Balbina. ....	40
Fig. 9: Cotograma (m) mensal do Lago de Balbina (1992-2022).....	41
Fig. 10: Área do Lago de Balbina (1992-2022).....	42
Fig. 11: Lago de Balbina no período da enchente.....	43
Fig. 12: Lago de Balbina no período da vazante. ....	43
Fig. 13: Média da precipitação (2008-2017).....	44
Fig. 14: Relação Cota x Área x Volume do Reservatório da UHE Balbina.....	45
Fig. 15: Vegetação na área de influência da UHE Balbina.....	46
Fig. 16: Localização dos pontos amostrais dos parâmetros físico-químicos. ....	48
Fig. 17: Localização dos pontos amostrais de CSS. ....	50
Fig. 18: Valores de Rrs da superfície d'água do Lago de Balbina.....	52
Fig. 19: Trabalho de campo.....	53
Fig. 20: Fluxograma dos procedimentos para análise dos parâmetros físico-químicos da água no lago de Balbina.....	54
Fig. 21: Fluxograma dos procedimentos para análise da CSS.....	55
Fig.22: Analise Raster, recurso disponível no ambiente da plataforma.....	56
Fig. 23: Amostragem valores do raster, recurso disponível no ambiente da plataforma.....	57

Fig. 25: Valores médios dos parâmetros de qualidade da água do Rio Uatumã a jusante da UHE de Balbina (2020 e 2021). .....	61
Fig. 26: Distribuição da CSS no Lago de Balbina.....	65
Fig. 27: Gráfico da CSS estimado mensal x Nível do lado de Balbina. ....	67
Fig. 28: Gráfico de dispersão da CSS estimada mensal x Cota média mensal do lago de Balbina na UHE.....	68
Fig. 29: Gráfico de dispersão da CSS estimada mensal na seção Montante x Cota do lago de Balbina.....	69
Fig. 30: Gráfico de dispersão da CSS estimada mensal x Cota na seção Pitinga. ...	69

## Lista de Quadros

Quadro 1: Características do Sensor MODIS.....	29
Quadro 2: Estações dos pontos amostrais dos parâmetros físico-químicos. ....	49
Quadro 3: Pontos amostrais de CSS. ....	50
Quadro 4: Imagens utilizadas e seus respectivos períodos hidrológicos. ....	53
Quadro 5: Valores de referência para parâmetros de qualidade da água.....	54

## Lista de Tabelas

Tab. 1: Área ocupada pelas grandes bacias hidrográficas brasileiras. ....	21
Tab. 2: Barragens existentes na Amazônia Legal brasileira com > 30 MW de capacidade instalada.....	25
Tab. 3: Distribuição das classes de declividade.....	36
Tab. 4: Estatística descritiva para as variáveis físico-químicas da água em superfície do Rio Uatumã à montante (2020 a 2021) da UHE Balbina.....	58
Tab. 5: Estatística descritiva para as variáveis físico-químicas da água em superfície do Rio Uatumã à jusante (2020 a 2021) da UHE Balbina. ....	60
Tab. 6: Variação dos parâmetros limnológicos no curso principal do Rio Uatumã, antes e depois da instalação da hidrelétrica de Balbina. ....	62
Tab. 7: Amplitude dos parâmetros físico-químicos, à montante e à jusante da UHE Balbina (2020-2021).....	63
Tab. 8: Estatística da CSS (mg/L) estimada média anual com uso de dados MODIS. ....	66

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
Objetivos.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	20
Paisagem e complexidade ambiental .....	20
Usinas Hidrelétricas na Amazônia .....	22
Sensoriamento remoto da água.....	26
O Sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) .....	29
3. ÁREA DE ESTUDO .....	32
Geologia e Geomorfologia.....	33
Classes de Solo.....	37
Hidrografia e Regime Hidrológico .....	38
Vegetação e clima .....	46
4. METODOLOGIA .....	48
Dados da qualidade da água e imagens MODIS.....	51
Trabalho de campo.....	53
Procedimentos de análise.....	53
5. RESULTADOS .....	58
A qualidade de água no Lago de Balbina, Presidente Figueiredo – AM.....	58
Dinâmica do Sedimento Suspenso no Lago de Balbina por Sensoriamento Remoto .....	64
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
7. REFERÊNCIAS .....	73
8. CRONOGRAMA .....	77

## Lista de Siglas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APA – Área de Proteção Ambiental

BH – Bacia Hidrográfica

CE – Condutividade Elétrica

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CSS – Concentração de Sedimento Suspenso

CSSS – concentração de sedimentos suspensos na superfície

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPAAM – Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas

MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

N<sub>2</sub>O – Óxido nitroso

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NBR – Norma Brasileira

NIR – *Near Infrared*

NTU - *Nephelometric Turbidity Unit*

OD – Oxigênio Dissolvido

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

pH – Potencial Hidrogeniônico

PIB – Produto Interno Bruto

PIM – Polo Industrial de Manaus

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

QGIS – Quantum GIS

REBIO – Reserva Biológica

RED – vermelho {traduzido pelo autor}

Rrs – Reflectância de Sensoriamento Remoto

SAR – *Synthetic Aperture Radar*

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

SR— Sensoriamento Remoto

ST – Sólidos Totais Suspensos

STS – Sólidos Totais Dissolvidos

UHE – Usina Hidrelétrica

USGS – United States Geological Survey

## 1. INTRODUÇÃO

Análises de interações dos parâmetros de qualidade d'água com a produção do espaço são essenciais para garantir o uso sustentável e a conservação dos recursos hídricos. Esse monitoramento pode ser realizado com instrumentos e técnicas, que incluem avaliações laboratoriais e de campo, sensores remotos e sistemas de informações geográficas (SIG).

As agências governamentais, órgãos de proteção ambiental e organizações de pesquisa desempenham um papel fundamental na coleta e análise de dados, bem como na formulação de políticas e regulamentos para os corpos d'água. Segundo Fassoni-Andrade e Paiva (2019) estudos em planícies aluviais mostraram que a origem da água afeta a ligação entre os sistemas fluviais e de várzea, bem como a composição da água nesses sistemas.

O monitoramento de variáveis da qualidade da água e suas tendências que identificam os problemas relacionados ao uso do solo ao longo do tempo ajudam na tomada de decisão e nas medidas corretivas, pois o comportamento dos indicadores demonstra a condição geral através de seus parâmetros físicos, químicos e biológicos.

A água desempenha um papel fundamental na vida para a sobrevivência de todas as espécies, e na economia, especialmente na indústria no qual a água é um recurso-chave em muitos processos industriais, como a produção de energia, a fabricação de produtos químicos, a refrigeração de equipamentos e a limpeza de instalações. Na agricultura e alimentação, a disponibilidade de água influencia diretamente na sua produção (Novo, Barbosa e Freitas, 2007, p. 265).

A bacia hidrográfica amazônica possui elevada biodiversidade e tem seu regime fluvial único e complexo, desempenhando um papel fundamental na ecologia e no clima regional. A periodicidade da subida e descida d'água dos rios na região pode ser entendida como um pulso de inundação, no qual o rio Solimões-Amazonas tem seu pico de cheia em maio/junho, enquanto nos afluentes Negro e Madeira, o pico de cheia ocorre em junho e abril, respectivamente (Fassoni-Andrade e Paiva, 2019).

Segundo Junk et. al (2020), o pulso de inundação conecta e desconecta as áreas alagáveis dos hidrossistemas ocorrendo, assim, uma oscilação entre fases aquáticas e terrestres que permite que organismos ocupem o mesmo habitat ao longo do ciclo hidrológico anual.

É crucial estudar as mudanças ambientais e dimensionar o transporte dos sedimentos em suspensão dos sistemas fluviais ao longo do tempo, sejam elas causadas por processos naturais, como variações climáticas, ou por ações antrópicas, como a construção de represas ou a urbanização de áreas ribeirinhas (Marinho, 2021). O Rio Uatumã possui essa situação emblemática, onde as intervenções humanas não levaram em conta os impactos ambientais e a tomada de decisões sobre esse recurso hídrico afetaram todo ecossistema fluvial daquela região.

Fontes (2010) considera que a fisiologia da paisagem é uma abordagem que examina os processos em curso, a dinâmica da forma da paisagem e o papel ativo do ser humano como um dos agentes desses processos. Isso significa que além de estudar os fenômenos naturais que moldam a paisagem, como erosão, sedimentação e mudanças no relevo, também se concentra nas atividades humanas e em como elas influenciam e interagem com esses processos naturais. Essa abordagem reconhece que as ações humanas, como agricultura, urbanização, mineração e construção de infraestrutura, têm um impacto significativo na paisagem, podendo alterar sua forma e função ao longo do tempo.

A Lei N° 9.433/97 estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) como um instrumento de gestão das águas no Brasil, pois a água é um bem de domínio público. A legislação reflete um esforço para regulamentar o uso da água, promover a sustentabilidade e enfrentar desafios relacionados à gestão hídrica, porém segundo Stevaux e Latrubesse (2017) apesar de ser uma legislação ambiental avançada a aplicação prática desses princípios na gestão de bacias específicas está aquém do desejado.

A importância da difusão científica se torna evidente, uma vez que os dados permanecem restritos a círculos especializados, deixando a sociedade em geral alheia às descobertas e à compreensão em evolução. Estabelecer uma conexão entre a pesquisa acadêmica e a conscientização pública e promover discussões sobre a importância da análise da qualidade da água, com base em variáveis físico-químicas, são essenciais para a gestão dos recursos hídricos e a conservação do ecossistema do lago de Balbina e seu entorno.

O uso do sensoriamento remoto auxilia na obtenção de dados complementares, seja por inacessibilidade local ou custos elevados para o deslocamento. As vantagens

de se aplicar técnicas relacionados ao sensoriamento remoto se mostra eficaz para monitoramento em larga escala e contínuo, com economia de tempo e previsão de resposta rápida, dependendo da revisita do sensor.

O sensoriamento remoto em estudos dos sistemas aquáticos é importante para compreender a dinâmica do regime hidrológico, bem como as propriedades ópticas da água e seus constituintes, utilizando sensores passivos e que operam com bandas multiespectrais na região espectral do visível e do infravermelho próximo (Barbosa et. al., 2019).

Esta pesquisa levanta as seguintes questões: i) É possível avaliar a qualidade da água do lago de Balbina por meio de parâmetros físicos e químicos, de modo a verificar se as condições são adequadas para o uso sustentável do recurso e o suporte aos hidrossistemas e à vida aquática? ii) É possível monitorar a dinâmica espaço-temporal da concentração de sedimentos suspensos na bacia hidrográfica do Rio Uatumã com o uso de sensoriamento remoto?

A manutenção da qualidade da água é de extrema importância para a manutenção da saúde humana e dos ecossistemas. Este tipo de pesquisa é importante para a preservação ambiental e para o funcionamento equilibrado dos ecossistemas aquáticos. A compreensão detalhada desses parâmetros não apenas fortalece a proteção da qualidade da água, mas também contribui significativamente para a mitigação dos impactos adversos sobre os ecossistemas fluviais.

A dissertação está estruturada em torno desse leque temático, abordando após a Introdução, um referencial teórico (Capítulo 2) sobre os principais conceitos de paisagem e complexidade ambiental com autores como Ab'Saber (1996) e Stevaux e Latrubesse (2017); Fearnside (2015) tratando sobre as Usinas Hidrelétricas na Amazônia e suas questões ambientais; Marinho (2021) e Barbosa et. al. (2019) contextualizando sobre o sensoriamento remoto da água e o Sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

O capítulo 3 trata sobre a área de estudo dando ênfase a geologia e geomorfologia, as tipos de solo, hidrografia e regime hidrológico, vegetação e clima. O capítulo 4 apresenta o conjunto de dados, a metodologia, o trabalho de campo realizado e os procedimentos de análise.

## **Objetivos**

A presente pesquisa teve como objetivo geral analisar a dinâmica espacial e temporal da qualidade da água no Lago de Balbina, Presidente Figueiredo – AM. Os objetivos específicos foram:

- Analisar a variação espacial e temporal de parâmetros da qualidade da água na área de influência do Lago de Balbina;
- Estimar a concentração de sedimentos suspensos através de imagens do sensor MODIS;
- Investigar a relação entre as transformações no espaço e a qualidade da água no Lago de Balbina.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### **Paisagem e complexidade ambiental**

A análise do espaço geográfico envolve as interações entre elementos variados da sociedade e da natureza. Para tanto, são empregadas categorias como lugar, paisagem, território, região e espaço. A compreensão da complexidade do ser humano, combinando aspectos biológicos e culturais, ganha destaque.

A paisagem amazônica refere-se ao ambiente geográfico distinto encontrado na Região Amazônica, uma vasta área na América do Sul, predominantemente coberta pela Floresta Amazônica, a maior floresta tropical contínua do mundo. Ela abrange vários países, incluindo Brasil, Peru, Colômbia, Venezuela, Equador, Bolívia, Guiana, Suriname e Guiana Francesa. Com uma rica biodiversidade, abriga uma vasta variedade de espécies de plantas, animais, insetos e micro-organismos, muitos deles endêmicos.

A paisagem refere-se à porção visual da superfície terrestre que é percebida pelos observadores. Ela incorpora elementos físicos, biológicos e culturais, criando uma composição única e interativa, não sendo apenas uma expressão estética, mas também reflete processos e interações dinâmicos. Nesse contexto, Ab'Saber (1996, p. 40) destaca:

o impacto visual provocado pelo encontro de uma paisagem de exceção no meio das densas e contínuas matas amazônicas possui foros de uma grande anomalia, que nos obriga a pesquisas cada vez mais aprofundadas e sutis sobre a fisiologia das paisagens desse grande domínio morfoclimático e biogeográfico das terras brasileiras.

A unidade de paisagem, um termo interdisciplinar dinâmico, é afetada por elementos como erosão na vertente e atividades humanas. À medida que a paisagem evolui, sua estrutura e composição se modificam ao longo do tempo, destacando a importância da análise para compreender os elementos físicos em constante alteração e suas implicações nas características futuras (Belém e Cabral, 2019).

A Geografia Física trata das características naturais da Terra, incluindo elementos como relevo, clima, vegetação, recursos naturais e hidrografia. Esses fatores geográficos têm um impacto direto nas atividades humanas e moldam a forma como as sociedades se estabelecem e se desenvolvem. Como Abreu (2016, p. 25) descreve: “A geografia, conhecida como física do mundo, colocou sob sua

responsabilidade a interpretação da dinâmica da natureza e de suas relações possíveis com a marcha histórica”.

A complexidade ambiental está sujeita à diversidade e à interconexão de componentes e processos em um ambiente, incluindo uma variedade de espécies, interações tróficas, ciclos biogeoquímicos e fatores abióticos, gerando desafios para a gestão, especialmente quando influenciada por atividades humanas.

A gestão eficaz da paisagem requer uma compreensão profunda dessa complexidade para garantir a preservação ambiental a longo prazo. A Geografia abraça uma abordagem mais abrangente, abrindo caminho para uma compreensão mais profunda e integrada do espaço geográfico e suas complexas interações.

Pinheiro et. al. (2010), enfatiza os desafios específicos enfrentados na tentativa de conservar ecossistemas dentro de áreas protegidas em contextos urbanos, destacando a necessidade de uma gestão eficaz para enfrentar essas dificuldades, referindo-se à proteção e preservação dos diferentes elementos naturais que compõem um ecossistema, incluindo fauna, flora, solo e processos ecológicos. A conservação visa manter a biodiversidade, os serviços ecossistêmicos e a integridade dos sistemas naturais.

Segundo Florenzano (2008), as bacias hidrográficas dos rios Amazonas e Paraná, com dimensões continentais (Tab. 1), exigem que haja uma difusão do conhecimento científico em prol de análises e métodos da dinâmica dos ambientes fluviais.

<b>Bacia hidrográfica</b>	<b>Área de drenagem (km<sup>2</sup>)</b>
<b>Amazonas – Brasil</b>	3.900.000
<b>Paraná – Brasil</b>	877.000
<b>Tocantins</b>	757.000
<b>São Francisco</b>	634.000
<b>Paraguai – Brasil</b>	368.000
<b>Parnaíba – Atlântico Norte</b>	242.000
<b>Total</b>	<b>6.778.000</b>

Tab. 1: Área ocupada pelas grandes bacias hidrográficas brasileiras. Fonte: Rebouças (2002). Adaptado de Florenzano (2008).

As alterações na rede de drenagem e o uso e ocupação da bacia impactam de forma direta e indireta na gestão dos recursos hídricos podendo ter efeitos significativos no funcionamento de uma região. Há uma necessidade de se conhecer o comportamento dos sistemas fluviais e as influências antrópicas que causam novas configurações dos rios.

Conforme destacado por Stevaux e Latrubesse (2017), a propagação dos impactos no sistema fluvial ocorre de forma significativa quando há regulação do fluxo de água em um curso d'água, seja por meio de barragens, represas ou outros dispositivos. Essa intervenção pode influenciar a dinâmica do rio tanto nas áreas localizadas acima (a montante) quanto nas regiões abaixo (a jusante). Essas intervenções podem alterar a quantidade e qualidade da água e a velocidade da corrente, impactando no transporte de sedimentos e perturbando o seu equilíbrio no sistema fluvial.

O fluxo hidrológico e sedimentológico dos rios são alterados pela agropecuária, urbanização e reservatórios, que quando são relacionados ao ajustamento de canais, faz-se necessário realizar pesquisas nesses campos para ajudar na preservação dos rios e no desenvolvimento sustentável (Morais e Montanher, 2022).

A falta de compreensão dos aspectos da fisiologia da paisagem e suas necessidades específicas para um manejo apropriado, incluindo como a paisagem opera e quais abordagens são necessárias para práticas agropecuárias ou florestas sustentáveis, revela uma lacuna no entendimento das estratégias fundamentais para assegurar a sustentabilidade da paisagem.

### **Usinas Hidrelétricas na Amazônia**

De acordo com Fearnside (2015, p. 98), a construção da Usina Hidrelétrica de Balbina iniciou-se com o intuito de fornecer energia a Manaus, porém esta cidade cresceu tanto a partir do Polo Industrial de Manaus (PIM) que foi necessário se pensar em alternativas para atender a demanda de energia. Sobre esta construção, Baldisseri (2005) também discorre:

Em 1972 é criada a Eletronorte (subsidiária da Eletrobrás) que viabilizou a realização de estudos hidroenergéticos e o planejamento e execução dos grandes empreendimentos hidrelétricos com enormes impactos econômicos,

sociais e ambientais para a Amazônia. É este cenário “desenvolvimentista”, que a construção de Balbina se legitima, sob a forte alegação de que a demanda de energia elétrica na cidade de Manaus aumentara consideravelmente, principalmente devido a criação da Zona Franca de Manaus (implantada no período de expansão da frente agrícola, em 1967), recaindo sobre o Estado a responsabilidade de criar a infraestrutura necessária ao suprimento da referida demanda. (Baldisseri, 2005, p. 1432).

Segundo Baldisseri (2005), a região onde o lago de Balbina se formou é caracterizada por uma predominância de declividade suave. Esse lago possui uma profundidade média de 7 metros, alcançando menos de 4 metros em aproximadamente 33% de sua área total de 2360 km<sup>2</sup>. Essa condição resulta em um transporte lento, prejudicando o sistema de drenagem, a implementação de estratégias para controlar cheias e vazantes, além de afetar o tempo de renovação da água e provocar o acúmulo de sedimentos a montante da barragem.

Conforme Stevaux e Latrubesse (2017), a influência que uma barragem exerce no sistema fluvial “varia de acordo com seu tamanho e a finalidade e com as características do próprio sistema”, o que no caso de Balbina nos remete ao fato de ser uma paisagem suavemente plana predominando em uma região onde a construção de uma UHE gerou impactos ambientais substanciais.

Quanto ao apoio para construção do Projeto de UHE Balbina, Baldisseri (2005, p. 1433) relata que, em 1984, a demanda crescente por energia elétrica no Distrito Industrial de Manaus motivou o Governo Figueiredo a expandir suas fontes, resultando na assinatura de contratos para a construção da represa de Balbina. Esse processo ocorreu sem debates públicos, desconsiderando os possíveis impactos ambientais, sociais e culturais. Além disso, a sociedade civil foi privada de informações sobre o projeto proposto.

Conforme Abril, et. al., (2013), os reservatórios de terras baixas da Amazônia com baixa densidade de potência podem emitir quantidades de gases de efeito estufa (GEE) semelhantes ou até maiores que os de uma fonte de usina de gás. Estudos constataram que a extensão das consequências negativas se deu até 200 km a jusante da barragem de Balbina, atingindo os municípios de Presidente Figueiredo, Itapiranga e São Sebastião do Uatumã, uma vez que tornou a água que passa pelas

turbinas anóxica, com oxigenação escassa, sem utilidade para a população (Baldisseri, 2005).

Reservatórios hidroelétricos potencializam o problema da grande quantidade de biomassa e modificam a configuração da paisagem quando inundam áreas de floresta. Segundo Belém e Cabral (2019), a exploração do meio ambiente, de fato, é uma atividade que gera um impacto significativo na região amazônica. Nessa área, a presença abundante de rios desempenha um papel crucial na produção de energia elétrica para o país, por meio de Usinas Hidrelétricas (UHE), especialmente a construção do reservatório, como de Tucuruí e Belo Monte no Pará, Samuel, Jirau e Santo Antônio em Rondônia e de Ferreira Gomes e Santo Antônio do Jari no Amapá.

Os residentes a jusante da barragem sofrem, não somente com a qualidade da água, com trecho abaixo que seca durante a fase de enchimento, deixando os ribeirinhos sem acesso à água e à pesca. Segundo Fearnside (2015), a construção de uma barragem pode afetar de diversas situações, com impactos sobre os povos indígenas, a necessidade de reassentamento, impactos na saúde com a proliferação de insetos e o alto teor de mercúrio encontrado em peixes e na população, assim como há a perda da vegetação por desmatamento e a emissão de gases de efeito estufa dentre eles o Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e Metano (CH<sub>4</sub>).

Segundo Stevaux e Latrubesse (2017), a intervenção de rios por meio de represas pode alterar significativamente o regime hidrológico natural, afetando a dinâmica sedimentar e a estrutura do leito do rio, devido à ausência de cheias maiores e a interrupção do fornecimento de sedimentos levando a formação de uma superfície pavimentada permanente e retirando definitivamente a carga de fundo mais fina do sistema. Essas mudanças têm implicações importantes para os ecossistemas fluviais e a sustentabilidade ambiental.

De acordo com Fearnside (2014), na Amazônia há 79 barragens, entre planejadas e em construção, considerando a barragem de Belo Monte a mais controversa por desencadear na construção de algumas outras represas descritas em documentos como o Plano 2010. A Tabela 2 exibe os reservatórios na Amazônia Legal mencionados neste estudo, demonstrando que, em termos de relação de MegaWatt por quilometro quadrado (MW/km<sup>2</sup>), Balbina é a usina que gera menos energia, enquanto Belo Monte é aquela com a maior capacidade energética.

Ano de enchimento	Nome	Estado	Rio	Capacidade Instalada (MW)	Área do Reservatório (km <sup>2</sup> )	Relação MW/Km <sup>2</sup>
1987	Balbina	Amazonas	Uatumã	250	2.996	0,083
2011	Santo Antônio	Rondônia	Madeira	3.150	350	9
2013	Jirau	Rondônia	Madeira	3.750	361,6	10,37
2014	Belo Monte	Pará	Xingu	11.233	516	21,77

Tab. 2: Barragens existentes na Amazônia Legal brasileira com > 30 MW de capacidade instalada. Fonte: Adaptado de Fearnside (2014)

É muito importante a exposição sobre os planos de desenvolvimento hidrelétrico, pois a tomada de decisão para grandes obras resulta em impactos significativos, necessitando de melhorias no sistema de planejamento. Fearnside (2015, p. 5) discute isso sobre as “cinco maiores hidrelétricas existentes hoje na Amazônia Legal (Tucuruí, Balbina, Samuel, Santo Antônio e Jirau), além de duas barragens menores (Curuá-Una e Jatapu), duas em construção (Teles Pires e Belo Monte), e outras em diferentes estágios de planejamento.”

Montoya et. al (2018) destaca que a produção de energia no Brasil por meio de usinas hidrelétricas é de grande importância, uma vez que a matriz energética do país é predominantemente baseada na hidroeletricidade. Essa forma de geração de energia é considerada a melhor alternativa, destacando-se como uma fonte renovável e acessível no contexto brasileiro.

As questões ambientais complexas no Estado do Pará, incluindo desmatamentos e a controvérsia em torno da instalação de usinas hidrelétricas, exigem uma análise cuidadosa dos impactos socioambientais e da viabilidade desses empreendimentos. A UHE de Belo Monte, por exemplo, começou a ser construída em 2010 e está na área geográfica drenada pelo Rio Xingu, uma importante bacia hidrográfica na região (Freire et. al., 2023).

Fearnside (2015, p. 138) afirma que “os reservatórios eliminam ecossistemas naturais, bem como bloqueiam à migração de peixes afetando a biodiversidade e a produção comercial” e que “a metilação de mercúrio e as emissões de gases de efeito

estufa são problemas adicionais” causando prejuízos ambientais e sociais devido a construção das barragens.

A paisagem é dinâmica e está sujeita a mudanças ao longo do tempo, à processos naturais e atividades antrópicas, sendo constantemente afetada em seu regime hidrológico, incluindo alterações no fluxo do rio e nos ecossistemas aquáticos. Segundo Baldisseri (2005), projetos de energia hidrelétrica têm demonstrado serem insustentáveis, tanto internacionalmente quanto no contexto brasileiro. A insustentabilidade desses empreendimentos pode ser identificada por meio de critérios que avaliam os problemas físico-químico-biológicos decorrentes da implementação e operação de uma usina hidrelétrica.

### **Sensoriamento remoto da água**

O uso do sensoriamento remoto é importante para a melhoria do nosso entendimento sobre a dinâmica hidrológica. Ele oferece informações detalhadas e amplas que são essenciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos e para lidar com os desafios relacionados à água. Além disso, por meio de técnicas eficazes, o sensoriamento remoto possibilita o monitoramento de sedimentos em suspensão em corpos d'água (Espinoza-Villar et. al., 2018).

A obtenção de variáveis como área de superfície, profundidade e temperatura da água e seus constituintes orgânicos ou inorgânicos podem ser desenvolvidas por pesquisas com métodos com dados espaciais quando não há a possibilidade de se realizar *in situ* (Jensen, 2009).

De acordo Sioli (1984), a água pode ser classificada pelas cores branca, preta e clara, dependendo das suas características geoquímicas de origem. Os Andes originam rios de águas brancas devido a grande quantidade de sedimento que é transportado em suspensão. Os solos podzólicos das terras baixas do Amazonas originam rios de água pretas devido serem arenosos, rico em matéria orgânica e pobres em nutrientes. O escudo da Guiana e do Brasileiro originam rios de águas claras que drenam terrenos antigos e podem ser associados a presença de latossolos argilosos (Florenzano, 2008).

Em 1970, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) iniciou a implantação de redes para medições hidrométricas, sendo operada pela

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e amplamente adotada pela comunidade científica para monitorar recursos hídricos na região. Esse avanço é particularmente evidente no monitoramento de grandes rios da bacia amazônica, com foco no nível dos rios, áreas alagadas e transporte de sedimentos suspensos (Marinho, 2021).

Os processos de erosão variam em intensidade ao longo do canal de um rio de acordo com a velocidade do fluxo. Isso se relaciona à remoção, transporte e sedimentação do material. A erosão química envolve a dissolução e transporte do material em solução iônica, enquanto a erosão física retira fragmentos de diferentes tamanhos do solo ou rocha, inserindo-os no sistema como carga sedimentar (Stevaux e Latrubesse, 2017).

Ao monitorar os sedimentos transportados em suspensão, pode-se compreender como a erosão e o assoreamento estão relacionados à carga que os corpos hídricos carregam, afetando a sua qualidade e características. Quando o material orgânico dissolvido está em concentrações altas, a luz solar é impedida de penetrar na coluna d'água. Assim, “quando sedimentos em suspensão e clorofila estão presentes no corpo d'água ao mesmo tempo, uma resposta espectral muito diferente é produzida” (Jensen, 2009, p.421).

Estimativas de sedimentos por sensoriamento remoto são baseados na relação estatística entre a concentração observada de um alvo e a resposta espectral. Essa relação é possível porque as partículas suspensas causam um aumento na espalhamento da luz (Figura 1), ou seja, a energia refletida aumenta à medida que a concentração do sedimento presente na superfície da água aumenta (Barbosa et. al., 2019).

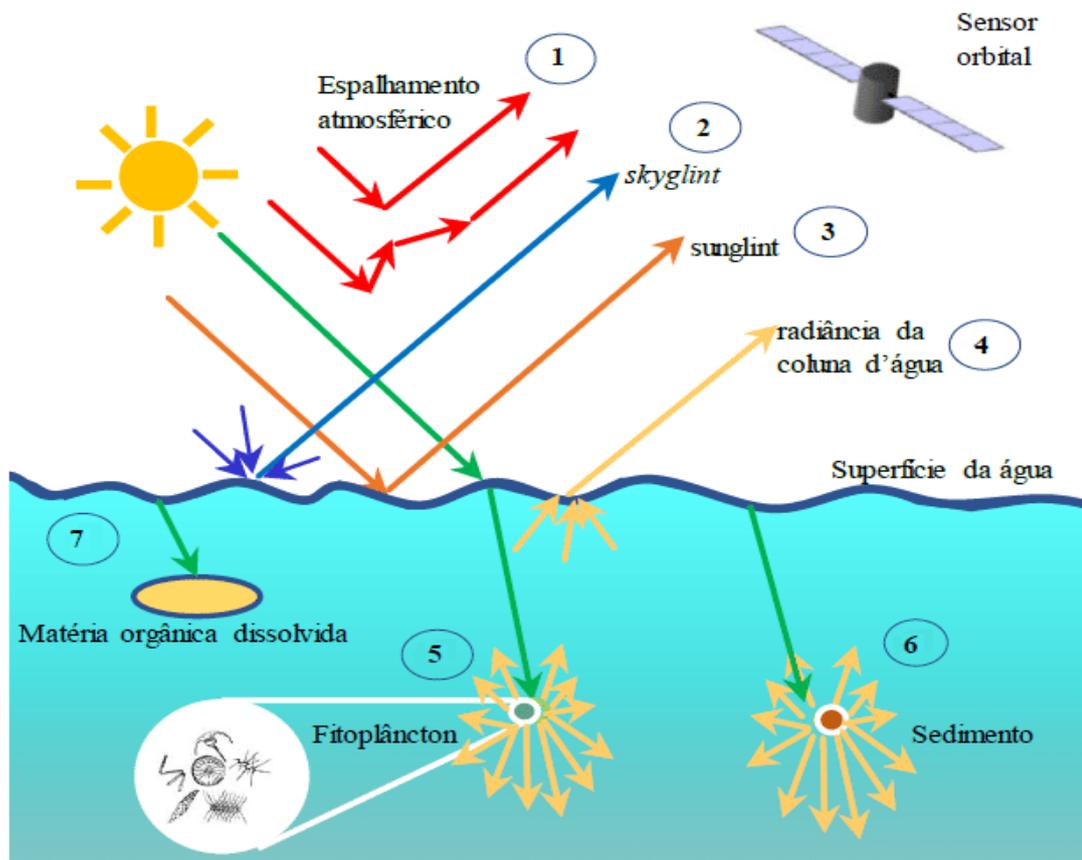


Fig. 1: Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d'água) e sensor orbital. (1) processo de espalhamento atmosférico, (2) processo de reflexão especular da luz difusa do céu, (3) processo de reflexão especular da luz solar direta, (4) radiação emergente da coluna d'água, (5) processo de espalhamento e absorção da luz por fitoplâncton, (6) processo de espalhamento da luz por sedimentos, (7) processo de absorção da luz por matéria orgânica dissolvida. Fonte: Barbosa, Novo e Martins, 2019.

As propriedades físico-químicas da água de um sistema fluvial e a dinâmica do seu nível são influenciadas pelas características da planície de inundação, bem como pelas características desse domínio morfoclimático.

O uso de sensoriamento remoto para estudar corpos d'água é viável devido a possibilidade de observação em escalas regionais e globais, e especialmente útil para o monitoramento de grandes lagos, rios, reservatórios e oceanos, fornecendo informações abrangentes sobre esses sistemas aquáticos em uma única imagem, ou em áreas de difícil acesso, poupando tempo e recursos, acompanhando mudanças sazonais, tendências de longo prazo e eventos específicos, como enchentes, secas e proliferações de algas.

## O Sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

Os estudos de monitoramento da qualidade das águas superficiais, usando dados do sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua, oferecem informações valiosas. O sensor MODIS coleta dados sobre a Terra em elevada resolução temporal, permitindo em estudos de águas o cálculo da reflectância de luz para caracterizar a concentração de sedimentos em suspensão ou identificar a presença de fitoplâncton sobre grandes superfícies de água (Pinto et al, 2014).

Este sensor teve um importante papel para o avanço do entendimento do sistema terrestre, que são validados e capazes de prever mudanças globais com precisão, fornecendo assim informações avançadas para orientar decisões na proteção do meio ambiente (Nasa, 2023). O Quadro 1 informa as principais características do Sensor MODIS.

Sensor MODIS	
Características	Além do satélite TERRA, o MODIS está a bordo do satélite AQUA (lançado em 2002) e oferecem uma base sistemática de dados na elaboração de produtos sobre as interações entre atmosfera, terra e oceano.
Área Imageada	De 2330km x 5000km
Resolução espacial	De 250 à 1000 metros
Bandas espectrais (nm)	36
Resolução Radiométrica	12 bits
Sistema de Referência de Coordenadas	WGS84/Pseudo-Mercator
Revisita	De 1 a 2 dias
Órbita	Polar e heliossíncrona. Altitude. 705 km. Inclinação. 98,2°.

Quadro 1: Características do Sensor MODIS  
Fonte: EMBRAPA, 2024

O sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA, lançado em 1999, e do satélite AQUA, lançado em 2002, pelo programa da NASA denominado Earth Observing System (EOS), contribuiu para pesquisas sobre os oceanos, temperatura da superfície, a presença de fitoplâncton e a distinção da matéria orgânica dissolvida, entre outros (Embrapa Territorial, 2018).

Dado que a distribuição dos sedimentos depende do pulso de inundação do rio, a utilização de imagens do sensor MODIS, que possuem resoluções temporal de 1 a

2 dias e resolução radiométrica de 12 bits, pode ser considerada uma alternativa adequada para identificar a concentração de sedimentos suspensos na superfície (CSSS) em rios e lagos de várzea, realizando o mapeamento espaço-temporal da área estudada (Novo, Barbosa e Freitas, 2007, p. 266).

Conforme Fassoni-Andrade e Paiva (2019) destacam, a escassez de informações sobre a distribuição de sedimentos nos grandes lagos e rios da Amazônia central motiva a proposta de mapear e estudar a dinâmica sedimentar nessa região, com a análise dos diferentes tipos de água (brancas, claras e negras), utilizando imagens de sensoriamento remoto, especialmente os dados do sensor MODIS.

O MODIS pode ser usado para identificar áreas com maiores e menores concentração de sedimentos transportados em suspensão pelo rio. Essa análise pode revelar locais de erosão e deposição de sedimentos ao longo de grandes superfícies de água continentais.

O sensor Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (tradução literal) é um scanner óptico de varredura transversal, um dispositivo que utiliza uma matriz de elementos detectores individuais para capturar imagens da superfície terrestre em 36 faixas espectrais distintas (Bandas), abrangendo desde o espectro visível até o infravermelho termal, em um intervalo de comprimento de onda que vai de 0,4 a 14,3  $\mu\text{m}$  (Mundogeo, 2012).

As imagens MODIS possuem boa capacidade de mapear superfícies de água com largura acima de 500 m, no qual uma única cena pode abranger rios inteiros. O fato das imagens serem disponibilizadas gratuitamente também é fator preponderante na escolha dos dados, uma vez que a aquisição de imagens em plataformas comerciais inviabiliza estudos.

Além de possuir uma resolução espectral de 36 bandas, este sensor possui resolução espacial de 250 a 1000 m com uma área imageada de 2330 x 5000 km, resolução temporal de 1 a 2 dias e resolução radiométrica de 12 bits, fornecendo uma ampla gama de dados de sensoriamento remoto usado em diversas aplicações, como monitoramento ambiental, climatologia e estudos de superfície terrestre (Embrapa Territorial, 2018).

Ao descrever suas especificidades, é essencial considerar que os dados são ajustados para mitigar efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis etc.), compreendendo

imagens convertidas em reflectância e georreferenciadas. Em termos de abrangência espacial em escalas regional e continental, é viável monitorar mudanças na paisagem, sejam elas resultado de fatores sazonais ou intervenções humanas (Mundogeo, 2012).

A escolha por esse tipo de imagem também pode ser influenciada pela “largura da faixa imageada deste sensor (2330 km), aliada a resolução temporal com a possibilidade de aquisição diária, possibilitando o monitoramento de grandes rios amazônicos que podem apresentar trechos com largura superior a 10 km” em estudos empregados na dinâmica do transporte de partículas e que exploraram a relação entre a reflectância da superfície d’água e a concentração de sedimentos suspensos, conforme Marinho (2021). O fato dos satélites Terra e Aqua possuírem o sensor MODIS potencializa a frequência de aquisição de dados e a possibilidade de imagens livres de nuvens (Silva, Freitas e Novo, 2007).

O monitoramento da qualidade da água em grandes áreas alagadas, tanto no tempo como no espaço, se torna importante devido à dimensão da região amazônica e as mudanças próprias desses ambientes relacionadas à influência das fases aquáticas e terrestres. O uso de imagens do sensor MODIS permite identificar a dinâmica da superfície alagável e da cobertura vegetal se comparado com o uso de imagens SAR (Radar de Abertura Sintética) e Landsat-5 (Silva, Freitas e Novo, 2007).

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Uatumã possui 69.500 km<sup>2</sup> dos quais 25% são áreas protegidas pela Reserva Biológica Uatumã, Terra Indígena Waimiri Atroari, Reserva de Desenvolvimento Sustentável Uatumã e Área de Proteção Ambiental (APA) Caverna do Maroaga (Baldisseri, 2005, p. 1445). Os principais afluentes do rio Uatumã são os rios Abacate e Jatapu, com confluências nos km 161 e 228, respectivamente, a jusante da barragem em distância fluvial (Schongart et. al., 2021).

A Reserva Biológica do Uatumã (REBIO Uatumã) é uma área de extrema importância na preservação da biodiversidade amazônica, haja vista que esta abriga uma variedade de espécies desempenhando um papel importante na proteção de naturezas únicas e endêmicas, bem como de espécies que são pouco comuns correndo risco de desaparecimento da natureza e ameaçadas de extinção (Baldisseri, 2005).

O lago de Balbina estar localizado no município de Presidente Figueiredo (AM) possui uma área territorial de 25.459 km<sup>2</sup> e uma população de 30.668 pessoas. A economia dessa região conta com um PIB per capita de R\$ 27.087,68 (IBGE, 2021). A vila de Balbina foi criada para abrigar os funcionários que trabalhavam na construção da UHE (Klein, 2015).

A partir de 1979 iniciou-se a construção da UHE de Balbina e teve sua obra finalizada em 1987 (Fig. 2.a) para atividade de produção de energia elétrica a partir de turbinas hidrocínéticas. O alto curso do Rio Uatumã foi represado (Fig. 2.b), após o enchimento do reservatório o regime hidrológico foi modificado com a formação do lago de Balbina, resultando em poucas variações no nível do rio ao longo do ano, mantendo o fluxo da água constante.

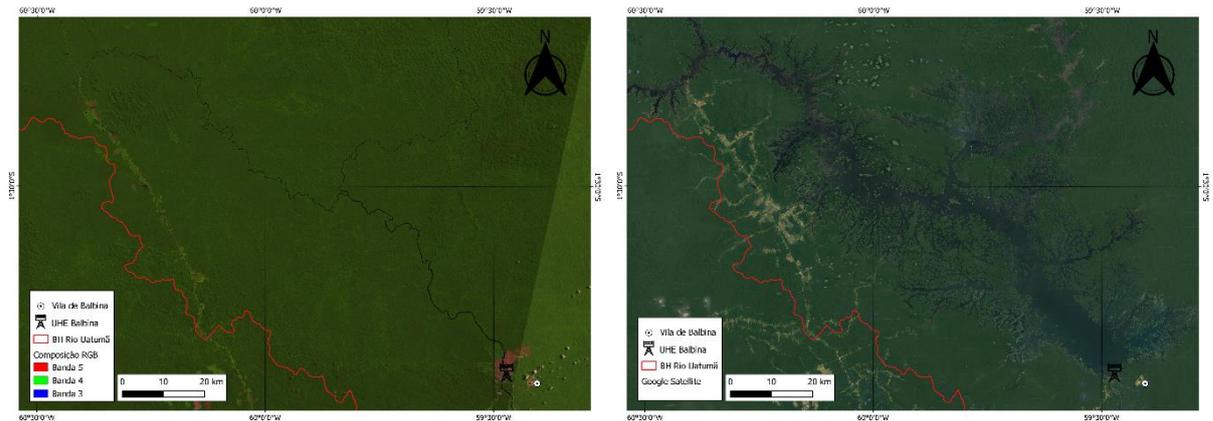


Fig. 2: Lago de Balbina antes e depois da UHE. 2.a) Composição RGB imagem Landsat 5 do dia 12/07/1987. 2.b) Mosaico de imagens de satélites (QuickMap Service/QGIS)

Fonte: USGS Explorer, 2024; Google Satélite, 2024.

## Geologia e Geomorfologia

A bacia sedimentar do Amazonas está situada no contexto geológico mais amplo do Cráton Amazônico e é delimitada por estruturas geológicas específicas, como o Arco de Purus e o Arco de Gurupá (Alves, 2013).

De acordo com Petri et. al. (1986), as formações são unidades básicas na classificação litoestratigráfica, representando corpos rochosos com homogeneidade litológica, formato tabular, continuidade lateral e que podem ser mapeados na superfície terrestre ou subsuperfície, quanto à distribuição espacial de sucessões e fácies deposicionais, são fundamentais para descrever e interpretar a geologia da região.

Nos limites da BH Rio Uatumã estão as Formações Alter do Chão e Urupi correspondentes as de maiores mudanças litológicas conferidas neste reconhecimento (Fig. 3): “Uma formação pode representar um intervalo de tempo longo ou curto, pode constituir-se de materiais de várias fontes e pode incluir apenas descontinuidades de importância subsidiária dentro de seu corpo” (Petri et. al., 1986, p. 377).

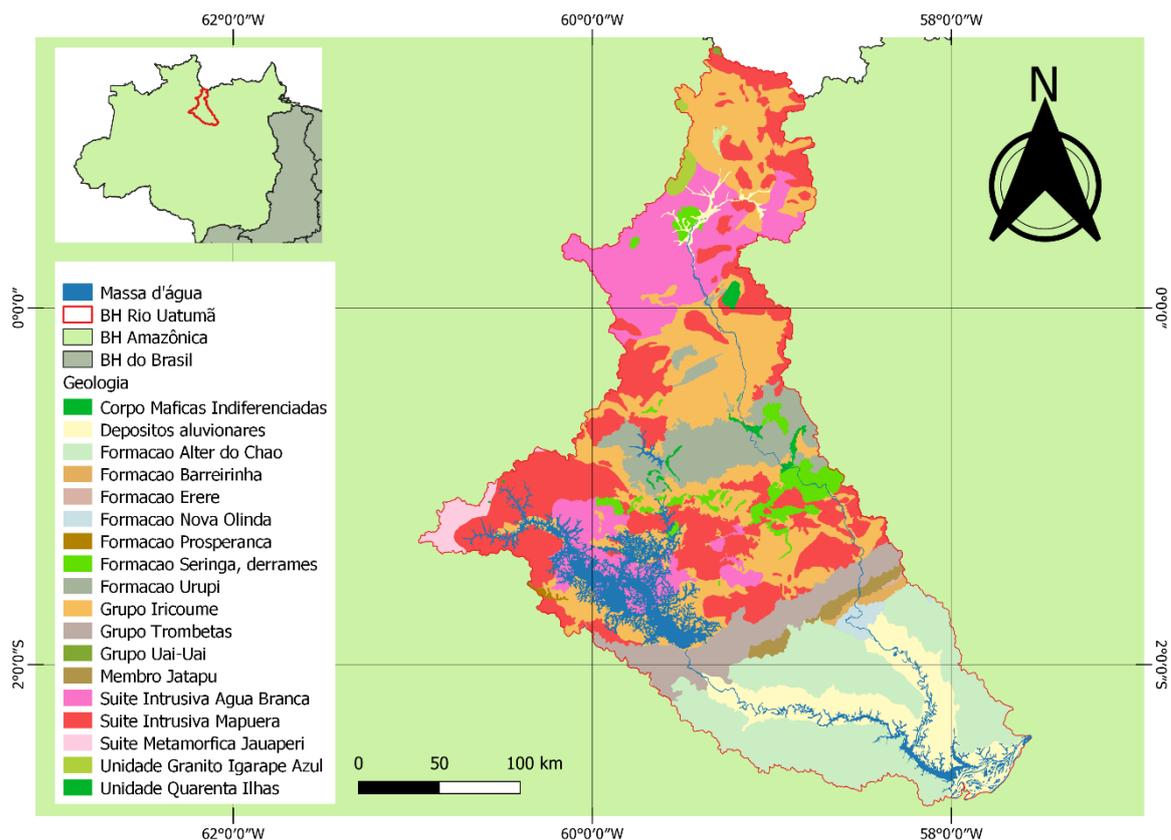


Fig. 3: Geologia da Bacia Hidrográfica do Rio Uatumã  
 Fonte: SGB, 2024. Elaborado pelo autor.

A Formação Alter do Chão se formou durante o período Cretáceo, sendo constituída por arenitos, pelitos e conglomerados, desempenhando um papel importante na geologia regional e favorável a experimentos direcionados ao setor cerâmico.

O grupo é a unidade litoestratigráfica formal de categoria superior à formação, na qual a parte norte da BH do Rio Uatumã é de predominância pelo Grupo Iricoume, enquanto o Grupo Trombetas compreende uma faixa na área sul desta bacia. A respeito de grupo, Petri et. al. (1986) afirmam:

“É constituído, necessariamente, pela associação de duas ou mais formações relacionadas por características ou feições litoestratigráficas comuns ou por referenciais litoestratigráficos que o delimitem. [...] Quanto a variação na estruturação, as formações componentes de um grupo não são, necessariamente, as mesmas em toda parte” (PETRI et. al., 1986, p. 378-379).

O membro Jatapu faz parte dessa formação, tendo características litológicas próprias que permitem distingui-la das partes adjacentes da formação.

A Geologia local se liga a natureza da ciência geomorfológica e da Geomorfologia Fluvial e suas relações, buscando entender e analisar os modelos de evolução da paisagem. As formas de relevo e os processos responsáveis por suas origens advêm das forças endógenas e exógenas, incluindo a dinâmica do escoamento fluvial, transformando a superfície terrestre em seus diferentes tamanhos ou táxons, de diferentes idades e processos genéticos distintos (Fontes, 2010).

Os domínios existentes na BH do Rio Uatumã representam áreas significativas na geomorfologia da região amazônica. Esta paisagem contém planaltos, planície e depressões que foram intensamente erodidos ao longo do tempo, resultando em uma topografia irregular e sistemas fluviais encaixados, dos quais predomina a Depressão da Amazônia Setentrional apresentando grandes áreas de relevo plano na parte norte do alto Uatumã e aumento da dissecação na parte sul da bacia, onde desagua e se torna afluente do Rio Amazonas (Fig. 4).

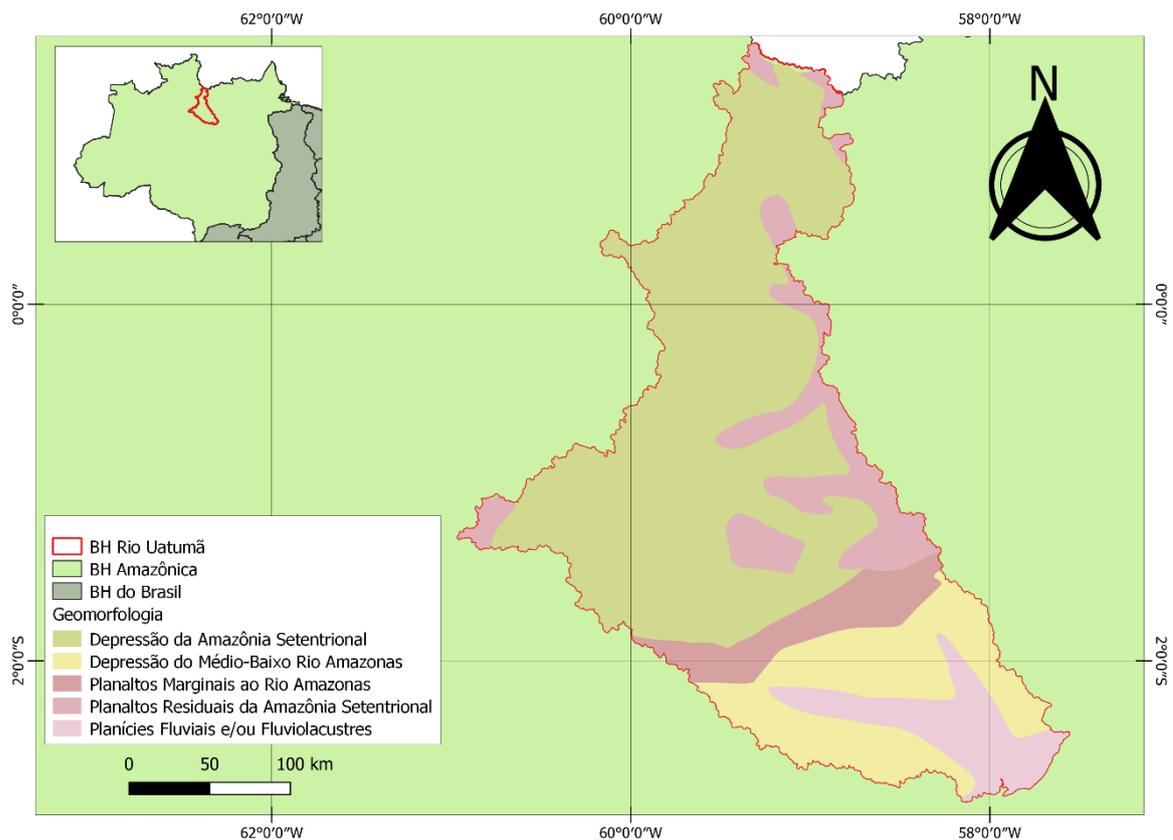


Fig. 4: Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Uatumã  
Fonte: SGB, 2024. Elaborado pelo autor.

Stevaux e Latrubesse (2017) destacam que drenagem da bacia é um componente vital do sistema hidrológico, influenciando no fluxo de água e na formação da paisagem. A drenagem está intrinsecamente ligada à geomorfologia atuando na forma, evolução e funcionamento dos sistemas terrestres, seja por interações de processos naturais ou atividades humanas. O caso do lago de Balbina é emblemático devido à sua baixa drenagem e as características marcantes do relevo em toda a sua extensão e a sua relativa baixa profundidade em comparação com sua área de superfície.

As unidades de relevo classificadas em função da declividade demonstram que, aproximadamente, 30% da bacia é ocupada por terrenos planos ou suave-ondulados. A Tabela 3 mostra como estão distribuídas as classes de declividade do relevo de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018) na bacia do Rio Uatumã.

<b>Declividade (%)</b>	<b>Relevo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
0 – 3	Plano	2.190	3,26
3 – 8	Suave-ondulado	18.312	27,25
8 – 20	Ondulado	38.772	57,69
20 – 45	Forte-ondulado	7.319	10,89
45 – 75	Montanhoso	567	0,84
>75	Escarpado	48	0,07
<b>Total</b>		<b>67.208</b>	<b>100,00</b>

Tab. 3: Distribuição das classes de declividade.

Fonte: SANTOS et al., (2018). Organizado pelos autores (2023).

A Figura 5 confirma a ideia de Feanrside (2015): “Uma grande parte do reservatório é extremamente rasa porque o relevo em Balbina é bastante plano. A área oficial de 2360 km<sup>2</sup> da represa na cota de 50 m cai para 1580 km<sup>2</sup> na cota 46, o que significa que 780 km<sup>2</sup> (33%) terão menos que quatro metros de profundidade”.

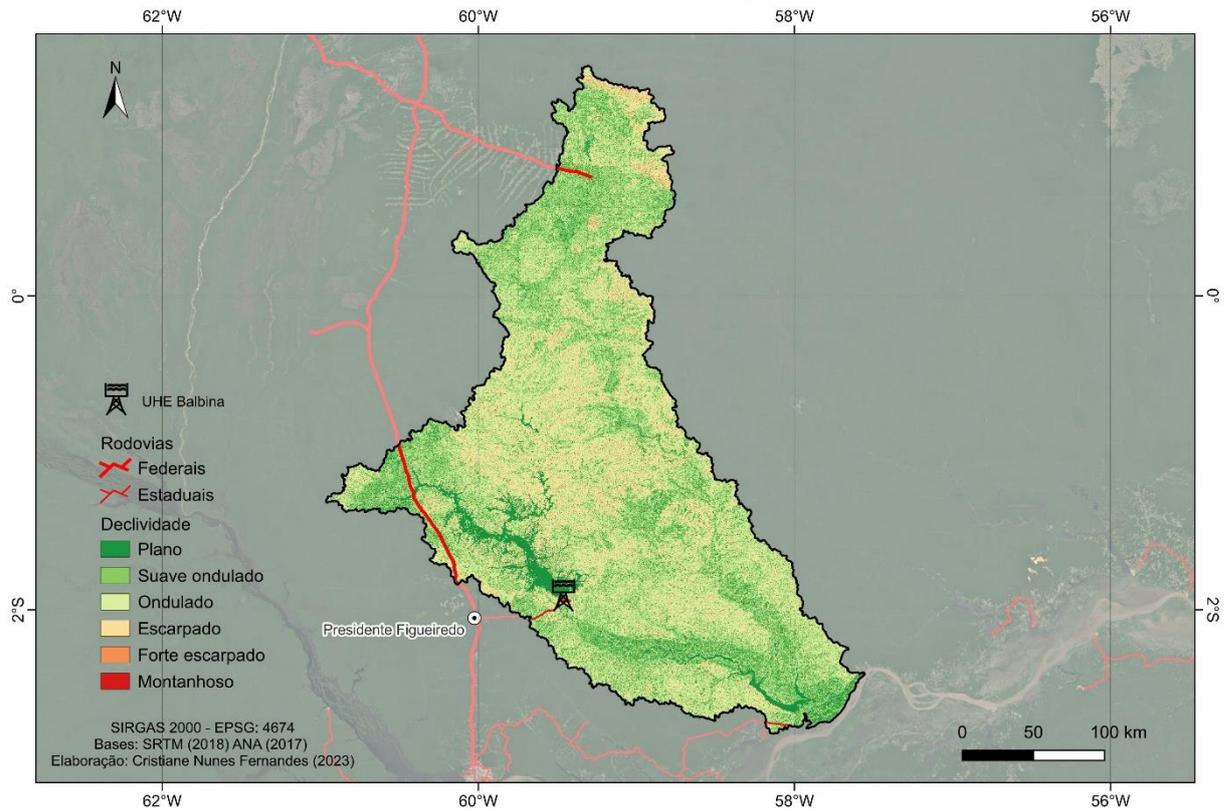


Fig. 5: Declividade da Bacia do Rio Uatumã.  
 Fonte: SRTM-USGS (2023). Elaborado pelos autores (2023).

### Classes de Solo

A pedologia predominante dessa área compreende duas classes de solos (Fig. 6), o Argissolo e Latossolo, com maior ocorrência ao longo da bacia hidrográfica do Rio Uatumã por Argissolos Vermelho-Amarelo.

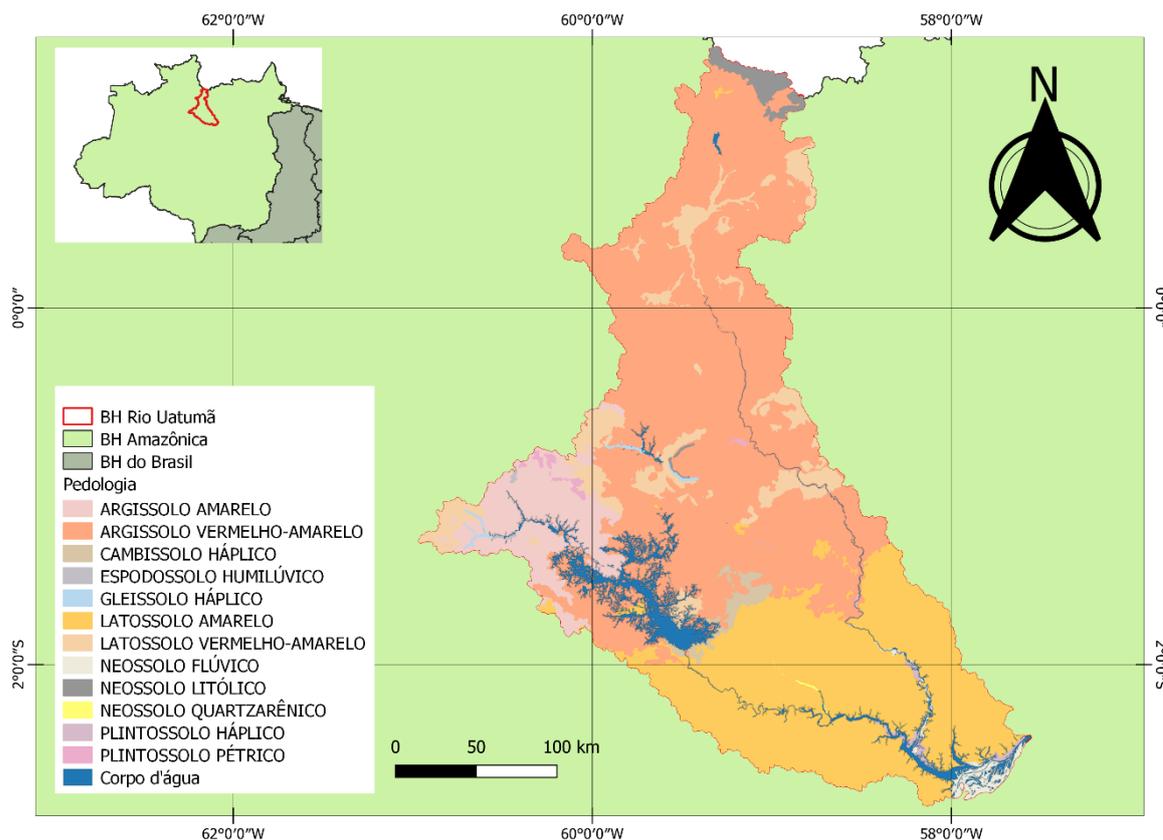


Fig. 6: Pedologia da Bacia Hidrográfica do Rio Uatumã  
 Fonte: SGB, 2024. Elaborado pelos autores.

De acordo com Santos (2018, p. 82), os Argissolos são “Grupamento de solos com B textural, com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico”.

Durante o reconhecimento dos solos é importante analisar a composição química do seu perfil, descrevendo as camadas e baseando-se na natureza petrográfica do material original (IBGE, 2015). Os estudos dos solos colaboram para atender levantamento com finalidade de: atividade agrícola, correção do solo, irrigação e drenagem, assentamentos de colonos e estudos ambientais.

### Hidrografia e Regime Hidrológico

A hidrografia descreve as características físicas e as condições da água na superfície da Terra, principalmente as massas de água para navegação. A hidrografia

da região amazônica compõe a maior bacia hidrográfica do mundo com cerca de 3,8 milhões de km<sup>2</sup>. O Rio Uatumã possui aproximadamente 360 km de extensão (Fig. 7).

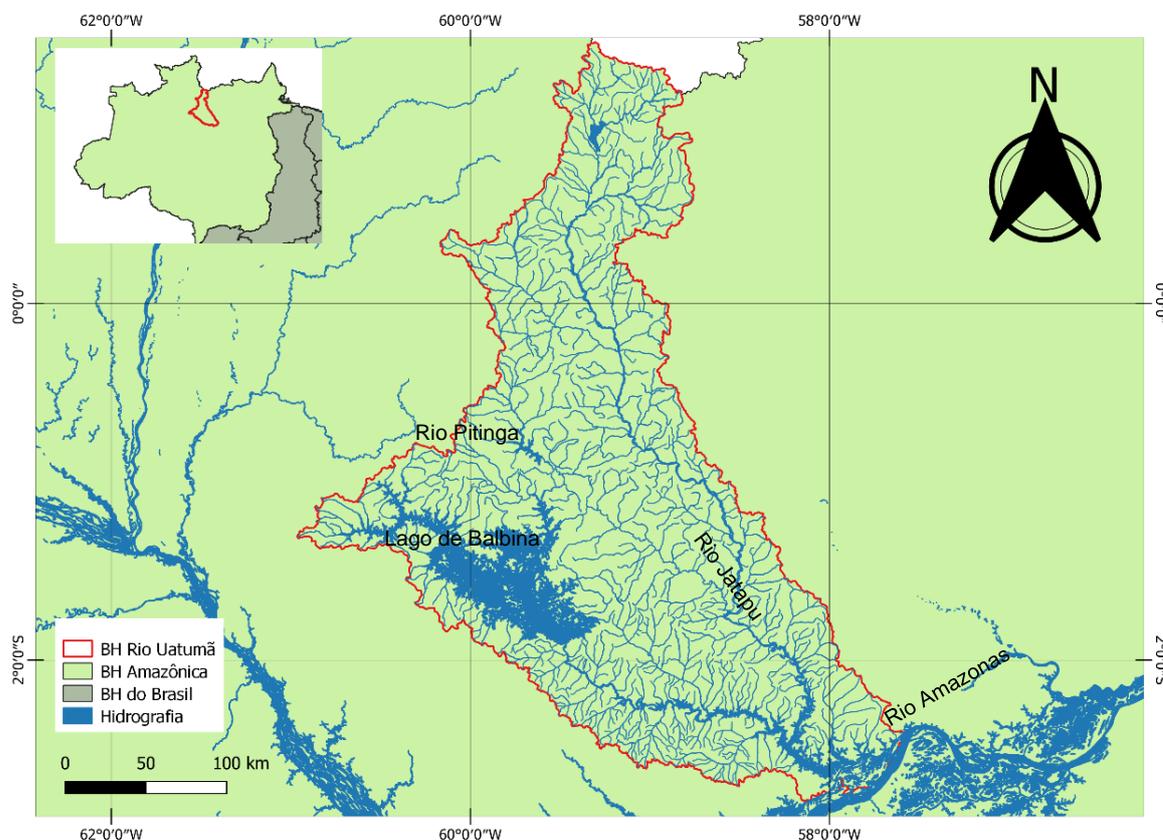


Fig. 7: Hidrografia da BH Rio Uatumã  
Fonte: SGB, 2024. Elaborado pelos autores.

A nascente do Rio Uatumã está situada entre os estados de Roraima e Amazonas, sob os escudos das Guianas. A análise do escoamento superficial da BH Uatumã demonstra a influência da topografia, solo, uso da terra e cobertura vegetal no seu sistema hidrológico e no comportamento do curso.

O desenvolvimento do perímetro e volume de um lago abordam sobre a sua morfologia volumétrica (Stevaux e Latrubesse, 2017). O lago de Balbina se formou artificialmente após o enchimento do reservatório, impactando no hidrossistema fluvial, sem considerar a perspectiva ecológica com foco em uma escala temporal mais longa. A classificação hidrodinâmica dos sistemas aquáticos caracteriza lago como um sistema do tipo lântico “corpo de água em geral profundo, sem conexões fluviais, com elevado tempo de residência, com baixa concentração de íons dissolvidos”

(Barbosa et al., 2019, p. 13). Nesse tipo de sistema, o tempo de residência implica no tempo de permanência de contaminantes.

O hidrossistema foi afetado nas suas variáveis ambientais primárias, como o regime de descarga, o transporte de sedimento e os parâmetros físico-químicos da água, que estão relacionados ao clima, à vegetação e ao uso da bacia, desde a dinâmica do canal e a composição ambiental da planície de inundação.

A coleta de dados históricos de precipitação, área de superfície, volume, nível, uso do solo e características físicas da bacia, como geologia, topografia e vegetação validam os fundamentos necessários para entender a dinâmica hidrológica da bacia.

A análise da BH Rio Uatumã envolveu o estudo das características e comportamento hidrológico da bacia, como a área da superfície do lago e o nível da água. O comportamento do regime hidrológico do rio Uatumã pode ser observado no gráfico da Figura 8, antes e depois da instalação da UHE, no qual antes se referia às variações naturais, seguindo uma relação com os padrões de precipitação, evaporação, escoamento superficial, fatores climáticos e geomorfológicos e os ciclos das estações do ano. Após a construção da barragem, esse comportamento foi alterado, acarretando poucas variações no nível do rio ao longo do ano, mantendo um fluxo constante de água.

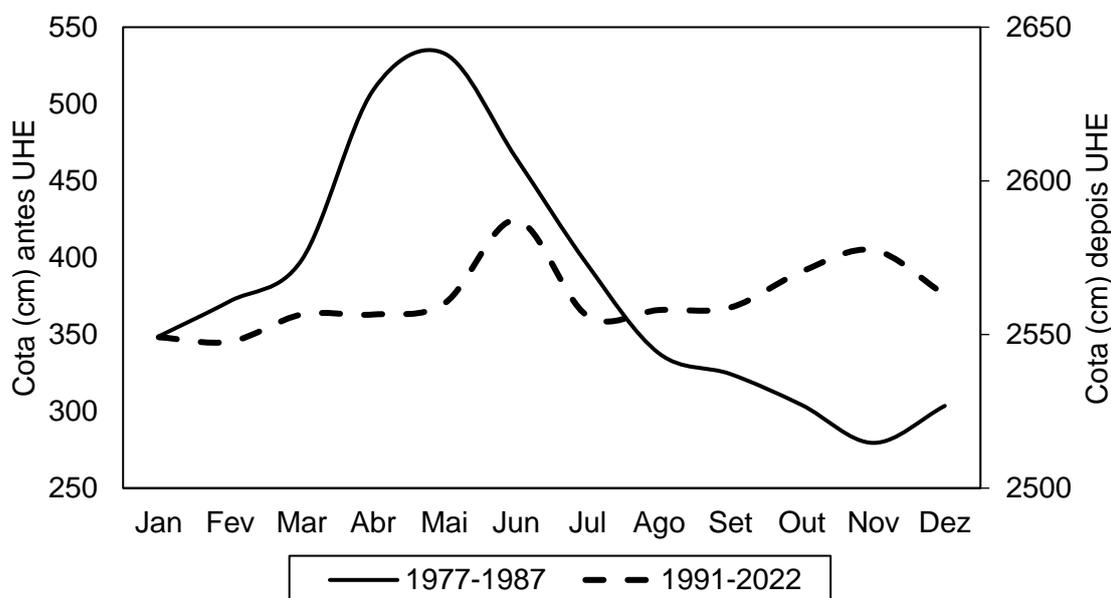


Fig. 8: Nível médio mensal (Cota) da estação fluviométrica 16080000 no Rio Uatumã antes e depois da construção da UHE de Balbina. Fonte: ANA (2023). Organizado pelos autores (2023).

Comparando os dados de antes da construção da barragem (1977-1987) é possível perceber que as variações de níveis de água eram da ordem de 2,5 metros, com pico de cheia em maio e seca em novembro. Após a instalação da UHE (1991-2022), as variações de níveis de água ficaram da ordem de 40 centímetros, com pico de cheia em junho e seca em fevereiro. Esta grande alteração no pulso de inundação afetou de forma significativa as populações e os ecossistemas de igapó antes e depois da UHE de Balbina.

Em relação ao regime fluvial, o pico de cheia do lago de Balbina ocorre no mês de julho (Figura 8). O cotograma da Figura 9 mostra como o nível da água oscila ao longo do ano, destacando a máxima de 47,30 m e a mínima de 45,61 m, sendo uma amplitude de apenas 1,69 m (Figura 4).

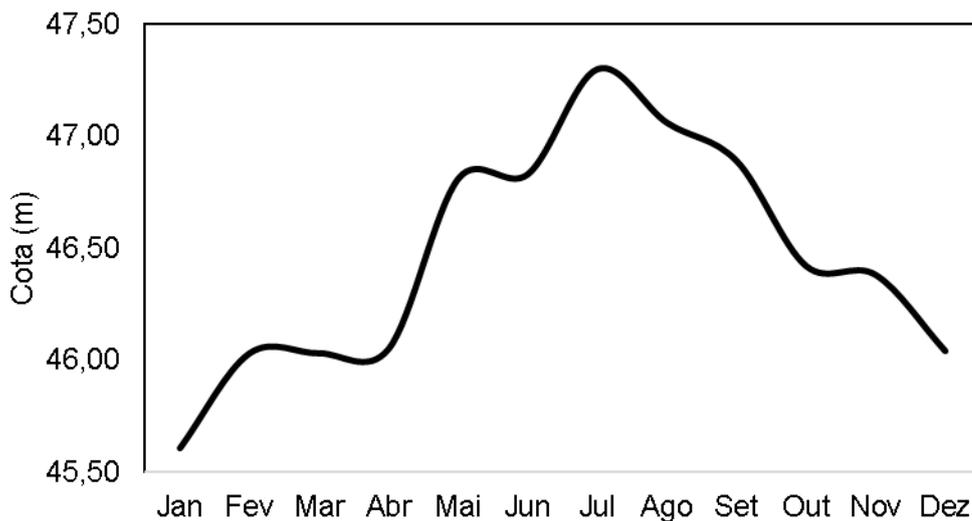


Fig. 9: Cotograma (m) mensal do Lago de Balbina (1992-2022).

Fonte: THEIA (2023). Organizado pelos autores (2023)

Com a implementação da UHE de Balbina, a cota do Rio Uatumã passou a ter pouca variação no nível da água, haja vista que as comportas são abertas ao passo que o nível do reservatório ultrapassa o limite recomendado por segurança, alterando a velocidade e o padrão do fluxo, o que por sua vez pode afetar no transporte e na dispersão dos sedimentos na área de influência da barragem.

A baixa amplitude da cota do lago implica na menor capacidade de transporte de sedimentos e nutrientes, o que pode afetar ecossistemas dependentes de cheias

periódicas para a renovação de habitat e processos ecológicos. Portanto, o monitoramento da qualidade da água é fundamental para entender como ocorre os impactos da construção de barragens, assim como para orientar ações de manejo adequado dos recursos hídricos.

A superfície do Lago de Balbina é uma medida que representa a área total ocupada por água, na qual atinge seu pico em julho, alcançando uma área de 7.029 km<sup>2</sup> (Figura 10). O aumento da superfície em julho está relacionado ao período do pico de cheia.

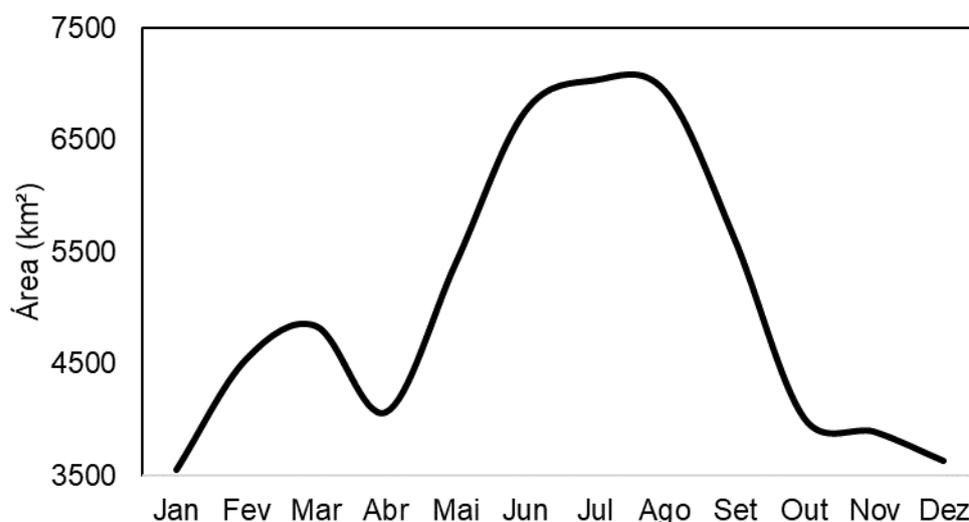


Fig. 10: Área do Lago de Balbina (1992-2022).  
Fonte: THEIA, (2023). Organizado pelos autores (2023).

No regime fluvial deste período hidrológico, observou-se que o período de enchente e cheia, caracterizado por águas altas, ocorre de março a agosto (Figura 11). Durante a estação de enchente, as chuvas começam a aumentar gradualmente, e na estação de cheia, ocorrem chuvas mais intensas. Os rios que alimentam o lago atingem seus níveis mais altos, levando o lago de Balbina a apresentar um aumento significativo em seu volume de água.



Fig. 11: Lago de Balbina no período da enchente.  
Fonte: Cristiane Nunes Fernandes. Março de 2023.

O período de vazante e seca, com águas baixas, compreende os meses de setembro a fevereiro (Figura 12). Nessa fase, a quantidade de chuvas diminui consideravelmente, levando à redução do nível do lago e expondo algumas áreas do leito do rio.



Fig. 12: Lago de Balbina no período da vazante.  
Fonte: Rogério Ribeiro Marinho. Outubro de 2022.

A precipitação é um dos principais impulsionadores do ciclo hidrológico. Os dados de precipitação foram analisados para determinar padrões sazonais e a intensidade das chuvas na bacia do rio Uatumã. O ciclo hidrológico do Rio Uatumã se dá com maiores precipitações nos meses de março, período de águas altas, e menores precipitações nos meses de agosto, período de águas baixas (Fig. 13).

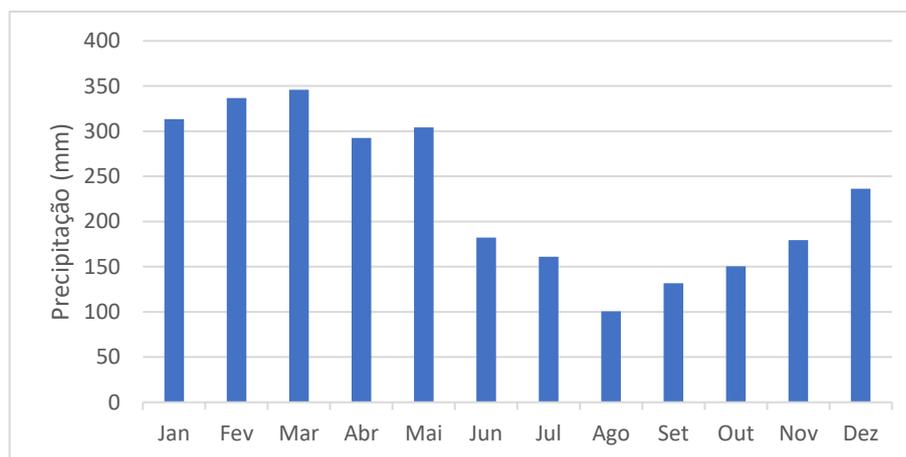


Fig. 13: Média da precipitação (2008-2017).  
Fonte: Inmet (2024)

A estação automática com o código A126 - PRESIDENTE FIGUEIREDO disponibiliza os Dados Meteorológicos do INMET através de solicitação de requisição para coleta dos dados. Esta iniciou a operação em 2008 e fica no endereço R. Copaíba, 247 - Morada do Sol, Pres. Figueiredo - AM, 69735-000.

Os dados de precipitação utilizados neste estudo são os valores médios mensais dos anos 2008-2017. O uso desta base de dados complementa as informações necessárias, pois é uma região com baixa densidade de estações pluviométricas.

A Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010 determina que após 10 anos de operação, as Usinas Hidrelétricas controladas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) devem avaliar o acúmulo de sedimentos em seus reservatórios, atualizando as tabelas que relacionam a cota de água, a área inundada e o volume armazenado (Catálogo de Metadados da ANA. 2023).

A Figura 14 mostra os dados da UHE Balbina cujos Relatórios foram analisados pela ANA e considerados coerentes, com os seguintes arquivos: Dados Geográficos

no formato, Relatório Final do Levantamento Batimétrico e Planilha com as Tabelas Cota x Área x Volume Atualizadas dos Reservatórios de Usinas Hidrelétricas.

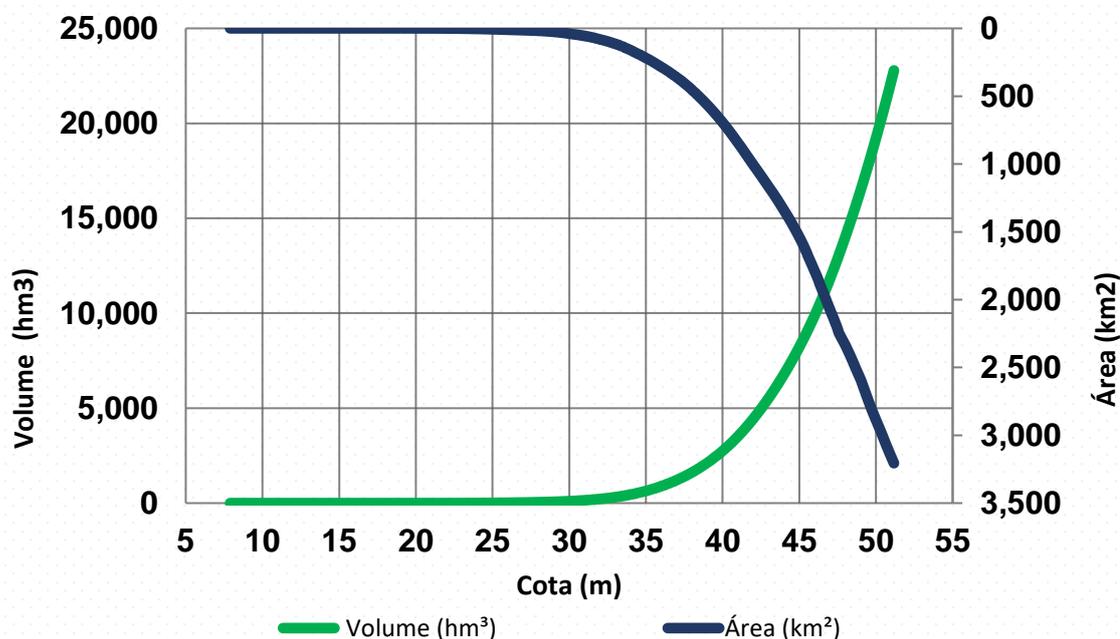


Fig. 14: Relação Cota x Área x Volume do Reservatório da UHE Balbina.

Fonte: Catálogo de Metadados da ANA, 2019.

A relação entre cota, área e volume demonstra a variação do nível da água no reservatório e é representada por meio de curvas que são fundamentais para o projeto, operação e gestão de reservatórios, sistemas de irrigação, usinas hidrelétricas e outras estruturas relacionadas à água.

O estudo dessa relação tem uma relevância muito importante para a dinâmica hidrossedimentar, pois uma vez que a cota está em seu nível mais baixo, especialmente em áreas quando o solo fica exposto, possivelmente o sedimento será transportado pela água da chuva, causando a erosão do solo e o assoreamento dos rios. A formação do reservatório pode levar à erosão das margens e do fundo do reservatório devido à variação no nível da água, às mudanças na vegetação e ao aumento da turbulência da água.

A CSS também influencia na cota quando a retenção do sedimento se acumula no pé da barragem causando uma perda do volume do reservatório por assoreamento (Fearnside, 2015).

## Vegetação e clima

A fitofisionomia encontrada na região, excluindo os cursos d'água, demonstra que a área possui Floresta Ombrófila Densa (Unidades de Conservação no Brasil, 2024). A estruturação da paisagem local influencia na distribuição da vegetação, na diversidade biológica e nos padrões hidrológicos da região.

Através da caracterização da vegetação e do uso do solo, é possível ver o impacto significativo na dinâmica hidrológica da bacia. Após a inundação da área, as árvores se tornaram mortas (paliteiras) com alterações drásticas, afetando a infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial. A baixa drenagem do lago de Balbina tem várias consequências ambientais significativas.

Segundo Klein (2015), há 3500 ilhas que se tornaram áreas isoladas devido ao enchimento do reservatório, porém com atrativos para a população como pesca esportiva e pousadas, e com ocupações de pequenos agricultores (Fig. 15.a e 15.b).

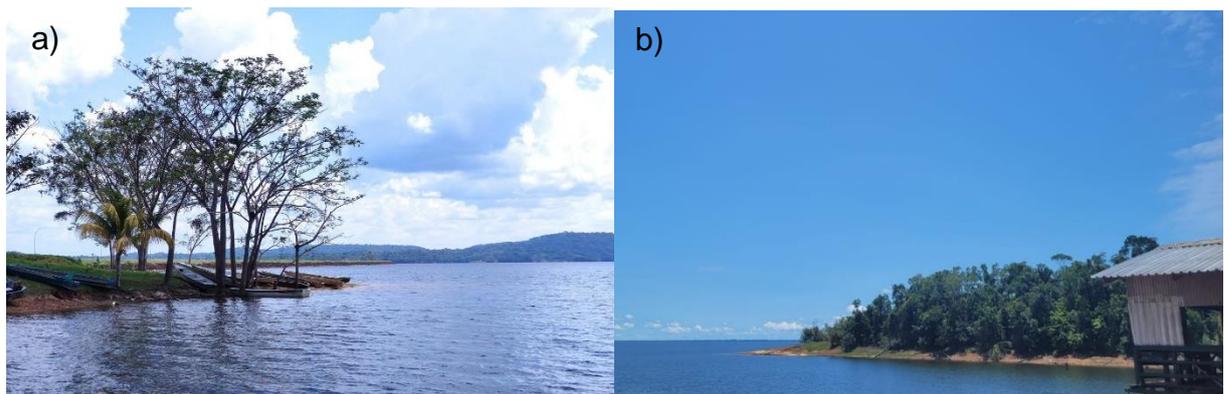


Fig. 15: Vegetação na área de influência da UHE Balbina. a) Período de vazante, agosto/2022; b) Período de enchente, março/2024. Fonte: O autor, 2024

“A Reserva Biológica do Uatumã não tem um limite naturalmente definido no lado oeste, que se localiza no reservatório da UHE Balbina. Trata-se de três segmentos de reta que cruzam lago, ilhas e terra firme, que tornavam o limite indefinido, desconhecido para os pescadores, e de difícil demarcação” (Klein, 2015, p. 15).

A formação do lago de Balbina resultou na inundação de vastas áreas de floresta tropical, levando à perda de habitat para a vida selvagem e à emissão de gases de efeito estufa devido à decomposição da matéria orgânica submersa, também

levou à perda de biodiversidade tanto aquática quanto terrestre. Muitas espécies de plantas e animais foram deslocadas ou perderam seus habitats originais.

A região amazônica possui clima com massas de ar equatorial, sistemas de correntes do norte e de correntes do sul (Alves, 2013). A área do Lago de Balbina tem o regime de precipitação caracterizado por um clima equatorial úmido, com chuvas ao longo de todo o ano e pico ocorrendo no meio do ano, influenciado pelas variações do Rio Uatumã.

As mudanças na vegetação e na vida animal tanto abaixo quanto acima da represa são atribuíveis às alterações no regime hídrico, que exercem uma forte influência sobre a flora e a fauna adaptadas a certas flutuações de nível e correnteza. Regiões anteriormente sujeitas a depósitos regulares de sedimentos podem ver uma redução no fornecimento devido à diminuição da velocidade da água (Rocha, 2013).

#### 4. METODOLOGIA

Neste estudo seguimos a metodologia comparativo e histórico, confrontando elementos e comparando dados atuais com passados por meio de levantamento bibliográfico.

O mapa de localização dos pontos amostrais foi produzido no software QGIS 3.22 para espacializar a distribuição das coordenadas obtidas pela empresa Amazonas Geração e Transmissão de Energia S.A, para análise dos parâmetros físico-químicos da água (Figura 16).

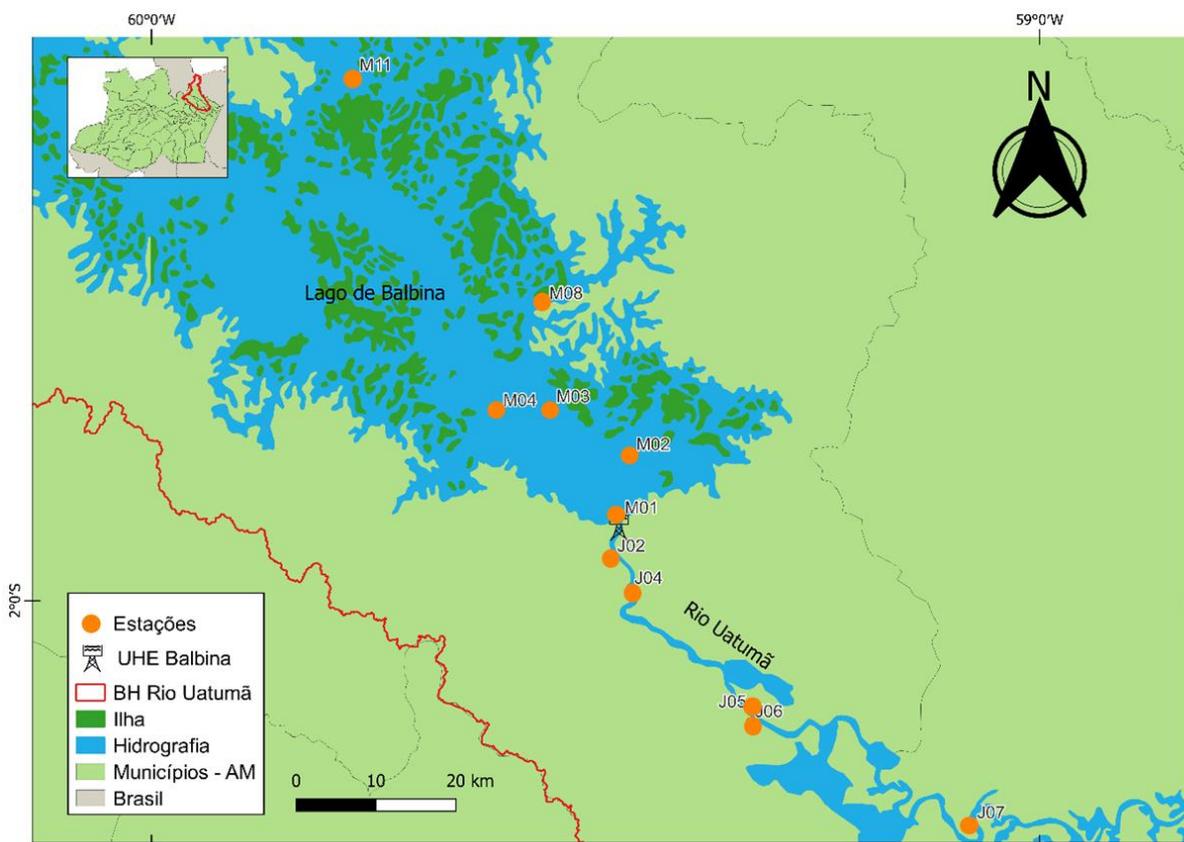


Fig. 16: Localização dos pontos amostrais dos parâmetros físico-químicos. Fonte: IBGE (2022) e IPAAM (2022). Elaboração: Os autores (2023).

Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados em 11 pontos amostrais (Quadro 2), com cinco pontos situados à jusante (Rio Uatumã) e seis pontos situados à montante da UHE de Balbina (Figura 9). Estes dados foram coletados nos períodos de águas altas (enchente e cheia) e águas baixas (vazante e seca).

<b>Estação</b>	<b>Coordenadas</b>
M01	01°54'19,5" Sul – 59°28'19,2" Oeste
M02	01°50'01,3" Sul – 59°27'31,9" Oeste
M03	01°46'45,4" Sul – 59°32'57,0" Oeste
M04	01°47'00,6" Sul – 59°36'32,0" Oeste
M08	01°39'43,5" Sul – 59°33'25,4" Oeste
M11	01°24'11,3" Sul – 59°46'14,0" Oeste
J02	01°56'55,7" Sul – 59°28'49,7" Oeste
J04	01°59'07,0" Sul – 59°27'39,0" Oeste
J05	02°07'32,1" Sul – 59°19'31,5" Oeste
J06	02°08'11,8" Sul – 59°15'30,1" Oeste
J07	02°15'05,2" Sul – 59°04'30,3" Oeste

Quadro 2: Estações dos pontos amostrais dos parâmetros físico-químicos.  
 Fonte: IPAAM (2022). Organizado pelos autores (2023)

O recorte de estudo correspondente à análise da CSS do lago de Balbina é ilustrado pela distribuição espacial dos pontos amostrais (Figura 17) e suas coordenadas são apresentadas no Quadro 3. Este mapa de localização foi produzido com suporte do software QGIS 3.22.

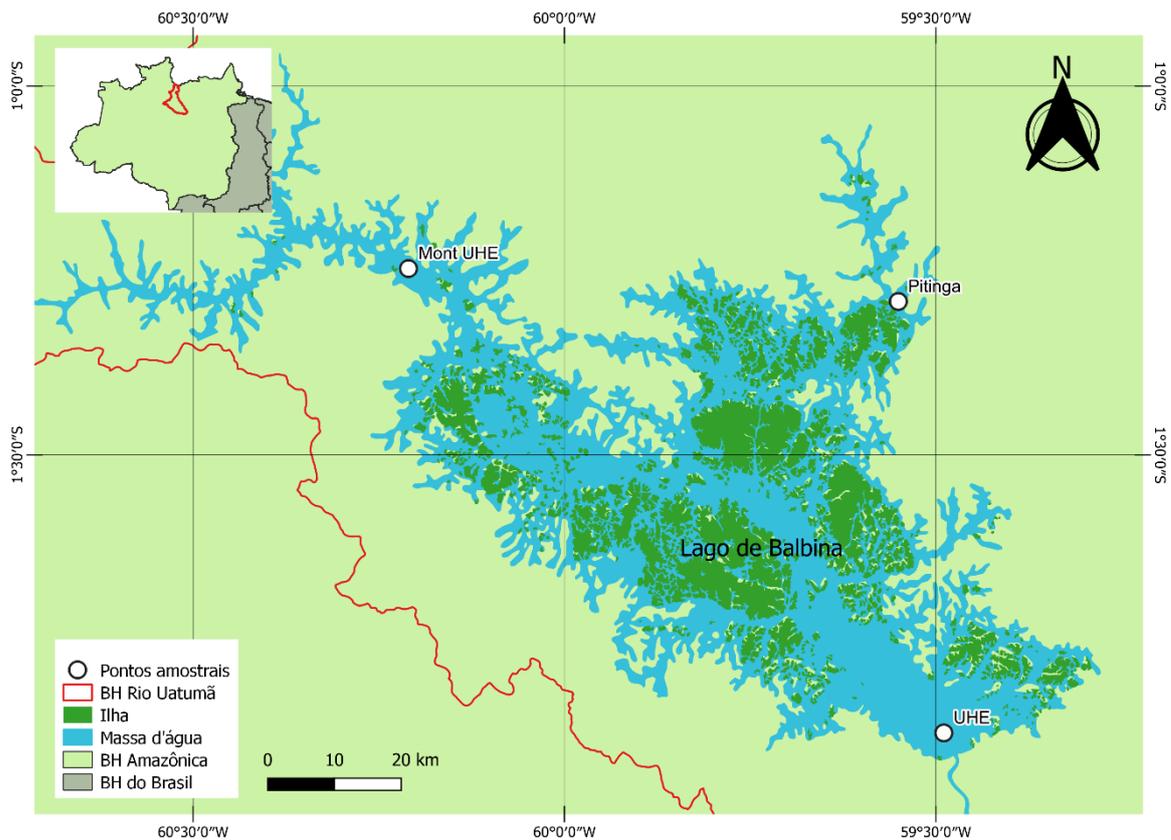


Fig. 17: Localização dos pontos amostrais de CSS.  
 Fonte: IBGE, 2010. Elaborado pelo: O autor, 2023.

Pontos	Coordenadas
UHE Balbina	Long. O 1° 52' 48" e Lat S 59° 29' 9.6"
Montante UHE	Long. O 1° 15' 3.6" e Lat S 60° 12' 25.2"
Pitinga	Long. O 1° 17' 49.2" e Lat S 59° 32' 49.2"

Quadro 3: Pontos amostrais de CSS.  
 Fonte: O autor, 2023

Os pontos amostrais destacam 3 áreas de importantes análises no Lago de Balbina com relação a Concentração do Sedimento Suspenso (CSS). Ambas as áreas estão inseridas na rica biodiversidade da região amazônica, o que faz com que as atividades antrópicas, como a construção da barragem e a mineração, estejam sujeitas a investigação e debate sobre os efeitos ambientais. “A mina de Pitinga, situada na parte superior da bacia hidrográfica de Balbina e na bacia adjacente do rio

Alalaú, é cotada como sendo a maior jazida no mundo de cassiterita de alto grau de pureza” (Fearnside, 2015, p. 101).

### **Dados da qualidade da água e imagens MODIS**

Os dados de qualidade da água do Lago de Balbina foram obtidos no Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM) a partir de laudos físico-químicos do Projeto de Monitoramento Limnológico do período de 2020 a 2021, elaborados pela empresa Amazonas Geração e Transmissão de Energia S.A., em conformidade com o licenciamento ambiental da Usina Hidrelétrica de Balbina.

Esse monitoramento, que cobre a área de influência da barragem (tanto a montante quanto a jusante), consiste em coletas trimestrais encaminhadas semestralmente ao IPAAM e tem a finalidade de atender o licenciamento ambiental de operação da Usina Hidrelétrica de Balbina (número de processo 0261/87/V4).

Os dados de imagens MODIS foram obtidos em Fassoni-Andrade e Paiva (2019), os quais disponibilizam um banco de dados com imagens da reflectância de superfície da água nas bandas no vermelho (RED) e infravermelho (NIR) para o período 2003-2017 na Amazônia Central, agrupadas em períodos representativos de quatro dias.

A imagem de refletância de cada banda foi calculada, por exemplo, para 1 a 4 de janeiro e representada pela média das imagens analisada para os dias 1, 2, 3 e 4 de janeiro de 2003, 2004 e assim por diante e dividindo pelo número de anos (15). Os pixels classificados como sem água no mapa de frequência de águas abertas foram excluídos (Fassoni-Andrade e Paiva, 2019, p. 97).

Modelo empírico que relaciona a CSS em função da reflectância medida pelo sensor MODIS foi aplicado na superfície d’água do Lago de Balbina usando as bandas do vermelho (RED) (Figura 18.a) e do infravermelho próximo (NIR) (Figura 18.b) para um conjunto de 92 imagens, adquiridas entre janeiro de 2003 e dezembro de 2017 e em diferentes períodos hidrológicos.

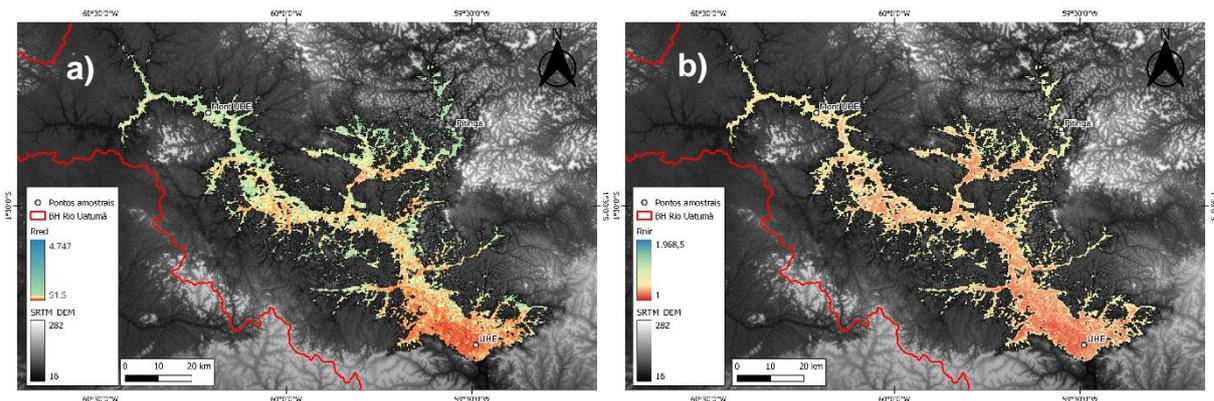


Fig. 18: Valores de Rrs da superfície d'água do Lago de Balbina. a) Reflectância em RED; b) Reflectância em NIR.

Fonte: Fassoni-Andrade e Paiva (2019); USGS (2024). Valores de Reflectância estão multiplicados pelo fator 10.000.

Localizada na faixa do espectro visível, a banda RED é sensível à luz vermelha refletida pela superfície da Terra e frequentemente usada para estimar a quantidade de clorofila nas plantas e avaliar a saúde da vegetação, pois a energia é absorvida seletivamente pela clorofila e convertida em calor ou fluorescência, onde os pigmentos predominantes absorvem radiação na região do azul, mas somente a clorofila absorve na região do vermelho (Ponzoni et. al., 2012).

Localizada no espectro infravermelho próximo, a banda NIR, permite a identificação e a análise de áreas cobertas por vegetação, onde na região desta faixa espectral ocorre pequena absorção e considerável espalhamento interno da radiação na folha. Nessa região, a absorção da água é geralmente baixa e a reflectância é quase constante, o que significa que a água não absorve muita radiação nessa faixa espectral, permitindo que a radiação NIR seja usada para estimar a umidade do solo e a disponibilidade de água para as plantas (Ponzoni et. al., 2012, p. 25).

Estas imagens MODIS possuem comprimento de ondas entre 620 e 670 nm e 841 e 876 nm, respectivamente, e resolução espacial de 250 m, tem os produtos de reflectância de superfície corrigidos atmosféricamente para uma representação indireta (Fassoni-Andrade e Paiva, 2019).

Foram produzidos mapas com as séries temporais de reflectância com as bandas RED e NIR nos períodos de enchente, cheia, vazante e seca. Destas 92

imagens disponíveis, foram utilizadas 4 imagens representativas de diferentes períodos hidrológicos (Quadro 4):

Data	Período hidrológico
15/04	Enchente
28/07	Cheia
28/10	Vazante
14/02	Seca

Quadro 4: Imagens utilizadas e seus respectivos períodos hidrológicos.  
Fonte: O autor, 2024.

### Trabalho de campo

Um trabalho de campo foi realizado no dia 01/03/2023 para melhor compreensão do contexto local relacionando a UHE e o Lago de Balbina (Fig. 19.a e 19.b) proporcionando uma compreensão profunda e detalhada do ecossistema estudado.

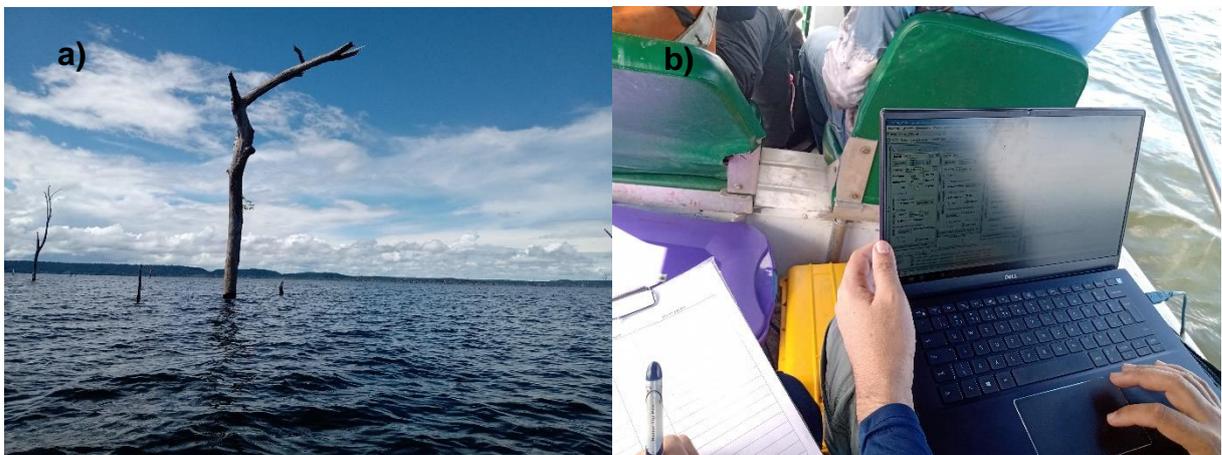


Fig. 19: Trabalho de campo. a) Observações *in situ*. b) Técnicas aplicadas em campo.  
Fonte: Diretorio de Fassoni-Andrade e Paiva (2019); USGS (2024).

### Procedimentos de análise

Para alcançar os objetivos, foram utilizadas geotecnologias, incluindo Sensoriamento Remoto (SR) e Sistema de Informação Geográfica (SIG). O software QGIS, por ser uma plataforma de acesso gratuito, foi usado para elaborar os mapas para análise. O programa Excel foi usado para tabular os dados, estatísticas

descriptivas e produzir gráficos. Para os análise dos parâmetros físico-químicos da água no lago de Balbina seguiu-se o fluxograma da Figura 20.

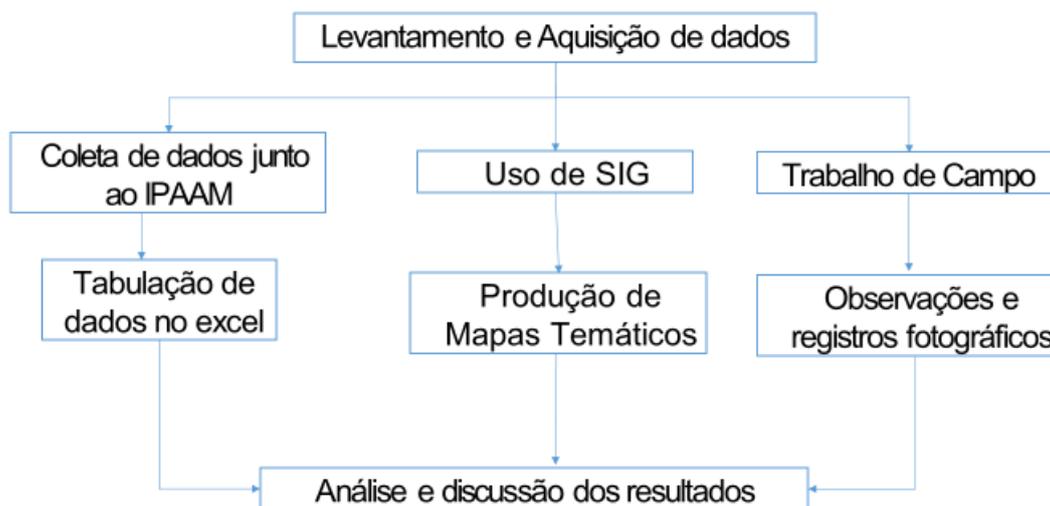


Fig. 20: Fluxograma dos procedimentos para análise dos parâmetros físico-químicos da água no lago de Balbina  
 Fonte: O autor, 2024.

Os parâmetros físico-químicos da qualidade da água foi determinada através de sondas de leitura direta, método de ensaio NBR 13736 e métodos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 21th Edition. Os valores de referência das condições e padrões de qualidade das águas doces da classe 1 são indicados pela Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 no Quadro 5.

Parâmetro	Valor de Referência
Condutividade Elétrica – CE	-
Potencial Hidrogeniônico – pH	6,0 a 9,0
Oxigênio Dissolvido – OD	>5 mg/L
Turbidez	Até 100 NTU
Sólidos Totais Dissolvidos - TDS	500 mg/L
Sólidos Totais Suspensos - STS	-
Sólidos Totais – ST	-

Quadro 5: Valores de referência para parâmetros de qualidade da água.

Fonte: CONAMA (2005). Organizado pelos autores (2023).

Nesta etapa dos procedimentos metodológicos foi realizada a tabulação dos dados amostrais referentes ao levantamento de variáveis limnológicas: Condutividade elétrica, Potencial hidrogeniônico – pH, Oxigênio dissolvido, Turbidez, sólidos totais dissolvidos e concentração de sedimentos em suspensão (CSS). Com o auxílio de Softwares como QGIS, pôde-se espacializar as coordenadas adquiridas nos laudos e tabular os dados em Excel.

Para os resultados sobre a CSS (mg/L) estimados com uso de dados MODIS, seguiu-se o fluxograma da Figura 21.

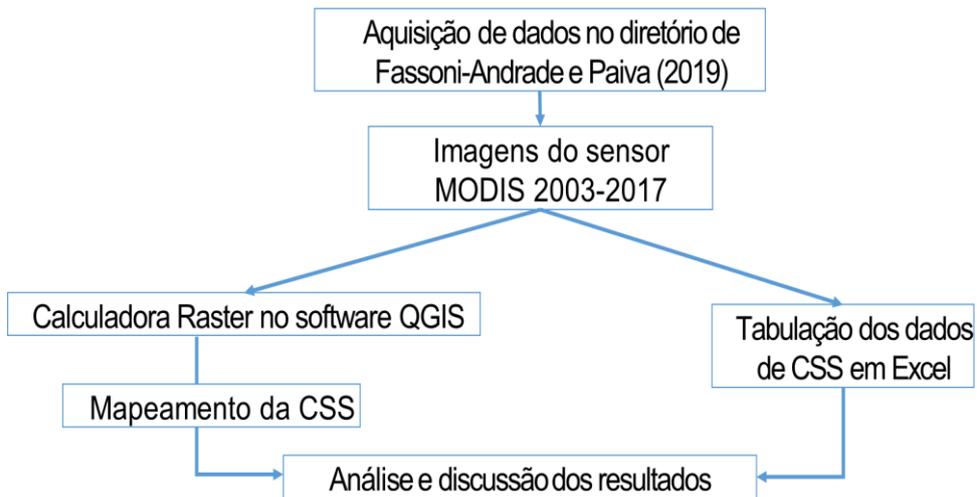


Fig. 21: Fluxograma dos procedimentos para análise da CSS  
Fonte: O autor

Marinho et. al. (2021) destaca a importância de estudar o sedimento suspenso com uso de dados de campo e de sensoriamento remoto no âmbito dos hidrossistemas e seus componentes espaciais e temporais, pois dá compreensão sobre a relação dos impactos climáticos e antrópicos que afetam os recursos hídricos.

A estimativa da CSS nas imagens foi obtida usando a composição MODIS de 4 dias disponibilizada no diretório da pesquisa de Fassoni-Andrade e Paiva (2019). A variabilidade do transporte de sedimento suspenso estimado pelo sensor MODIS foi analisada em função do regime hidrológico.

Para análise da dinâmica de sedimentos na água nos períodos de vazante e cheia em diferentes trechos do lago de Balbina, a CSS foi estimado com o modelo

empírico desenvolvido por Fassoni-Andrade e Paiva (2019) relacionando a reflectância das bandas RED e NIR do sensor MODIS, dado pela equação 1:

$$2.7182 \left( 20 \left( \frac{RED}{10000} \right) + 7.68 \left( \frac{NIR}{10000} \right) + 0.31 \left( \frac{\left( \frac{RED}{10000} \right)}{\left( \frac{NIR}{10000} \right)} \right) \right)$$

onde RED e NIR correspondem as bandas do vermelho e infravermelho, respectivamente.

A equação foi aplicada usando a caixa de ferramenta de processamento Raster Calculator (dentro de Análise Raster) no software QGIS 3.28 conforme a Fig.22.

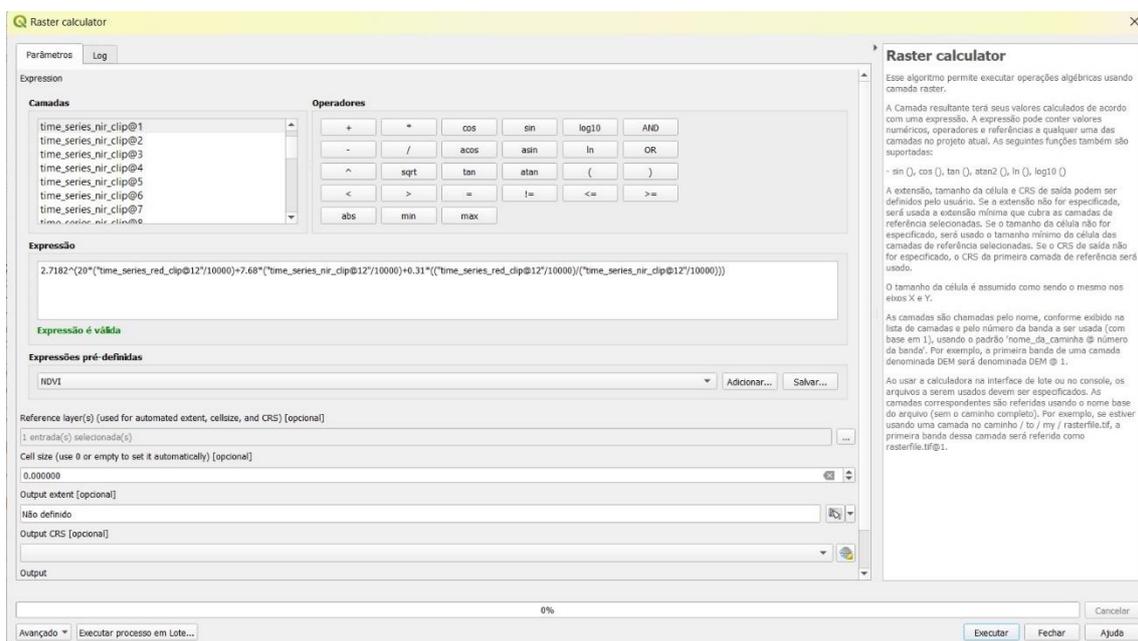


Fig.22: Análise Raster, recurso disponível no ambiente da plataforma.

Fonte: QGIS, 3.28

Em seguida realizou-se a amostra dos valores do raster para RED e NIR na calculadora de estatística, onde criou uma nova camada vetorial com os mesmos atributos da camada de entrada e os valores do raster correspondentes à localização de cada seção, conforme a Fig. 23.

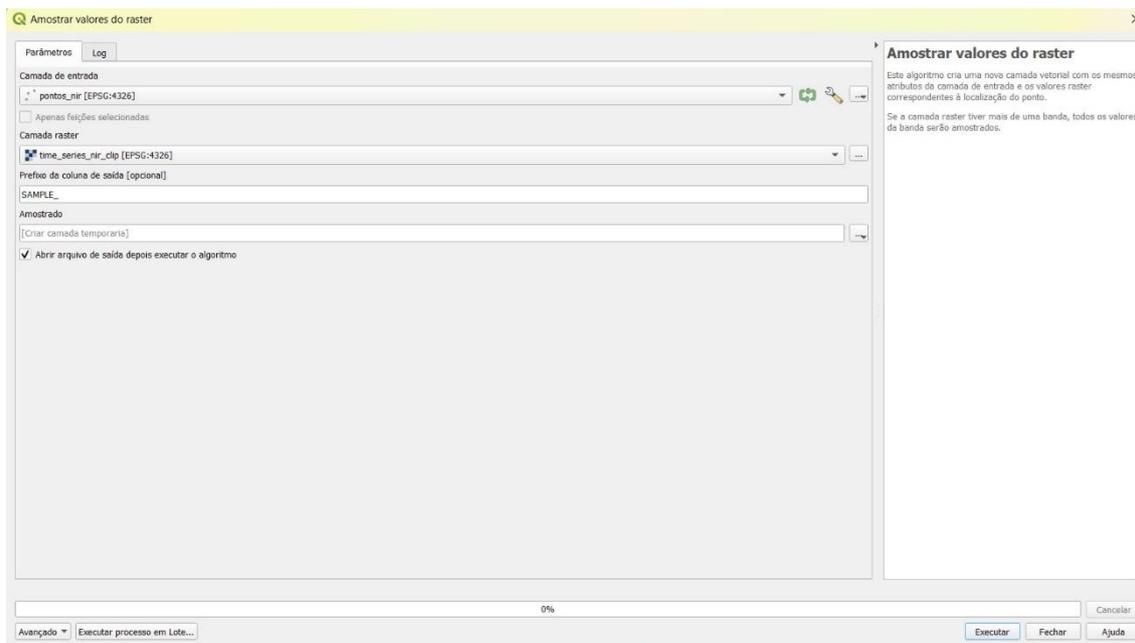


Fig. 23: Amostrar valores do raster, recurso disponível no ambiente da plataforma.  
Fonte: QGIS 3.28

As estimativas da CSS foram calculadas em média para cada mês do ano, permitindo o estudo da sazonalidade do transporte de sedimentos ao longo do lago durante o período de 2003 e 2017 usando a equação 1, e assim gerando gráficos e tabelas de estatísticas descritivas.

Foram usados gráficos de dispersão e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para relacionar as informações de CSS estimadas pelo sensor MODIS com os dados de nível da água.

## 5. RESULTADOS

### A qualidade de água no Lago de Balbina, Presidente Figueiredo – AM.<sup>1</sup>

Os parâmetros de qualidade da água abordados (Condutividade Elétrica, pH, Oxigênio Dissolvido, Turbidez, Sólidos Dissolvidos Totais, Sólidos Totais em Suspensão e Sólidos Totais) tiveram seus valores coletados em superfície, e os resultados apresentados a seguir foram agrupados em trechos representativos a montante e a jusante da UHE de Balbina, organizadas por período hidrológico dos anos de 2020 e 2021. Dentre os parâmetros observados, observou-se que no período de enchente (março) ocorreu os maiores valores, tanto a montante como a jusante. A Tabela 4 a seguir apresenta os dados agrupados a montante da UHE de Balbina.

	Enchente			Cheia			Vazante			Seca		
	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx
<b>CE</b> (µS/cm)	11,4	7,7	33,6	8,5	7,5	9,4	8,2	7,5	10,8	9,2	8,1	10,7
<b>pH</b>	6,5	6,2	6,8	6,2	5,9	6,4	6,8	6,5	7,0	6,3	6,0	6,6
<b>OD</b> (mg/L)	7,5	6,7	8,5	6,7	5,9	7,9	7,2	5,8	8,2	n.d	n.d	n.d
<b>Turbidez</b> (NTU)	1,9	1,1	2,6	1,3	0,6	2,4	1,5	1,0	5,5	1,9	1,3	3,5
<b>STD</b> (mg/L)	7,8	4,8	24,0	5,5	4,8	6,1	4,7	1,0	5,7	5,7	5,1	6,8
<b>STS</b> (mg/L)	6,5	1,0	26,0	2,2	1,0	5,0	3,2	1,0	17,0	1,5	1,0	2,0
<b>ST</b> (mg/L)	4,2	1,0	8,1	7,5	5,4	10,2	6,2	0,1	10,6	7,2	6,1	8,8

Tab. 4: Estatística descritiva para as variáveis físico-químicas da água em superfície do Rio Uatumã à montante (2020 a 2021) da UHE Balbina

Fonte: IPAAM (2022). Organizado pelo autor (2023). \*n.d.: Dado não disponível.

O laudo disponibilizado pelo IPAAM não indica valores de referência para a Condutividade Elétrica. Entretanto, se comparado ao estudo de Silva et. al, (2013), a condutividade elétrica do Lago de Balbina pode ser considerada com baixa carga iônica, uma vez que os valores mínimos e máximos variou entre 7,7 e 33,6 µS/cm (Tab. 4), respectivamente.

<sup>1</sup> Resultados apresentados no capítulo publicado do livro “Amazônia em Múltiplas Escalas – Volume 3” do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas.

Conforme destacado anteriormente, a Resolução CONAMA 357/2005 estabelece limites para os parâmetros de água, indicando que a faixa de pH deve ser entre 6 e 9. No caso específico do Lago de Balbina, foram identificados valores de pH entre 5,9 (mínimo) e 7,0 (máximo). As águas pretas na região amazônica são caracterizadas por altos níveis de matéria orgânica dissolvida e lhe conferindo uma cor escura, sendo extremamente ácidas e pobres em nutrientes.

A empresa Amazonas Geração e Transmissão de Energia não apresentou em seus laudos dados de OD no período da seca nos anos de 2020 e 2021. O valor de referência do CONAMA indica que deve ser maior que 5. Em Balbina foi encontrado valores de OD variando de 5,8 a 8,5 mg/L .

Os valores encontrados na turbidez do lago variaram de 0,6 a 5,5. Quando a turbidez é de 10 NTU, isso significa que a água está moderadamente turva e é possível perceber uma certa opacidade ou turvação visualmente. A água do Lago de Balbina pode ser considerada como uma água clara, pois geralmente, quanto menor a turbidez, maior a transparência.

Dos parâmetros analisados, podemos dizer que o mínimo e o máximo de 1,0 e 24,0 mg/L dos Sólidos Totais Dissolvidos estão em quantidades adequadas, pois, se em excesso, podem causar problemas de eutrofização, levando ao crescimento expressivo de algas e deterioração da qualidade da água. O acúmulo de sedimentos devido a altos níveis de STS pode levar ao assoreamento de corpos d'água, prejudicando a navegabilidade e afetando os habitats aquáticos, porém não é o caso do lago de Balbina, haja vista que os valores variando de 1,0 e 26,0 mg/L é considerada baixa concentração de sedimento suspenso. Nos Sólidos Totais foram observados valores variando de 1,0 e 10,6 mg/L, uma vez que essas partículas são responsáveis por espalhar e dispersar a luz, tornando a água pouco turva e opaca.

O gráfico da Figura 24 apresenta os valores médios para os parâmetros analisados e indica que o regime hidrológico do lago de Balbina se manteve dentro dos padrões durante a variação temporal das estações localizadas a montante da barragem.

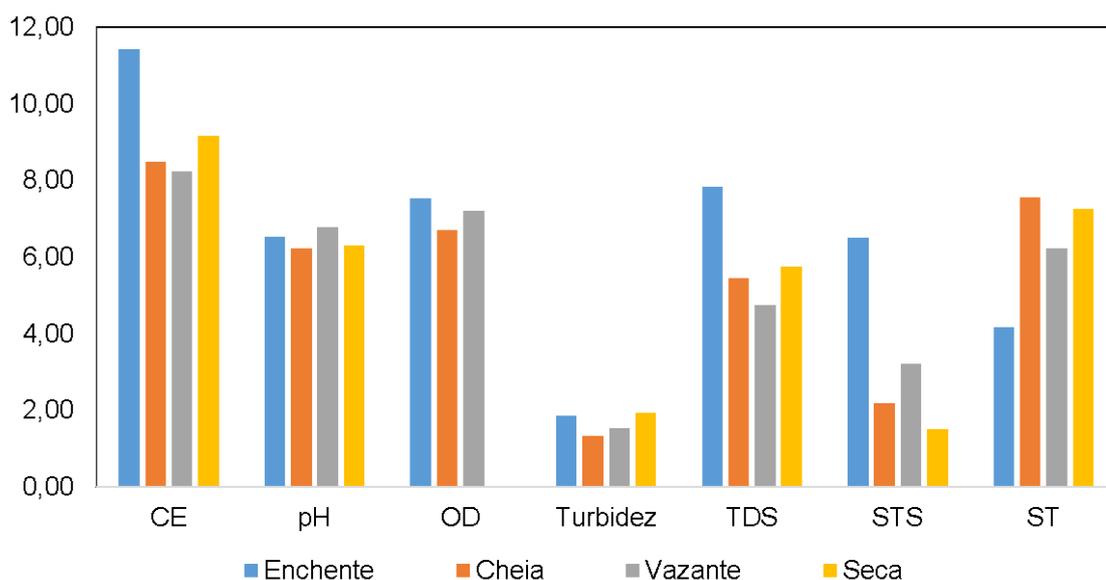


Figura 24: Valores médios dos parâmetros físico-químicos da qualidade da água a montante da UHE de Balbina (2020 e 2021). Fonte: IPAAM (2022). Organizado pelos autores (2023).

A Tabela 5 apresenta os dados físico-químicos do Rio Uatumã observados a jusante da UHE de Balbina.

	Enchente			Cheia			Vazante			Seca		
	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx
<b>CE</b> ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	11,0	7,2	30,2	8,2	6,4	9,0	8,9	8,2	9,7	8,8	8,3	9,6
<b>pH</b>	6,1	5,7	6,4	6,1	5,9	6,3	6,5	6,1	6,9	6,1	5,1	6,7
<b>OD</b> (mg/L)	5,8	5,0	6,4	5,8	4,3	6,9	7,1	6,3	7,8	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Turbidez</b> (NTU)	3,4	2,6	4,0	1,6	1,3	1,9	1,5	1,1	2,5	2,2	1,5	3,4
<b>STD</b> (mg/L)	7,3	4,5	20,6	5,4	5,0	5,7	5,9	5,2	6,6	5,8	5,3	6,8
<b>STS</b> (mg/L)	6,8	1,0	25,6	1,7	1,0	3,0	1,8	1,0	5,0	1,3	1,0	2,0
<b>ST</b> (mg/L)	4,2	2,0	6,0	7,1	6,2	8,3	7,7	6,2	10,8	6,4	0,0	7,8

Tab. 5: Estatística descritiva para as variáveis físico-químicas da água em superfície do Rio Uatumã à jusante (2020 a 2021) da UHE Balbina.

Fonte: IPAAM (2022). Organizado pelo autor, (2023). \*n.d.: Dado não disponível.

A condutividade elétrica média da água foi de 11,01  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor que indica quantidade relativamente baixa de íons dissolvidos ou eletrólitos durante a enchente

no trecho a jusante da UHE. O pH médio esteve dentro do valor de referência e houve pouca variação durante o ciclo hidrológico, com máxima de 6,46 na vazante e mínima de 6,11 na enchente. O oxigênio dissolvido apresentou maior média durante a vazante, com concentração de 7,1 mg/L. A turbidez apresentou valores máximos de 4,0 NTU durante a enchente entre as amostras coletadas à jusante, observando-se uma água relativamente clara.

A concentração de Sólidos Totais Dissolvidos indicou valores variando de 4,5 e 20,6 mg/L, mínimo e máximo, maior amplitude observada durante o período de enchente. Os Sólidos Totais podem incluir nutrientes essenciais para o crescimento de plantas e algas, como nitratos, fosfatos e sulfatos e foi observado que valores máximos, da ordem de 7,7 mg/L ocorreu no período da vazante. O gráfico da Figura 25 apresenta os valores médios dos parâmetros analisados nas estações localizadas a jusante da barragem.

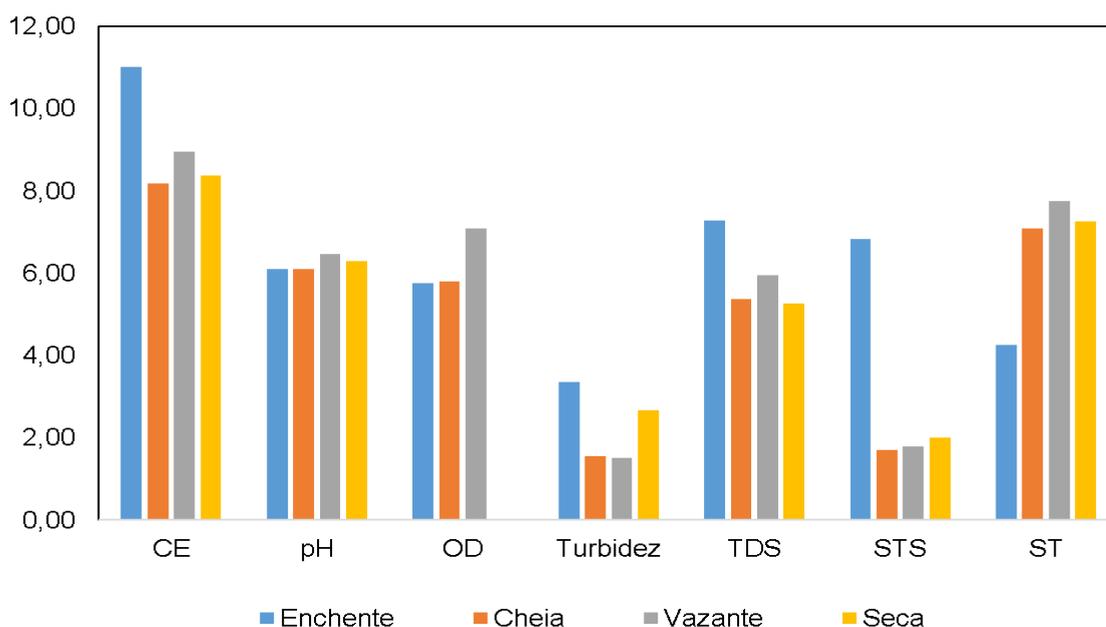


Fig. 25: Valores médios dos parâmetros de qualidade da água do Rio Uatumã a jusante da UHE de Balbina (2020 e 2021). Fonte: IPAAM (2022). Organizado pelos autores (2023).

O valor dos sólidos totais suspensos (STS) máximo atingido foi de 26 mg/L durante a enchente. A erosão do solo e a presença de partículas em suspensão são fatores que podem contribuir para o aumento dos sólidos totais suspensos na água. Esses processos podem ser influenciados por diversas variáveis, como chuvas

intensas, desmatamento, práticas agrícolas inadequadas ou atividades de construção próximas aos corpos d'água.

Os parâmetros de qualidade da água identificam que os dados encontrados estão dentro do padrão estabelecido pelo CONAMA. Destaca-se que o lago de Balbina é uma área altamente geradora de gases de efeito estufa, com a madeira morta, tipo paliteiras, se decompondo acima d'água numa escala de tempo relativamente curta (ABRIL et al., 2013). Portanto é sempre necessário avaliar como a barragem pode afetar o fluxo do rio, a qualidade da água e a quantidade de sedimentos transportados.

Foi possível comparar os resultados obtidos neste estudo com estudos realizados do Rio Uatumã antes da construção da UHE. A Tabela 6 representa os valores mínimos e máximos das variáveis nos períodos antes e depois da instalação da UHE Balbina.

<b>Parâmetro</b>	<b>Fev.-Mar/83 (Mín – Máx)</b>	<b>Mar/2020-2021 (Mín – Máx)</b>
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	14,0 – 30,0	7,7 - 33,6
pH	4,2 – 5,9	6,2 - 6,8
OD (mg/L)	5,5 – 7,0	6,7 - 8,5
Turbidez (NTU)	-	1,1 - 2,6
STD (mg/L)	-	4,8 - 24,0
STS (mg/L)	1,4 – 6,4	1,0 - 26,0
ST (mg/L)	-	1,0 - 8,1

Tab. 6: Variação dos parâmetros limnológicos no curso principal do Rio Uatumã, antes e depois da instalação da hidrelétrica de Balbina.

Fonte: Adaptado de Santos e Oliveira Jr (1999) e IPAAM (2022). Organizado pelo autor (2023).

Algumas diferenças podem ser observadas em relação aos valores, como o aumento na Condutividade Elétrica que variavam entre 14 e 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  antes da construção da barragem, sendo uma amplitude de 16  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , e depois passou a ter valores mínimos e máximos entre 7,7 à 33,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , caracterizando em uma amplitude de 25,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , porém segundo a Resolução da CONAMA n° 357/2005 não há um valor de referência para este parâmetro; houve o aumento do pH da água em seus

valores mínimos e máximos; e o discreto aumento da amplitude do oxigênio dissolvido na água de 1,5 para 1,8 mg/L. É necessário destacar o valor máximo de STS encontrado a montante da barragem durante a enchente com 26 mg/L, sendo que antes da construção o valor era de 6,4 mg/L, 4 vezes menor.

Outros valores em que podem ser observados são as diferenças na amplitude dos parâmetros físico-químicos à montante e a jusante da UHE. Dentre os períodos hidrológicos, pôde-se observar que as medidas de Sólidos Totais em Suspensão encontradas, caracterizam que na vazante ocorre a maior retenção de sedimento suspenso à montante da UHE (Tabela 7). Entender essa variação espacial e temporal é importante para compreender como ocorre os processos de erosão na área de influência da barragem.

Amplitude								
	Enchente		Cheia		Vazante		Seca	
	Mont.	Jus.	Mont.	Jus.	Mont.	Jus.	Mont.	Jus.
<b>CE</b>	25,9	23	1,9	2,6	3,3	1,5	2,6	1,3
<b>pH</b>	0,6	0,7	0,5	0,4	0,5	0,8	0,6	1,6
<b>OD</b>	1,8	1,4	2	2,6	2,4	1,5	n.d.	n.d.
<b>Turbidez</b>	1,5	1,4	1,8	0,6	4,5	1,4	2,2	1,9
<b>STD</b>	19,2	16,1	1,3	0,7	4,7	1,4	1,7	1,5
<b>STS</b>	25	24,6	4	2	16	4	1	1
<b>ST</b>	7,1	4	4,8	2,1	10,5	4,6	2,7	7,8

Tab. 7: Amplitude dos parâmetros físico-químicos, à montante e à jusante da UHE Balbina (2020-2021).

Fonte: IPAAM (2022). Organizado pelo autor (2023).

## **Dinâmica do Sedimento Suspenso no Lago de Balbina por Sensoriamento Remoto**

O estudo proposto buscou empregar imagens do sensor MODIS como ferramenta no monitoramento da dinâmica hidrossedimentar no Lago de Balbina. Essa abordagem visou entender mudanças ambientais, suas interações e as implicações decorrentes para os ecossistemas fluviais.

A concentração de sedimentos suspensos transportados e distribuídos ao longo do rio, ajuda a entender como materiais, seja nutriente e/ou poluente (produtos químicos e metais pesados), causam impactos ambientais, assim buscando medidas de gestão que protejam os hidrossistemas. Esses poluentes podem contaminar o solo e afetar a qualidade da água, tornando-se inadequados para uso agrícola ou representando riscos para a saúde humana e ambiental.

Altas concentrações de sedimentos suspensos na água podem alterar a composição do solo ribeirinho durante enchentes ou eventos de alta vazão. Isso pode levar à perda de solo fértil e à degradação das margens do rio, afetando negativamente a capacidade das comunidades ribeirinhas de utilizar essas áreas para agricultura, habitação ou outras atividades.

As barragens geralmente retêm uma grande quantidade de sedimentos que são transportados pelo rio. Isso acontece porque a água desacelera ao entrar no reservatório da barragem, permitindo que os sedimentos se depositem no fundo. Como resultado, a quantidade de sedimentos suspensos que chegam às áreas a jusante da barragem é reduzida.

A redução dos sedimentos suspensos pode afetar a disponibilidade de habitat e alimentos para organismos aquáticos que dependem desses sedimentos para sobreviver, podendo afetar a fertilidade e a estabilidade do solo em áreas ribeirinhas a jusante da barragem e conseqüentemente na agricultura de subsistência da qual as comunidades dependem.

Fearnside discorre sobre o impacto causado pela retenção do sedimento nas UHE do Rio Madeira:

“A construção da Barragem de Cachuela Esperanza, no rio Beni deverá resultar em retenção de uma quantidade substancial de sedimentos, o que seria acrescentado aos efeitos de Jirau e Santo Antônio para produzir riscos ainda não analisados de aumento de erosão fluvial e de redução de fluxos de nutrientes no baixo rio Madeira e no rio Amazonas” (Fearnside, 2015, p. 143).

Na Bacia Amazônica, pela sua vasta extensão, há poucas estações que contribuam para uma rede de coleta de dados sobre monitoramento hidrológico e sedimentológico e que possibilite análises mais detalhadas de lagos na planície de inundação. Assim, o uso de sensoriamento remoto que detecte essas informações se torna uma ferramenta eficaz na aquisição dos dados em áreas de difícil acesso e monitoramento tradicionalmente limitado (Marinho et. al, 2021).

Foi possível identificar onde se encontram as áreas de maior concentração de sedimento suspenso ao longo do lago de Balbina a partir das imagens MODIS. A Figura a seguir demonstra a distribuição da CSS nos períodos de enchente (Fig. 26.a), cheia (Fig. 26.b), vazante (Fig. 26.c) e seca (Fig. 26.d).

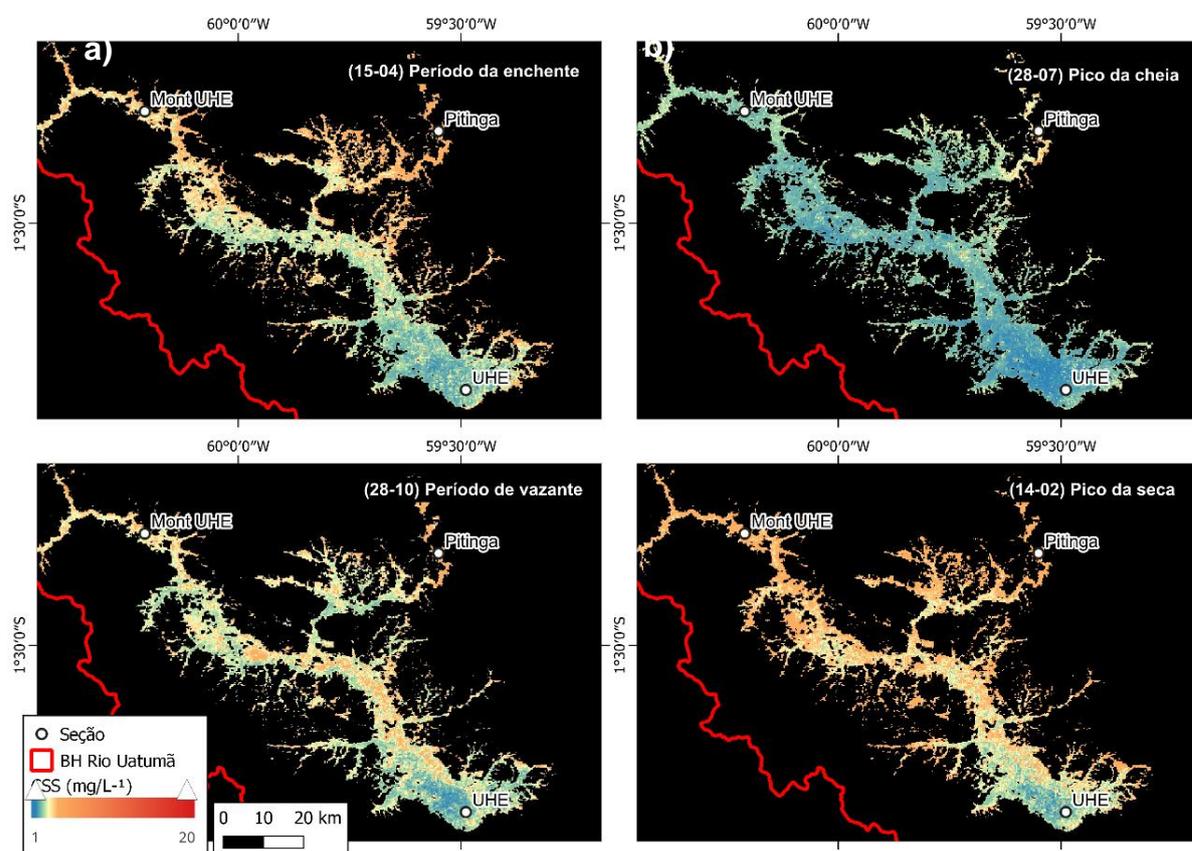


Fig. 26: Distribuição da CSS no Lago de Balbina. a) Período de enchente; b) Pico da cheia; c) Período de vazante; e d) Pico da seca. Média das imagens do período 2003-2017.

Fonte: Diretório de Fassoni-Andrade e Paiva (2019)

O mapeamento revelou que, durante a cheia, a região do Rio Pitinga apresenta maior concentração de sedimento suspenso (Fig. 26.b). Durante os períodos de vazante e seca, os picos de CSS podem ser associados ao momento em que o Lago de Balbina reduz sua área de superfície, profundidade e volume de água. Devido à baixa profundidade do lago, existe a possibilidade de ressuspensão do sedimento (Marinho et. al., 2022).

Na seção UHE, próximo a barragem, mesmo no pico de seca (Fig. 26d) o sedimento suspenso permanece em baixa concentração e conserva-se assim durante todas as estações do ano.

Este estudo avaliou 92 imagens do sensor MODIS do período de 2003-2017, uma série histórica de 15 anos, e a CSS mínima e máxima estimada para o Lago de Balbina foi de 1,62 mg/L na seção UHE e 16,60 mg/L na seção Pitinga, respectivamente.

A partir deste conjunto de mapas foram analisados valores mínimos, máximos, médios e a amplitude estimada para cada seção. Destaca-se que a seção de Pitinga registrou o maior valor médio anual, com 6,33 mg/L de sedimento suspenso (Tabela 8).

<b>Seção</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Média anual</b>
<b>UHE</b>	1,62	3,66	2,04	2,19
<b>Montante</b>	2,11	7,30	5,19	3,49
<b>Pitinga</b>	3,53	16,60	13,07	6,33

Tab. 8: Estatística da CSS (mg/L) estimada média anual com uso de dados MODIS.

Fonte: O autor, 2024.

Essa concentração pode ser considerada significativa, principalmente quando condiz com a fala de Fearnside (2015, p.108):

“Deve ser lembrado que o assoreamento começará no extremo superior da represa. Caso os sedimentos entupam parcialmente a passagem estreita entre as duas partes da represa, a chance de haver maiores e mais freqüentes inundações na área dos Waimiri-Atroari seria bastante aumentada”.

Ao longo dos meses, especialmente na seção Pitinga foi onde se observou maior variação na CSS, com uma amplitude de 13,07 mg/L. Nos períodos de cheia e seca esta seção mostrou-se ser inversamente proporcional ao nível de cota com

relação a CSS, onde quanto maior foi a cota, menor foi o sedimento e vice versa. A Figura 27 apresenta a CSS estimada mensalmente com relação ao nível da cota e o pico de concentração durante eventos de maiores precipitações possibilitando que essas variações sejam significativas devido a atividades como a extração mineral.

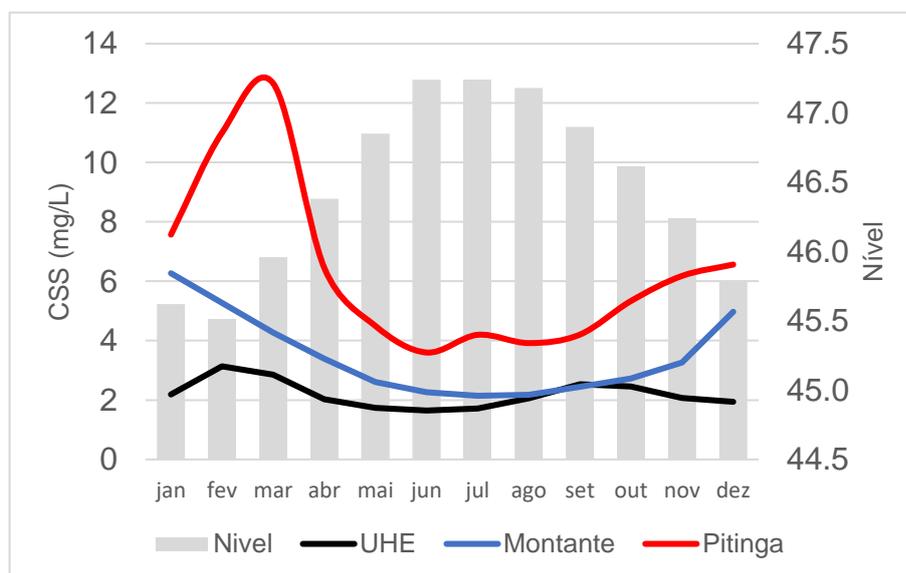


Fig. 27: Gráfico da CSS estimado mensal x Nível do lado de Balbina. Fonte: Diretório de Fassoni-Andrade e Paiva (2019); Theia (2023).

Com essas informações pode-se notar que a concentração na seção UHE se manteve constante ao longo do ano, praticamente não sofrendo influência do nível de cota. Porém a seção Montante teve uma discreta variação de 5,19 mg/L na amplitude da CSS.

Nesta série de dados, foram observados que as três seções possuem valores médios de CSS divergentes entre si, seja na enchente ou na seca, e que para fins de monitoramento do comportamento das águas superficiais no lago de Balbina seria necessária uma estação hidrossedimentométrica nesta região. Marinho et. al. (2022), ressalta a dificuldade para o monitoramento da dinâmica de transporte de sedimentos suspensos em rios com baixa densidade de estações instaladas.

A análise das variações na CSS demonstrou que é importante investigar o seu impacto na qualidade da água, na saúde dos ecossistemas aquáticos e na disponibilidade de recursos hídricos para a área de abrangência da UHE Balbina. Com a disponibilização de dados de sensores remotos como o MODIS, nos dá suporte para

entender melhor os processos hidrológicos de forma viável, bem como o planejamento ambiental e a prevenção de problemas relacionados à erosão e sedimentação.

A Figura 28 apresenta a variabilidade média mensal da CSS obtida para esta série histórica (2003-2017), onde se observou baixa correlação na concentração de sedimento suspenso com a variabilidade média mensal da cota do lago na seção UHE ( $R^2 = 0,34$ ), utilizando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para quantificar o quanto da variabilidade de uma variável pode ser explicada pela outra.

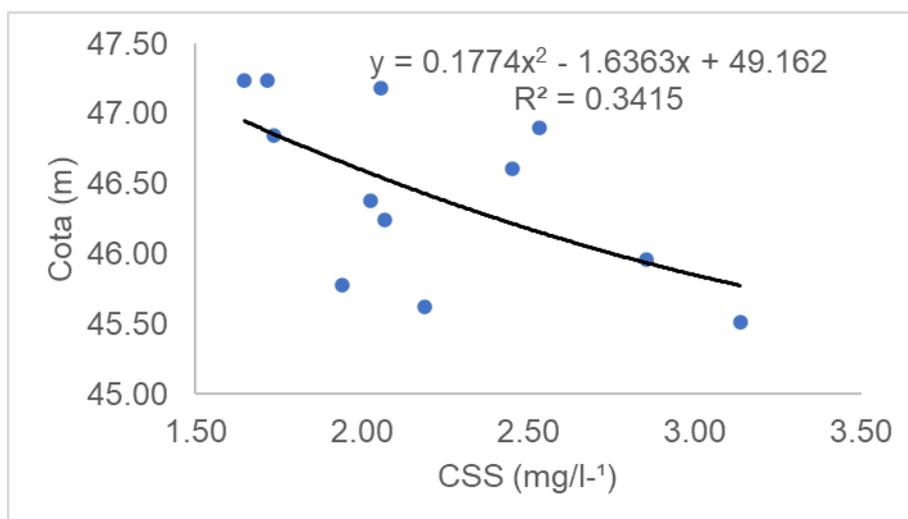


Fig. 28: Gráfico de dispersão da CSS estimada mensal x Cota média mensal do lago de Balbina na UHE. Fonte: Diretório de Fassoni-Andrade e Paiva (2019); Theia (2023).

Este baixo coeficiente de determinação indica que a relação entre essas variáveis é fraca ou que outros fatores significativos estão influenciando a variabilidade observada, por exemplo, precipitação e ações antropicas.

A Figura 29 apontou a melhor correlação no coeficiente de determinação com a variabilidade média mensal da cota na seção Montante ( $R^2 = 0,98$ ) entre as três seções, pois quanto mais próximo de 1, mais correlacionáveis são os dados, então possivelmente, o sedimento depende da cota, ou seja quanto maior é o sedimento, menor é a cota.

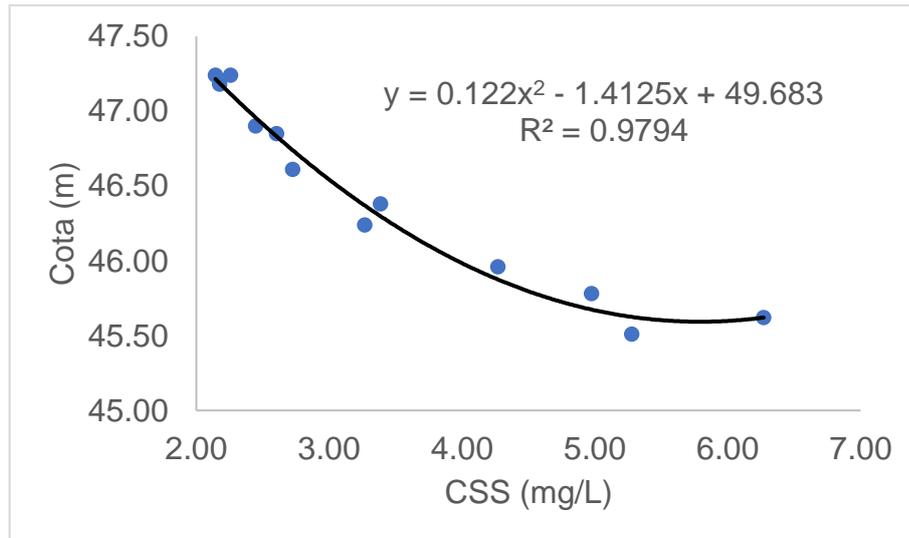


Fig. 29: Gráfico de dispersão da CSS estimada mensal na seção Montante x Cota do lago de Balbina. Fonte: Diretório de Fassoni-Andrade e Paiva (2019); Theia (2023).

Na Figura 30, a seção Pitinga demonstrou que a dispersão representada pelos dados das variáveis de cota e CSS, obteve-se o  $R^2 =$  de 0,93 de coeficiente de determinação dos valores estatísticos, sendo então correlacionáveis. Assim, significa que as cotas em duas das três seções são relevantes para a dinâmica do sedimento.

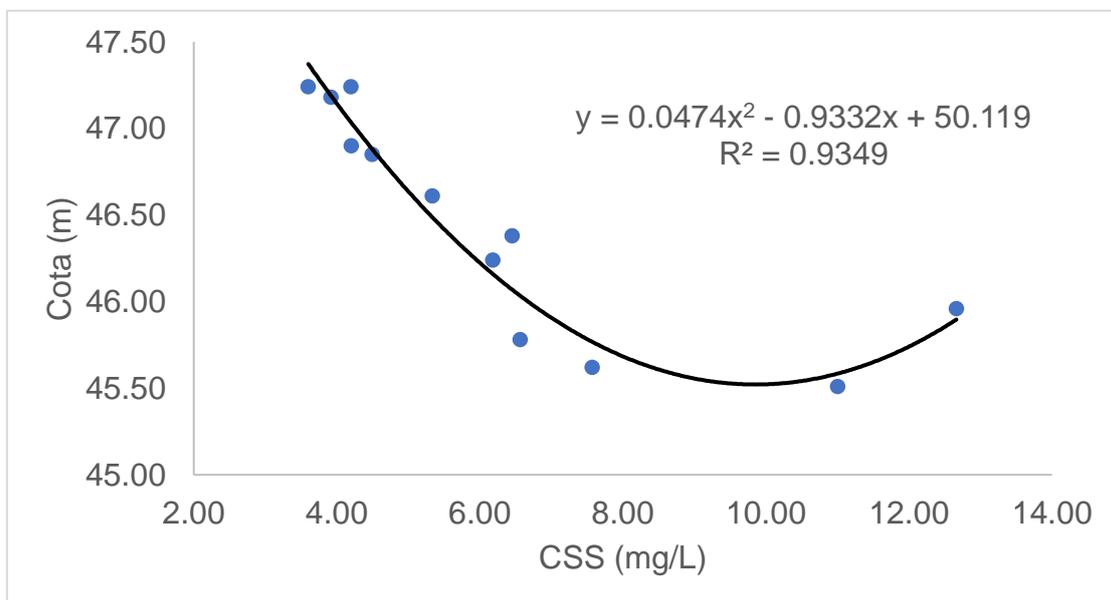


Fig. 30: Gráfico de dispersão da CSS estimada mensal x Cota na seção Pitinga. Fonte: Diretório de Fassoni-Andrade e Paiva (2019); Theia (2023).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia do Rio Uatumã tem uma importância ecológica em toda a sua extensão, mas enfrenta desafios significativos devido as atividades humana, como a geração de energia, o desmatamento, a mineração e a expansão agrícola. Portanto, a conservação e o manejo sustentável dessa área são fundamentais para garantir a preservação de sua biodiversidade única e dos serviços ecossistêmicos que ela oferece.

A análise hidrológica da Bacia do Rio Uatumã, especialmente no Lago de Balbina, é fundamental para o manejo sustentável dos recursos hídricos e para a proteção dos ecossistemas aquáticos na região, sendo assim, os resultados desta pesquisa contribuem para esse entendimento.

O lago de Balbina se formou a partir da criação do reservatório da UHE de Balbina, e desde então seu ecossistema vem sofrendo com a intervenção humana e o impacto gerado pela sua ação.

A extensão continental da Bacia Amazônica exige que se busque opções para o monitoramento da região e contornar a escassez de informações, seja para gestão dos recursos hídricos, supervisão do uso e cobertura da terra, alertas de desmatamentos, proteção da fauna e da flora.

Esta pesquisa buscou apresentar alternativas para a análise da dinâmica espacial e temporal da qualidade da água no lago de Balbina, Presidente Figueiredo (AM), usando como suporte dados de parâmetros físico-químicos que foram coletados *in situ* pelo IPAAM e dados de sensoriamento remotos.

Com base nos dados coletados e na compreensão da dinâmica hidrológica da bacia, pôde-se analisar cheias e secas, que são vitais para o planejamento e gestão dos recursos hídricos na região, bem como avaliar os impactos ambientais das atividades humanas na bacia e a proposição de medidas de mitigação para minimizar esses impactos e promover o uso sustentável.

As etapas e os aspectos da análise hidrológica da bacia do rio Uatumã envolvem compreender o seu comportamento e como esses fatores, incluindo as precipitações, escoamento superficial, características dos cursos d'água, impactam nas comunidades da área de influência da UHE Balbina.

Os resultados referentes à análise dos parâmetros físico-químicos do Lago de Balbina, demonstram que condutividade elétrica, com valor médio anual de 9,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indica uma baixa presença de íons dissolvidos na água, característica típica de ambientes oligotróficos. O pH médio de 6,4, ligeiramente ácido, está dentro da faixa esperada para corpos d'água da região Amazônica, sugerindo a influência de matéria orgânica em decomposição.

O Oxigênio Dissolvido, com média de 7,1 mg/L, reflete a oxigenação e a elevada troca gasosa no ambiente. A turbidez, com valor médio de 1,6 NTU, corrobora a baixa concentração de partículas em suspensão, o que se alinha aos valores de Sólidos Totais em Suspensão e Sólidos Totais Dissolvidos, que apresentaram médias anuais de 3,3 mg/L e 5,9 mg/L, respectivamente. O valor médio dos Sólidos Totais, de 6,2 mg/L, reforça a natureza de águas claras do lago. As variações na Condutividade Elétrica, de 16  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para 25,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  antes e depois da construção da barragem, destacam a importância do monitoramento, pois esse parâmetro indica a concentração de íons na água e possíveis contaminantes.

Esses resultados evidenciam que o Lago de Balbina, apesar de sua artificialidade, mantém características físico-químicas que favorecem a conservação da qualidade de suas águas. Esses dados são fundamentais para o planejamento de estratégias de manejo e preservação do ecossistema, contribuindo para a sustentabilidade ambiental da região.

Analisando todos os parâmetros em conjunto, foi possível verificar que a variação anual indicou maiores valores no período de enchente, porém com dados em equilíbrio tanto para montante quanto para jusante. Contudo, a amplitude dos valores no período de vazante foi mais divergente entre os pontos, destacando que a jusante recebeu menor aporte de sedimento total, suspenso e dissolvido.

Os resultados de CSS estimados com imagens MODIS mostraram valores médios anuais de 2,19 mg/L na seção UHE, 3,49 mg/L na seção Montante e 6,33 mg/L na seção Pitinga. A análise dos períodos hidrológicos revelou que a distribuição do sedimento suspenso varia entre as seções do lago, com a maior concentração ocorrendo durante o pico da seca.

A coleta e análise das informações provenientes de pesquisas têm o potencial de embasar decisões estratégicas e fundamentais em diversos setores, tais como a

gestão hídrica, a prevenção de desastres naturais e a preservação ambiental. A aplicação prática do uso de imagens do sensor MODIS para estimar a concentração de sedimento suspenso (CSS) se mostra uma alternativa muito viável, considerando outros sensores.

Recomenda-se que estudos futuros incluam a análise da dinâmica hidrossedimentar com base em dados de descarga líquida. A incorporação desses dados permitirá uma compreensão mais detalhada dos processos de transporte e deposição de sedimentos, possibilitando a identificação de padrões sazonais e suas influências na qualidade da água.

## 7. REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. **Amazônia: do discurso a práxis**. São Paulo: Edusp, 1996.
- ABRIL, G. et al. Wood decomposition in Amazonian hydropower reservoirs: An additional source of greenhouse gases. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 104–107, jul. 2013.
- ALVES, N. S. **Mapeamento hidromorfodinâmico do complexo fluvial de Anavilhanas. Contribuição aos estudos de Geomorfologia Fluvial de rios Amazônicos**. Tese (Doutorado) – Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, 2013.
- ANA. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 14/07/2023.
- APHA, A.W. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22nd ed. Washington.: American Public Health Association, 2012.
- BALDISSERI, D. H. As transformações espaciais e os impactos ambientais na Bacia do Uatumã AM, Brasil. **Anais do XX Encontro de Geógrafos da América Latina**. São Paulo: USP, 2005.
- BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MARTINS, V.S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações**. 1ª edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 161p. 2019.
- BELÉM, F.; CABRAL, J.B.P. Dinâmica da paisagem na bacia hidrográfica da Usina Hidrelétrica de Ferreira Gomes – Amapá. **Caderno de Geografia**, v.29, n.56, 2019.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.
- CATÁLOGO DE METADADOS DA ANA. **Cota x Área x Volume dos Reservatórios de Usinas Hidrelétricas**. Data da publicação: 03/12/2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b8f0487a-df73-4f8d-8b22-bb49cf9f3683>. Acesso em: 01/04/2024.
- CONAMA. Conselho Nacional Do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.
- D24AM. **Chuvas obrigam hidrelétrica de Balbina a abrir comportas**. Disponível em: <https://d24am.com/amazonia/chuvas-obrigam-hidreletrica-de-balbina-a-abrir-comportas/>. Acesso: 13 de julho de 2022.
- EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento**. Campinas, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento> >. Acesso em: 06 out. 2023.

EMBRAPA. **TERRA – Earth Observing System (EOS)**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/terra>. Acesso em: 06/04/2024.

ESPINOZA-VILLAR, R.; MARTINEZ, J.M.; ARMIJOS, E.; ESPINOZA, J.C.; FILIZOLA, N.; DOS SANTOS, A.; WILLEMS, B.; FRAIZY, P.; SANTINI, W.; VAUCHEL, P. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). **Comptes Rendus Geoscience**, vol. 350, no. 1–2, p. 4–12, Jan. 2018. DOI 10.1016/j.crte.2017.05.001. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631071317300469>.

FASSONI-ANDRADE, A. C.; PAIVA, R. C. D. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon, **Remote Sensing of Environment**, Volume 221, 2019, Pages 94-107, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.038>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718305005>).

FEARNSIDE, P.M. 2014. Análisis de los principales proyectos hidro-energéticos en la región amazónica. **Derecho, Ambiente y Recursos Naturales (DAR) & Centro Latinoamericano de Ecología Social (CLAES)**, Lima, Peru. 55 p

FEARNSIDE, Philip M. **Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras**. Manaus: Editora do INPA, 2015.

FLORENZANO, T.G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

FONTES. A.L. **Geomorfologia fluvial e hidrografia**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2010.

FREIRE, L.M.; LIMA, J.S.; SILVA, E.V. Belo Monte: fatos e impactos envolvidos na implantação da usina hidrelétrica na região Amazônica Paraense. **Sociedade & Natureza**, v. 30, p. 18-41, 2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 01/11/2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/presidente-figueiredo.html>. Acesso em: 20/03/2023.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2015. 430 p.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos do INMET**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 15/04/2024.

IPAAM. Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas. **Licença de Operação Nº 023/87-16**. Departamento de análises laboratoriais. Projeto de Monitoramento limnológico. Resultado de análise físico-química. Fl. Nº 2833-3208. Acesso em: 11/10/2022.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

KLEIN, G.N. **Avaliação do estado da arte da gestão na Reserva Biológica do Uatumã**. Ciclo de Formação em Gestão para Resultados do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Iperó, 2015).

MARINHO, R. R. Dinâmica hidrossedimentar de grandes rios amazônicos por meio de dados do sensor MODIS. In.: VIEIRA, A. F. S. G.; MOLINARI, D. C. (Org.) **Geografia Física da Amazônia**, Volume 2, 2021.

MARINHO, R.R.; FILIZOLA JUNIOR, N.P.; MARTINEZ, J.M.; HARMEL, T. Suspended sediment transport estimation in Negro River (Amazon Basin) using MSI/Sentinel-2 data. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 2022, v.23, n. 1; (Jan-Mar) DOI: 10.20502/rbg.v23i1.2076.

MARINHO, R.R.; WACHHOLZ, F.; SOUZA, R. Monitoramento do sedimento suspenso no Lago Catalão (Iranduba, AM) com dados Landsat-8. **Geografia por sensoriamento remoto**. 1ed. Canoas: Mérida Publishers, p. 34-44, 2021.

MONTOYA, A.D.V.; LIMA, A.M.M.; ADAMI, M. Mapeamento e Análise Temporal da Paisagem no Entorno do Reservatório de Tucuruí-PA. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ - Vol. 41 - 2 / 2018** p. 553-567. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908.

MORAIS, E.S.; MONTANHER, O.C. Ajustamento fluvial à agropecuária, urbanização e reservatório e análise cientométrica do impacto dessas atividades nos rios brasileiros. **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. 2022.

MUNDOGEO. **O sensor MODIS a bordo das plataformas Terra e Acqua**. Atualizado em: 13 fev. 2012. Disponível em: <https://mundogeo.com/2004/05/23/o-sensor-modis-a-bordo-das-plataformas-terra-e-acqua/>. Acesso em: 06 out. 2023.

NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.; FREITAS, R.M. Monitoramento de áreas alagáveis. In.: MODIS. O sensor MODIS e suas aplicações. Org.: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J.C. Editora: Parênteses, 2007.

PETRI, S.; COIMBRA, A.M.; AMARAL, G.; PONÇANO, W.L. Guia de nomenclatura estratigráfica. **Revista Brasileira de Geociências**, Volume 16, 1986.

PINTO, C.E.T.; MENEZES, P.H.B.J.; MARTINEZ, J.M.; ROIG, H.L.; VILLAR, R.A.E. Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 507-516, 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. atualizada e ampliada. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

ROCHA, J. C. F. **Procedimentos metodológicos de intervenção para caracterização de comunidades-piloto visando a gestão integrada de reservatórios de hidrelétricas na Amazônia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, 2013.

SANTOS, G.M.; OLIVEIRA JR, A.B. A pesca no Reservatório da Hidrelétrica de Balbina (Amazonas, Brasil). **Acta Amaz.** 29 (1): 145-163. 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-43921999291163>. Acesso em: 14 de julho de 2023.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAÚJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHÖNGART, J.; WITTMANN, F.; RESENDE, A.F.; ASSAHIRA, C. The shadow of the Balbina dam: A synthesis of over 35 years of downstream impacts on floodplain forests in Central Amazonia. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 31, n. 5, p. 1117–1135, maio 2021.

SGB. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **GeoSGB**. Dados, informações e produtos do serviço geológico do Brasil. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em: 05/02/2024.

SILVA, T. S.F.; FREITAS, R. M.; NOVO, E.M.L.M. Monitoramento de áreas alagáveis. **In.:** MODIS. O sensor MODIS e suas aplicações. Org.: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J.C. Editora: Parênteses, 2007.

SILVA, M.S.R.; CUNHA, H.B.; GOMES, N.A.; MIRANDA, S.A.F.; PASCOALOTO, D.; SILVA, S.L.R.; SANTANA, G.P. Desafios Para Gestão Das Águas Na Região Amazônia. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves, RS, 2013.

SIOLI, H. The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: **The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. p. 127-165.

STEVANUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. Oficina de Textos, 2017.

THEIA data and services center. **Time series of water levels in the Rivers and lakes around the world**. Disponível em: <https://hydroweb.theia-land.fr/>. Acesso em: 14/07/2023.

UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NO BRASIL. **Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã**. Disponível em: <https://uc.socioambiental.org/>. Acesso em: 05/02/2024.

## 8. CRONOGRAMA

<b>Atividades 2022</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
Cumprimento dos créditos através das disciplinas			R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Pesquisa/Revisão Bibliográfica			R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Coleta de dados primários										R		
<b>Atividades 2023</b>												
Pesquisa/Revisão Bibliográfica	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Analisar a variação espacial e temporal dos parâmetros físico-químicos da água no Lago de Balbina.	R	R	R	R								
Coleta de dados em campo			R									
Seminário do Projeto de Pesquisa				R								
Relacionar o comportamento espectral das imagens do sensor MODIS com a dinâmica sedimentar.					R	R	R	R	R			
Determinar o regime médio mensal da concentração de sedimentos suspensos (CSS).									R	R	R	R
<b>Atividades 2024</b>												
Exame de Qualificação		R										
Estimar a CSS através de Imagens MODIS			R	R								
Elaboração da Dissertação/Análise dos resultados			R	R								
Revisão da Dissertação				R	R							
Defesa da Pesquisa						R						

Legenda:

R = Realizado