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

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO GARIMPO NA BACIA DO RIO TAPAJÓS/PA

LUCILEIDE DE AGUIAR BARRETO

MANAUS
2025

LUCILEIDE DE AGUIAR BARRETO

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO GARIMPO NA BACIA DO RIO TAPAJÓS/PA

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

ORIENTADOR: Dr. Rogério Riberio Marinho

MANAUS

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B273a Barreto, Lucileide de Aguiar
Avaliação do Impacto do Garimpo na Bacia do Rio Tapajós/PA / Lucileide de Aguiar Barreto. - 2025.
85 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Rogério Riberio Marinho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais, Curso de Geografia, Manaus, 2025.

1. Garimpo. 2. Sedimentos Suspensos. 3. Geomorfologia. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Amazônia. I. Marinho, Rogério Riberio. II. Universidade Federal do Amazonas. Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais. Curso de Geografia. III. Título

---

LUCILEIDE DE AGUIAR BARRETO

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO GARIMPO NA BACIA DO RIO TAPAJÓS/PA

BANCA EXAMINADORA

Presidente: Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho
(Universidade Federal do Amazonas - UFAM)

1º Avaliador: Profa. Dra. Milena Marília Nogueira de Andrade
(Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA)

2º Avaliador: Prof. Dr. João Cândido André da Silva Neto
(Universidade Federal do Amazonas - UFAM)

Manaus, 2025

À Deus, que sempre foi e sempre será o alicerce da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me concedeu força e fé a cada etapa desta pesquisa, apagando meus medos capacitando-me segundo o Seu tempo e propósito.

Ao meu orientador, professor Dr. Rogério Ribeiro Marinho, expresso sincera gratidão por ter me acolhido como orientanda, sugerido esta temática tão relevante e apresentado à maravilhosa área da pesquisa na geomorfologia fluvial dos grandes rios amazônicos. Obrigada pela oportunidade, pela paciência e pelo incentivo, sua orientação foi fundamental para que eu reencontrasse o rumo, na pesquisa e além dela.

Sou grata ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO) da UFAM pelo auxílio financeiro que viabilizou minha participação no XXI Simpósio Internacional SELPER, e ao professor Dr. Fábio Sabbá pelo suporte administrativo durante o processo. Nesta linha, agradeço, igualmente, o apoio da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), por intermédio da bolsa concedida no edital n.º 001/2023 – UNIVERSAL FAPEAM 20 Anos.

Agradeço pela oportunidade de participar da campanha do Observatório HYBAM, em junho de 2024, que viabilizou valioso aprendizado prático sobre Rrs *in situ* e coleta de sedimentos. Agradeço ao professor Dr. Jean-Michel Martinez, aos pesquisadores da CPRM/SGB (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico Brasileiro), Marquinho, Guilherme e André Martinelli, bem como à dedicada equipe de bordo.

Sou grata igualmente grata pela oportunidade de participar da 2.ª edição do Curso Fluvius Anavilhanas, financiado pelo Institut de Recherche pour le Développement (IRD) e organizado pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e pelo Laboratório de Geociências Ambientais de Toulouse (GET). Lá conheci as colegas da equipe "As Amazonas", Ilcleane Rocha, Maria Patrícia e Rayla, e minha companheira de quarto, Yasmim Rocha.

Ao meu amigo e veterano de graduação, Matheus Silveira, o qual me auxiliou em diversas etapas, tirando dúvidas, me incentivando e pela parceria com as escritas científicas e desabafos emocionais.

Aos meus colegas do Hidrogeo, os geógrafos Douglas e Diogo e a Geóloga Lorena.

Aos colegas do grupo de pesquisa H2A, em especial ao meu amigo Ednaldo Severo

por me ajudar com o uso do radiômetro e por todo conhecimento técnico-teórico passado.

As colegas do Laboratório de Geoquímica, Leylane, Ruth e professora Keila Aniceto.

Ao meu eterno chefe, Delegado Arthur, pela empatia no começo do meu mestrado. Aos meus incentivadores Mrozinski, Herbert e Ricardo. A todos meus colegas da PF/AM (Polícia Federal do Amazonas) que sempre me incentivaram ao ensino continuado após a graduação.

À minha família, minha mãe, Francileide, meu pai, Leônidas, minhas irmãs, Nágila, Larisse e Sara, meu sobrinho, Antony, e meu cunhado, Luciano, bem como a toda a família Aguiar, por serem alicerce e motivação.

Ao meu namorado Clayton Bentes, obrigada pela paciência, pelo companheirismo e pelo suporte com os scripts nas longas noites de estudo.

Ao amigo Júlio Heydeer, agradeço por sempre encontrar tempo para uma palavra de apoio.

Aos colegas da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, obrigada pela compreensão e incentivo nesta reta final do mestrado.

Enfim, sou profundamente grata a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada, seja com algum conhecimento, um simples gesto de gentileza ou uma palavra amiga.

RESUMO

O rio Tapajós é o quarto maior afluente do rio Amazonas em termos de descarga líquida, com vazão média anual de aproximadamente 13.500 m³/s. Suas águas apresentam coloração verde-clara, característica associada à baixa carga de sedimentos suspensos. No entanto, esse sistema fluvial tem sido impactado, há décadas, por atividades antrópicas, como o garimpo de ouro, que afeta significativamente a morfologia dos canais e os processos hidrossedimentares, comprometendo a qualidade da água e a dinâmica fluvial. Esta pesquisa teve como objetivo geral analisar os impactos do garimpo de ouro na geomorfologia fluvial do médio e baixo curso do rio Tapajós e de seus principais afluentes. Os objetivos específicos incluíram: (1) avaliar o balanço de fluxo de sedimentos suspensos; (2) identificar alterações na coloração da água e na concentração de sedimentos suspensos (CSS) por meio de imagens de satélite; e (3) examinar mudanças morfológicas em canais tributários afetados pela mineração. Foram utilizados dados fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Observatório HyBAM, informações do projeto MapBiomas, dados espectrais das águas do Rio Tapajós e estimativas de CSS obtidas por meio dos sensores MODIS e imagens PlanetScope. Estimou-se que, na região de Itaituba, o rio Tapajós apresenta um fluxo médio anual de sedimentos suspensos (Qs) de 4,02 milhões de toneladas e uma produção específica (Qsp) de 8,79 $t.ano^{1}.km^{2}$. Entre 1985 e 2022, a área ocupada por atividades de mineração aumentou quatro vezes, alcançando 0,55% da área de estudo. Verificou-se forte correlação entre a expansão do garimpo e o aumento da CSS no Rio Tapajós, especialmente nas proximidades de Fordlândia (coeficiente de correlação de Pearson = 0,84; R^2 = 0,71). Nos canais tributários analisados, observou-se um aumento superior a 300% na área de solo exposto entre 2019 e 2024, com alargamento médio das margens em 118 metros e acentuado processo de assoreamento. Conclui-se que o uso integrado de sensoriamento remoto e dados fluviométricos da ANA e do Observatório HyBAM é fundamental para o monitoramento da dinâmica hidrossedimentar na região. Reforça-se, portanto, a necessidade de investimentos contínuos e de uma governança eficaz voltada à gestão ambiental da bacia do Tapajós.

ABSTRACT

The Tapajós River is the fourth largest tributary of the Amazon River in terms of liquid discharge, with an average annual flow of approximately 13,500 m^3/s. Its waters exhibit a characteristic light-green coloration associated with low suspended sediment loads. However, this fluvial system has been impacted for decades by anthropogenic activities, particularly gold mining, which significantly affects channel morphology and hydrosedimentary processes, compromising water quality and river dynamics. This research aimed to analyze the impacts of gold mining on the fluvial geomorphology of the middle and lower reaches of the Tapajós River and its main tributaries. Specific objectives included: (1) evaluating the suspended sediment flux balance; (2) identifying changes in water coloration and suspended sediment concentration (SSC) through satellite imagery; and (3) examining morphological changes in tributary channels affected by mining activities. The study utilized fluviometric data from the National Water Agency (ANA) and the HyBAM Observatory, information from the MapBiomas project, spectral data from Tapajós River waters, and SSC estimates obtained through MODIS sensors and PlanetScope imagery. Results indicate that in the Itaituba region, the Tapajós River exhibits an average annual suspended sediment flux (Qs) of 4.02 million tons and a specific yield (Qsp) of 8.79 $t \cdot year^{-1} \cdot km^{-2}$. Between 1985 and 2022, the area occupied by mining activities increased fourfold, reaching 0.55% of the study area. A strong correlation was observed between mining expansion and increased SSC in the Tapajós River, particularly near Fordlândia (Pearson correlation coefficient = 0.84; $R^2 = 0.71$). In the analyzed tributary channels, exposed soil area increased by over 300% between 2019 and 2024, with average bank widening of 118 meters and pronounced sedimentation processes. The study concludes that the integrated use of remote sensing and fluviometric data from ANA and the HyBAM Observatory is essential for monitoring hydrosedimentary dynamics in the region. This reinforces the need for continuous investment and effective governance focused on environmental management of the Tapajós basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferentes cores dos rios da Amazônia: A) Rio Madeira; B) Rio Tapajós; C) Rio Negro e D) Rio Amazonas. 20
Figura 2: Mudanças no formato do canal do Rio Paraná em área de mineração de areia. Fonte: Santos e Stevaux (2010). 24
Figura 3: Percentagem de aumento da área de garimpo de 1973 a 2012 traçadas juntamente com o total de sedimentos suspensos (TSS) para os rios Crepori e Novo. Fonte: Lobo *et al*. (2016). 26
Figura 4: Exemplo dos espectros de reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) em diferentes rios amazônicos e seus valores relacionados à turbidez. 29
Figura 5: Mapa de localização da área. 30
Figura 6: Unidades Geomorfológicas. Fonte: IBGE (2023). 31
Figura 7: Classes de Pedologia na área de estudo. Fonte: IBGE (2023). 32
Figura 8: Precipitação média anual. Fonte: CHIRPS (2023); KOPPEN (2006) 33
Figura 9: Classes de Vegetação. Fonte: IBGE (2021) 34
Figura 10: Mapa de Localização das Estações Fluviométricas Hybam. 35
Figura 11: Nível Médio Normalizado das Estações Barra do São Manuel a jusante (BSMJ), seguida por Fortaleza, Jatobá e Itaituba. Fonte: Hybam (2024) 36
Figura 12: Dados de vazão média mensal versus cota média mensal na estação de Itaituba Fonte: Hybam (2024). 37
Figura 13: Dados de vazão máxima, média e mínima, respectivamente, na estação de na estação de Itaituba (1968-2019). Fonte: Hybam (2024). 38
Figura 14: Dado de sedimentos em suspensão na Estação de Itaituba. Fonte: Hybam (2024) 38
Figura 15: fluxograma metodológico. Fonte: Adaptado de Marinho *et al*, 2021. 39
Figura 16: Disposição do radiômetro para aquisição da radiometria. Fonte: Noriega (2024). 40
Figura 17: Filtragem, secagem e pesagem das amostras de sedimentos. 41
Figura 18: Mapa de uso do solo. Fonte: MapBiomas (2024). 47
Figura 19: Comparação Garimpo x Demais Usos Antrópicos na Bacia do Tapajós. 48
Figura 20: Mapa de Localização das Estações Fluviométricas ANA. 50
Figura 21: Vazão média mensal normalizada em BSM, Itaituba e Jamanxim. Fonte: ANA, 2025. 51
Figura 22: Razão comparativa da vazão nas estações BSM e Itaituba. 52
Figura 23: CSS Mensal em BSM e Itaituba 52
Figura 24: Dado mensal da turbidez em Baburé e Jamanxim 54
Figura 25: CSS Anual em BSM e Itaituba 54
Figura 26: CSS média anual observada nas estações BSM e Itaituba e a taxa de incremento anual do garrimpo. 55
Figura 27: Fluxo mensal de descarga de sedimentos suspensos (Qs) em BSM e Itaituba. 56
Figura 28: Localização dos pontos analisados com sensor MODIS. 58
Figura 29: CSS média anual estimada pelo sensor MODIS para as estações virtuais do rio Tapajós. ..59
Figura 30: Variabilidade média mensal da CSS estimada pelo sensor MODIS e da cota média mensal do rio Tapajós em Itaituba. 60
Figura 31: Relação entre área de garimpo e a CSS do rio Tapajós em Fordlândia. 61
Figura 32: Variabilidade média anual da área de garimpo (barras) e a da CSS (linha) do rio Tapajós próximo da Terra indígena Munduruku. 61
Figura 33: Variabilidade média anual da área de garimpo (barras) e a da CSS (linha) do rio Tapajós a jusante da foz do Crepori (A) e da foz do Jamanxim (B). 62
Figura 34: Variabilidade média anual da área de garimpo (barras) e a da CSS (linha) do rio Tapajós em Alter do Chão. 63
Figura 35: Correlograma entre a CSS estimada com dados MODIS em diferentes trechos do Rio Tapajós, acumulado de chuva anual e garimpo. Círculos azuis representam correlações positivas e vermelhas, negativas; a intensidade da cor e o formato elíptico indicam a magnitude do coeficiente. .64
Figura 36: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho e novembro de 2021 em Jacareacanga. 65
Figura 37: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes analisados. 66

Figura 38: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho e novembro de 2021 e fevereiro de 2022 a 87 km a jusante da foz do Rio Crepori. 67
Figura 39: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes a jusante do Rio Crepori. 68
Figura 40: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho e outubro de 2021 e janeiro de 2022 na foz do Jamanxim. 69
Figura 41: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes da foz do Jamanxim. 70
Figura 42: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho, setembro, outubro, novembro de 2021 e janeiro de 2022 no rio Tapajós, na margem direita em alter do chão. 71
Figura 43: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes de alter do chão. 72
Figura 44: Classificação das classes de água e solo exposto na seção analisada dentro da Terra Indígena Munduruku. 74
Figura 45: Estimativa da largura das magerns em 2019. 75
Figura 46: Etimativa da largura das margens em 2024. 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados das estações fluviométricas (H - Cota; Q - Vazão). 35
Tabela 2: Resumo das estações da ANA analisadas, seus respectivos dados e o período. 49
Tabela 3: Quantidade de amostras de sedimentos disponibilizadas pelas ANA em cada ano observado. 55
Tabela 4: Média do fluxo sólido suspenso (Qs) estimado nas estações de BSM e Itaituba. 56

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO....16
Problema da Pesquisa....17
Objetivos....18
Justificativa....18
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA....19
1.1 A Geomorfologia Fluvial dos Rios Amazônicos....19
1.2 Impactos da mineração e do garimpo na geomorfologia fluvial....23
1.3 Sensoriamento em Sistemas Aquáticos....28
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO....30
3. MATERIAL E MÉTODOS....39
3.1 Dado Primário....39
3.2 Dado Secundário....41
3.2.1 Imagens de satélite....41
3.2.2 Sensor MODIS....42
3.2.3 Sentinel-2 MSI....43
3.2.4 Sensor PlanetScope....43
3.3 Classificador RandomForest (RF)....44
4. RESULTADOS....46
4.1 Usos do solo no médio e baixo curso da Bacia do Tapajós....46
4. 2 Balanço de fluxo suspenso....49
4.3 O transporte do sedimento suspenso na Bacia do Tapajós com Sensoriamento Remoto....57
4.3.1 Dados MODIS....58
4.3.2 Imagens PlanetScope....64
4.4 Impactos do Garimpo na morfologia fluvial de tributários do rio Tapajós....73
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS....78
REFERÊNCIA....80

INTRODUÇÃO

A Amazônia possui uma paisagem determinada por elementos dinâmicos e estáticos. A dinâmica da paisagem amazônica é sujeita à transformações sazonais que ocorrem devido aos fatores naturais, como o regime climático e o fluvial. Por outro lado, os elementos estáticos, que incluem características geológicas, topográficas e tipos de solo, conferem certa estabilidade à paisagem. Em meio a esses aspectos, existe a influência das ações antrópicas.

Na Amazônia, a exploração dos recursos naturais em busca por matéria-prima tornou-se um pilar da mudança da paisagem pelas ações humanas, que modificam a natureza e imprimem marcas no espaço por diversos meios (Vitte, 2007). Desde o início da segunda metade do século XX, a ocupação da Amazônia tem sido acompanhada por uma série de impactos negativos sobre a paisagem, com destaque para as queimadas, o desmatamento e a atividade garimpeira (Torres, 2005).

A Bacia do Rio Tapajós, importante tributário da margem direita do rio Amazonas em seu baixo curso, possui uma área total de aproximadamente 492.000 km², abrangendo os estados de Mato Grosso (59% da bacia), Pará (38%) e Amazonas (3%). De acordo com Stevaux e Latrubesse (2017), essa é a quarta maior sub-bacia amazônica em termos de drenagem líquida, com uma descarga média anual de 13.500 m³/s. Em extensão territorial, é a quarta maior sub-bacia amazônica, ficando atrás das bacias dos rios Madeira (1.360.000 km²), Negro (696.000 km²) e Xingu (504.000 km²).

No Brasil, os problemas relacionados ao garimpo de ouro apresentam aspectos preocupantes. Oestreicher (2017) evidencia um enriquecimento significativo de mercúrio total (THg) na superfície de sedimentos lacustres do rio Tapajós, que causam sérios riscos à saúde da população local. Nessa região, houve crescimento exponencial de atividade de garimpo nas últimas décadas. Lobo *et al*. (2016) identificaram, por meio de imagens de sensoriamento remoto, quatro ocorrências importantes relacionadas ao garimpo de ouro na bacia do rio Tapajós desde a década de 1970.

A atividade garimpeira tem o potencial de alterar a turbidez das águas fluviais, principalmente devido ao lançamento, à ressuspensão e ao transporte de sedimentos nos rios. Segundo Roland e Esteves (1998), o despejo de rejeitos no ambiente aquático pode resultar na redução da zona eufótica em até um metro, o que ocasiona menor produção de fitoplâncton. Esse impacto afeta diretamente a qualidade da água, pois a redução da disponibilidade de luz limita a produção primária, comprometendo a base de a cadeia alimentar aquática e a sustentabilidade dos ecossistemas fluviais e da população dependente.

A geomorfologia fluvial se destaca como uma área de estudo fundamental paraa entender as alterações na paisagem causadas pelo garimpo. A atividade de garimpo pode modificar a dinâmica hidrossedimentar dos rios, como observado em janeiro de 2022 em Alter do Chão. Nesse evento, houve um aumento expressivo da turbidez da água na região, com intensidade e duração superiores ao normal (Diniz *et al*., 2021). Essas transformações na paisagem são evidentes na superfície da Terra e podem ser monitoradas e estudadas com o auxílio de dados de sensoriamento remoto orbital.

Além disso, a atividade mineradora impacta as comunidades de algas microscópicas de ambientes marinhos e de água doce. Segundo Tudesque *et al*. (2012), essas comunidades podem ser usadas para monitorar a recuperação de ecossistemas aquáticos afetados pelo garimpo. Com a redução da carga de sedimentos, as diatomáceas tendem a se restabelecer, indicando a gradual recuperação das áreas impactadas.

Ademais, a atividade garimpeira também reduz a diversidade de peixes, impactando comunidades que dependem dos rios, como as do Povo Xikrin, no Rio Cateté (Hofmeister e Silva, 2018). A esse respeito, Mol e Ouboter (2004) observaram que o aumento da turbidez e dos sedimentos suspensos gera habitats aquáticos menos diversos. Isso porque a sedimentação cobre elementos estruturais importantes, diminuindo a biodiversidade e a complexidade dos habitats.

Problema da Pesquisa

Estudos anteriores na região amazônica têm se concentrado em quantificar a atividade garimpeira (Lobo *et al*., 2015; 2016), examinar o fluxo de sedimentos associado ao garimpo (Lobo *et al*., 2016; Sousa *et al*., 2023), investigar os impactos do mercúrio (Oestreicher, 2017), bem como as alterações nas cadeias alimentares primárias e nas populações de peixes (Tudesque *et al*., 2012; Mol e Ouboter, 2004). No entanto, há lacunas de estudos sobre os impactos do garimpo artesanal na geomorfologia fluvial, em especial sobre o fluxo de sedimentos na bacia do Rio Tapajós. A compreensão desses elementos da paisagem é importante para avaliar como os impactos do garimpo de ouro afetam a dinâmica fluvial e as características geomorfológicas da região, o que reforça a necessidade de pesquisas mais aprofundadas.

Esse estudo buscou compreender os impactos imediatos do garimpo de ouro. Portanto, busca-se responder de que maneira a atividade garimpeira impacta geomorfologia fluvial da área de estudo.

Objetivos

Geral: Analisar os impactos do garimpo de ouro na geomorfologia fluvial na bacia do rio Tapajós.

Específicos:

1) Avaliar o Balanço de fluxo suspenso do médio e baixo curso do rio Tapajós;
2) Identificar a Mudança na cor da água e o transporte de sedimentos suspensos com imagens de satélite;
3) Examinar os Impactos na morfologia fluvial dos canais de tributários do rio tapajós impactados pelo garimpo.

Justificativa

A análise dos impactos do garimpo na geomorfologia fluvial da bacia do Rio Tapajós é necessária devido a intensidade dos impactos da atividade garimpeira, resultando em alterações nos processos de erosão, deposição e transporte de sedimentos. Embora a área seja altamente vulnerável a essas mudanças, ainda há escassez de estudos que investiguem impactos dessa atividade na geomorfologia local. As modificações provocadas pelo garimpo não apenas alteram a paisagem fluvial, mas também podem impactar diretamente na qualidade de vida das populações ribeirinhas, influenciando a navegação e a saúde pública, devido ao uso de mercúrio, além de contribuir para a degradação dos ecossistemas aquáticos.

Assim, o presente estudo busca investigar os impactos do garimpo na bacia do Rio Tapajós por meio da análise das alterações na cor da água e sua relação com a dinâmica de mudanças no uso da terra. A pesquisa utiliza imagens de sensores multiespectrais para analisar o comportamento espectral da água e correlacioná-lo às mudanças na paisagem e nos processos de transporte de sedimentos suspensos oriundos das atividades garimpeiras, fornecendo uma base científica para a compreensão dos efeitos dessa atividade na geomorfologia da região.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 A Geomorfologia Fluvial dos Rios Amazônicos

A geomorfologia resulta da interação de processos endógenos e exógenos que dão forma ao relevo e às suas feições. Stevaux e Latrubresse (2017) destacam três processos internos fundamentais para os sistemas fluviais: o processo magmático, quando o magma atinge a superfície; a orogênese, responsável pela formação de cadeias montanhosas pela interação de placas tectônicas; e a epirogenia, associada a movimentos lentos de soerguimento ou subsidência da crosta. Enquanto essas forças internas moldam a estrutura do relevo, agentes externos, como intemperismo e denudação, redistribuem sedimentos, remodelando continuamente a paisagem.

As maiores entidades tectônicas na Bacia Amazônica são representadas pelo cráton amazônico, correspondendo ao Escudo das Guianas, ao norte, e o Escudo Brasil-Central, ao sul (Almeida, 1978). A planície amazônica se encontra rodeada de terrenos geologicamente antigos (Pré-Cambrianos) e considerando todas essas unidades morfoestruturais, o relevo varia desde o nível do mar até mais de 6.000 m de altitude (Filizona e Guyout, 2011).

Os rios da Bacia Amazônica são fortemente controlados pela tectônica da região, marcada pela orogênese dos Andes, que orienta o fluxo fluvial de oeste para leste (Martinez, 2013). Contudo, essa configuração nem sempre existiu. O escoamento para o Atlântico se estabeleceu apenas há cerca de 10 milhões de anos (Figueiredo et al., 2019). Essa "geografia jovem" decorre do aumento recente na orogênese andina nos últimos 30 Ma, embora o soerguimento inicial dos Andes remonte a ~100 Ma, consequência da subducção das placas de Nazca (Pacífico) e Sul-Americana, após a fragmentação de Pangeia.

A consolidação do padrão de drenagem amazônico, resultado do soerguimento andino e do redirecionamento progressivo do escoamento para o Atlântico, estabeleceu os fundamentos sobre os quais, hoje, atuam os processos hidrológicos e sedimentares dos sistemas fluviais amazônicos. Assim, a estrutura geológica não define somente a orientação dos canais, mas também é importante para a compreensão do aporte de sedimentos e da distribuição de cargas sólidas e líquidas. Atualmente, tais fatores conferem à Bacia Amazônica sua expressiva magnitude em vazão e complexidade geomorfológica.

Nessa bacia, encontram-se quatro dos dez maiores rios do planeta em descarga média (Stevaux e Latrubresse, 2017). Portanto, ao tratar de geomorfologia fluvial amazônica, é preciso reconhecer que, além dos processos naturais e das pressões antrópicas, atuam dinâmicas hidrossedimentares complexas, refletindo a forte interdependência entre regime

hidrológico, relevo e disponibilidade de sedimentos.

Os contrastes no fluxo sólido interanual dos rios Solimões (383 x 10^6 ton.dia-¹), Madeira (406 x 10^6 ton.ano-¹), Negro (12 x 10^6 ton.ano-¹) e Amazonas (609 x 10^6 ton.ano-¹), apresentados por Filizola (2011), explicitam como o balanço hidrossedimentar da bacia resulta de uma combinação singular de controles geomorfológicos e climáticos. A elevada concentração de sedimentos pelos rios Solimões e Madeira reflete a intensa erosão em suas origens andinas, enquanto a baixa carga do Rio Negro está associada à drenagem sobre seus escudos cristalinos.

A Amazônia apresenta uma diversidade notável em seus sistemas fluviais. A diversidade geoquímica e física das suas águas, são reflexo das diferentes origens geológicas, de seus regimes hidrológicos e processos. Essa diversidade se manifesta através da carga de sedimentar dos rios e a própria dinâmica morfológica dos canais. Compreender essas diversidades naturais é fundamental para avaliar os impactos de intervenções antrópicas.

Os rios da Amazônia também variam em relação à transparência e à cor da água. De acordo com Sioli (1991), os rios de águas branca/barrenta/amarelas, como os com origem nos Andes, têm uma alta carga de sedimentos devido aos intensos processos erosivos, característicos de terrenos geologicamente recentes. Já os rios de água preta, por outro lado, apresentam menor quantidade de sedimentos e possuem sua cor influenciada pela matéria orgânica dissolvida e pelo tipo de solo. Por fim, os rios de água clara dispõem de uma cor esverdeada como o Rio Tapajós, que tem origem nos terrenos maciços do Brasil Central e apresenta baixa carga sedimentar. Essas diferenças podem ser observadas na Figura 1, abaixo.

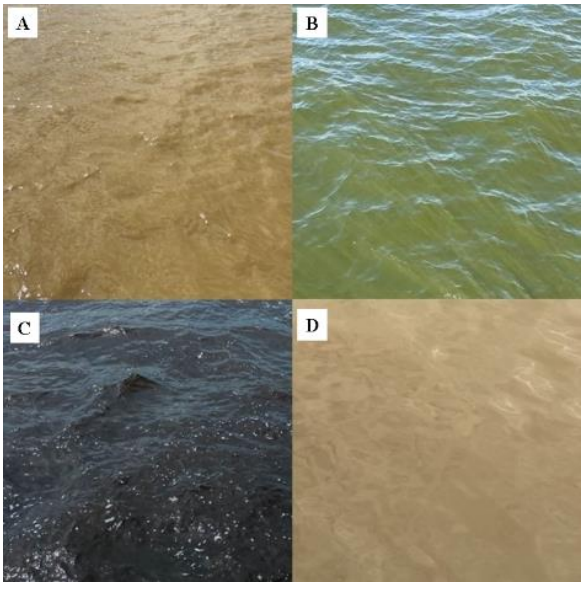


Figura 1: Diferentes cores dos rios da Amazônia: A) Rio Madeira; B) Rio Tapajós; C) Rio Negro e D) Rio Amazonas.

A concentração de sedimentos suspensos é um parâmetro importante para avaliar a qualidade da água, uma vez que essas partículas interferem no campo de luz subaquático e influenciam processos biogeoquímicos, como a emissão de gases de efeito estufa e a produtividade primária (Barbosa *et al*., 2019). Tais alterações impactam diretamente as propriedades ópticas da água, tornando a análise do comportamento espectral uma ferramenta eficaz para o monitoramento ambiental. Nesse contexto, destaca-se a refletância espectral, definida como a razão entre o fluxo de energia refletida e o fluxo de energia incidente sobre uma determinada superfície (Marinho, 2019), sendo um dos principais indicadores utilizados na detecção remota da qualidade da água.

O sensoriamento remoto desempenha um importante papel no monitoramento das mudanças das propriedades físicas e químicas da água nos sistemas fluviais. Nesse sentido, destaca-se o uso do sensor MODIS, empregado em estudos para a observação dinâmica global da Terra (Latorre *et al*., 2003). Um exemplo de sua aplicação é a pesquisa conduzida por Marinho (2019), que, por meio da análise de dados de reflectância provenientes do sensor MODIS, estimou a concentração de sedimentos suspensos nos Rios Negro e Branco, além de determinar o regime de transporte desses sedimentos em diferentes trechos desses cursos d'água.

Estudos sobre a estimativa de concentrações de sedimentos na Bacia Amazônica, utilizando dados provenientes dos satélites Landsat, têm sido realizados desde a segunda metade do século XX. Mertes *et al*. (1993) empregam imagens do satélite Landsat para estimar a concentração de sedimentos suspensos (CSS) nas águas superficiais das áreas úmidas da Amazônia, aplicando uma análise de mistura espectral nas imagens obtidas pelo Landsat MSS (Multispectral Scanner) e TM (Thematic Mapper). Essa metodologia apresenta a vantagem de ser aplicável de forma universal, desde que as propriedades ópticas da água e do sedimento na localidade em questão sejam conhecidas (Mertes *et al*., 1993).

Outros estudos têm utilizado o sensor MODIS para investigar a concentração de sedimentos suspensos em rios amazônicos. No rio Purus, Santos (2015) correlacionou a resolução temporal das imagens MODIS com dados radiométricos e medições *in loco* de concentração de sedimentos, realizando uma calibração desses dados para estimativas por meio de satélite. Esse estudo demonstrou que o sensor MODIS pode complementar séries temporais já estabelecidas em áreas monitoradas e é eficaz como base para análises em regiões de difícil acesso ou com dados insuficientes, oferecendo uma alternativa viável para o monitoramento remoto em grandes sistemas fluviais.

No rio Solimões, Espinoza *et al*., (2018) também utilizaram dados de radiometria a partir do MODIS, para estimar a concentração de sedimentos em suspensão, criando uma rede de estações virtuais ao longo do rio. Durante expedições de campo entre 2007 e 2011, os autores coletaram amostras de água para verificação de CSS, que foram então comparados com as estimativas de CSS derivadas das imagens de satélite. A relação entre a refletância obtida das imagens e a concentração de sedimentos modelada permitiu a validação das estimativas de sedimentos em suspensão e a análise da dinâmica de descarga de sedimentos ao longo do rio, mesmo em condições de forte cobertura de nuvens.

O valor de CSS e a refletância estimada via satélite são duas variáveis que podem ser significativamente correlacionadas. No rio Madeira, Espinoza *et al*., (2013) processaram mais de 900 imagens do MODIS em diferentes locais ao longo do rio, desenvolvendo um modelo empírico de CSS que demonstrou uma alta precisão ao correlacionar os dados de satélite com medições de campo. Esse estudo revelou padrões de sedimentação e ressuspensão ao longo do tempo, permitindo uma avaliação dos processos de transporte de sedimentos na Bacia Amazônica.

Além do sensor MODIS, outros sensores também são amplamente utilizados para a análise da refletância da água por meio do sensoriamento remoto. Sousa (2022) utilizou tanto dados do sensor OLCI (Ocean and Land Colour Imager), embarcado no satélite Sentinel-3, quanto do sensor MODIS, para analisar um trecho do rio Amazonas, entre Manacapuru e Itacoatiara. O autor correlacionou os dados de reflectância obtidos via satélite com medições realizadas *in situ*, obtendo uma correlação significativa entre os dois. Esse procedimento permitiu a construção de modelos robustos para estimar a concentração de sedimentos suspensos a partir dos dados de satélite, demonstrando a eficácia do uso de sensores remotos, como o MODIS e o OLCI, no monitoramento de sistemas fluviais.

Além dos estudos realizados no Brasil sobre a concentração de sedimentos via sensoriamento remoto, também há exemplos relevantes em outros países. No rio Bachang, em Taiwan, Huang *et al*. (2014) analisaram as mudanças na dinâmica fluvial ocasionadas pela atividade minerária, utilizando dados de sensoriamento remoto. O estudo contou com a integração de dados históricos, como mapas topográficos e fotografias aéreas, que permitiram identificar alterações significativas no canal do rio ao longo do tempo. Essas mudanças impactaram diretamente a hidrologia, a biota aquática, a estabilidade das margens e a qualidade da água.

Embora as modificações explícitas no canal tenham sido observadas, os autores destacam a importância dos fatores naturais. De acordo com Huang *et al*. (2014), as rochas da

região estudada são predominantemente compostas por xisto, um material argiloso de baixa resistência, o que as torna naturalmente vulneráveis a processos erosivos acelerados. Esse cenário evidencia a importância do uso do sensoriamento remoto em estudos sobre a estrutura do canal e suas transformações ao longo do tempo. Através de técnicas de monitoramento, como análise de fotogrametria digital, fotografias aéreas e modelos digitais topográficos, foi possível identificar mudanças geomorfológicas, padrões de erosão e deposição de sedimentos no local estudado.

1.2 Impactos da mineração e do garimpo na geomorfologia fluvial

A análise cartográfica pode ser de extrema importância para reconstruir feições e determinar modificações na morfologia do canal. A partir de uma abordagem multidisciplinar, James (2015) combinou evidências cartográficas, documentais, topográficas e estratigráficas para reconstruir a evolução geomórfica do baixo rio Rio Yuba (California).

As mudanças na morfologia do canal do rio Yuba correou de maneira equivalente à intensidade de exploração. Além disso, os impactos da mineração nesse rio começaram com uma exploração de baixo impacto, que rapidamente evoluiu para uma exploração altamente mecanizada, a qual alterou e deslocou o leito do rio (James, 2015). Dessa maneira, tal ação modificou a dinâmica sedimentar do rio e trouxe mudanças na morfologia.

Outra forma de modificação do sistema fluvial influenciada pela mineração refere-se à estruturação do leito do canal. Nesse contexto, um estudo sobre as alterações no canal fluvial destaca que, além de fatores como variações climáticas, mudanças morfológicas podem estar realcionadas à atividade de mineração (Santos e Steuvax, 2010), como no caso do rio Platte South, no Colorado. Hilmes e Wohl (1995) destacam que, em áreas mineradas, as margens tornavam-se mais suscetíveis à erosão, facilitando a migração do vale e estabelecendo um padrão consistente ao longo do tempo, o que, consequentemente, resultava em uma rede fluvial móvel. Santos e Stevaux (2010) constataram que a extração de areia no Rio Paraná alterou o canal em pontos correlatos à extração do material, ocasionando na incisão do leito, evidenciada ao longo do período de 1957 a 2007 (Figura 2).

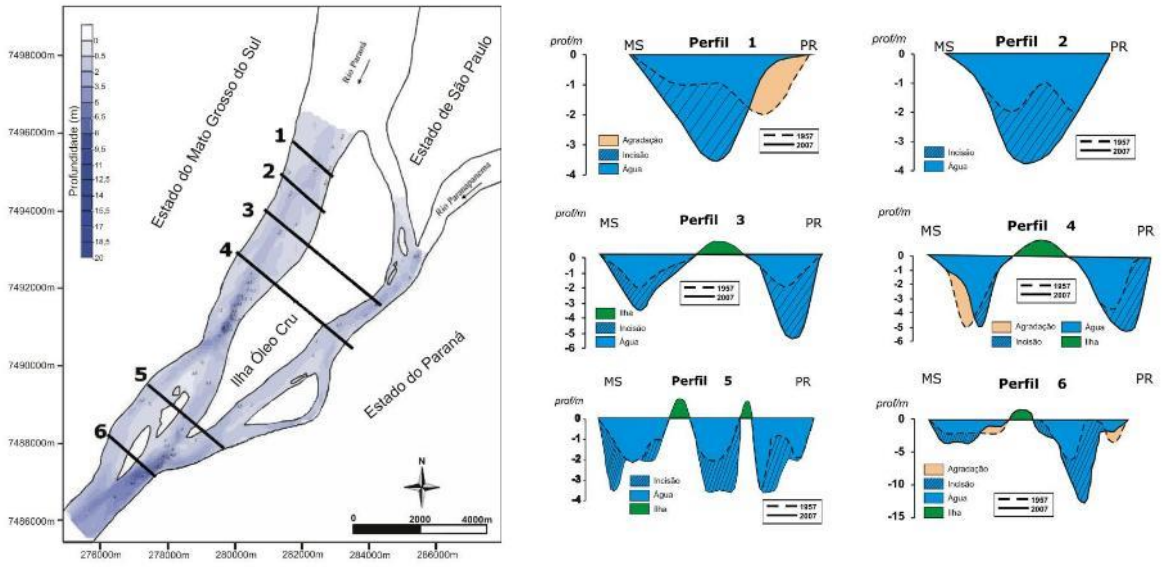


Figura 2: Mudanças no formato do canal do Rio Paraná em área de mineração de areia. **Fonte:** Santos e Stevaux (2010).

Outra transformação significativa nos canais surge como resultado da mineração em leitos rochosos. As perturbações geomórficas da extração de cascalho em cursos d'água são frequentemente percebidas como uma alteração perceptível na paisagem, embora a extensão exata de seus efeitos nem sempre seja devidamente reconhecida (Kondolf, 1994). A retirada do material do leito propicia mudanças no canal, induz a turbidez da água e um aumento na sedimentação, resultando em potenciais efeitos adversos na vida aquática e até na composição das espécies (Forshage e Carter, 1973). Essa atividade mineira, portanto, modifica a morfologia do leito rochoso e influencia outros problemas que refletem no ambiente fluvial.

A avaliação da resposta de um rio a tais modificações pode ser realizada mediante a análise do suprimento de carga no leito do canal. Kondolf *et al*. (2002) conduziu uma análise comparativa da dinâmica geomorfológica entre as bacias hidrográficas dos rios Drôme e Pine Creek, França, ao longo de transformações no uso do solo. Segundo o autor, em Pine Creek, as ações de restauração visam diminuir o fornecimento de sedimentos e estreitar o canal, enquanto no Rio Drôme, a ênfase é no aumento do fornecimento de sedimentos e na restauração de um canal mais amplo. Essa discrepância é atribuída à resistência dos gestores, influenciada por conflitos decorrentes de intervenções humanas prévias.

A erosão das margens fluviais, além de causar transformações geomorfológicas pela mobilização de sedimentos, aumenta os riscos ambientais. A instabilidade do canal, como observado em Pine Creek, resultou na erosão de rejeitos na planície de inundação, além de mobilizar sedimentos contaminados para as margens (Kondolf *et al*., 2002). Assim, manter o equilíbrio desses sistemas fluviais é essencial para prevenir problemas futuros.

Para além das transformações evidentes na paisagem, a atividade garimpeira pode acarretar implicações diretas nos sistemas fluviais. No contexto brasileiro, o ciclo do ouro durante o século XVIII emergiu como um catalisador de modificações nos rios de pequeno porte, desencadeando transposições, dragagens, construção de barragens e assoreamento (Stevaux e Latrubesse, 2017). Essa prática, se conduzida de maneira excessiva, revela-se capaz de provocar mudanças irreversíveis nos canais fluviais, destacando a importância da abordagem desse tema para a preservação dos sistemas fluviais.

O rio Madre de Dios é outro exemplo de preocupação devido à intensa atividade mineradora, que afeta tanto a comunidade científica quanto os tomadores de decisão e moradores locais (Terrel *et al*., 2023). Nessa região, a extração de ouro é realizada principalmente por dragagem, técnica que remove sedimentos do fundo do canal, aumentando sua capacidade. A dragagem, portanto, é amplamente aplicada no garimpo de ouro em regiões tropicais (Steaux e Latrubesse, 2017).

No alto curso do rio Madre de Dios, Peru, a busca pelo ouro ocasionou aumento de 97% da taxa de deposição do rio, entre os anos de 2012 e 2020, se comparado ao período anterior de análise 2006 a 2012 (Terrel *et al*., 2023). As atividades de garimpo aluvial, que utilizam a água para remover os sedimentos do leito do rio, são as principais responsáveis por esse aumento. Essas ações modificam toda a dinâmica hidrossedimentológica da região, alterando o fluxo de água, a distribuição dos sedimentos e a morfologia do rio.

A bacia do Rio Tapajós também sofre mudanças intensas desde a segunda metade do século XX. Tal situação pode ser discutida a partir do surgimento de grandes empreendimentos, como hidrelétricas, instalações de estradas, hidrovias, projetos de assentamento e produção de insumos. Nesse cenário, a dinâmica capitalista do desenvolvimento exerce uma pressão significativa sobre os territórios da região, gerando conflitos (Santos e Silva, 2019). Dentre os impactos causados por essas transformações, destaca-se a mudança na cor da água dos rios, um indicador importante das alterações nos sistemas fluviais.

Historicamente, a exploração mineral na Amazônia pode ser datada desde a colonização. Segundo Lobo *et al*. (2016), a exploração de ouro na Bacia do Tapajós teve sua primeira ocorrência entre 1958 e 1977, quando as atividades ainda não geravam modificações nos canais. Posteriormente, entre 1978 e 1993, ocorreu a mecanização da atividade e sua associação a preços elevados de mercado resultou na expansão de grandes áreas de garimpo. Essa atividade passou por um período de baixa procura por conta do esgotamento dos depósitos de fácil acesso, o que resultou na diminuição da concentração de sólidos

transportados em suspensão. Porém, a partir de 2004, a atividade voltou a se intensificar devido ao aumento dos preços do ouro.

Em 1973, não havia impacto perceptível na turbidez da água nos rios Novo e Crepori, na Bacia do Tapajós (Lobo *et al*., 2016). Segundo os autores, as concentrações de sedimento em suspensão, nessa época, eram menores que 5,0 mg.L^{-1}. Entretanto, a partir de 1984, com o crescimento triplicado na área de garimpo, as concentrações de sedimento em suspensão (CSS) passaram a ser superiores a 50 mg.L^{-1} para o rio Crepori e maiores que 15 mg.L^{-1} para o Rio Novo, importantes tributários da margem direita do Rio Tapajós (Figura 3)

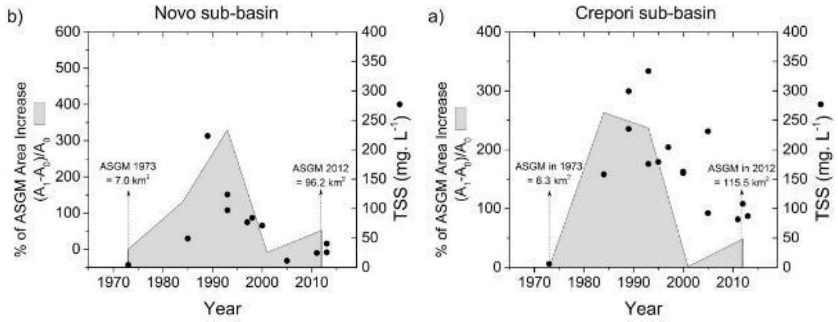


Figura 3: Percentagem de aumento da área de garimpo de 1973 a 2012 traçadas juntamente com o total de sedimentos suspensos (TSS) para os rios Crepori e Novo. **Fonte:** Lobo *et al*. (2016).

As modificações nos cursos fluviais impactam tanto a morfologia, quanto a biodiversidade, visto que as características físicas do canal e da qualidade da água influenciam diretamente as comunidades aquáticas (Gebrekiros, 2016). Além disso, a qualidade da água pode ser alterada por fatores naturais e antrópicos. No rio Capivari, em Curitiba (PR) por exemplo, o garimpo elevou em média 0,5 unidades do pH e aumentou a alcalinidade em 15% entre 1980 e 2001. Tal situação coincide com a expansão anual da área minerada, estimada em 47.000 m² (Fritzsons *et al*., 2009), o que evidencia os impactos significativos da atividade nas condições naturais do rio.

A água exige, como recurso vital para a saúde e a sustentação da vida, uma análise criteriosa dos fatores que possam comprometer sua qualidade. Gbedzi *et al*. (2021) analisaram as modificações na qualidade da água do rio Tano e seus afluentes, no Distrito Norte de Asutifi, Gana, África Ocidental, atribuindo-as às mudanças no uso do solo e à prática de mineração ilegal. Em três dos oito pontos de monitoramento, os valores de pH variaram entre 4,4 e 7,5, abaixo do padrão estabelecido pela EPA (Environmental Protection Agency), que recomenda um intervalo entre 6,5 e 8,5 para água adequada ao consumo humano. Logo, esses resultados destacam a urgência de medidas eficazes para mitigar os impactos da mineração sobre a qualidade da água.

A utilização do mercúrio na atividade de mineração apresenta riscos de contaminação, gerando impactos negativos na biota aquática e na saúde das comunidades locais, afetando a qualidade de vida das pessoas. No caso do rio Yuba, na Califórnia, as mudanças no padrão do canal facilitam a ocorrência de enchentes, o que contribui para o retrabalhamento de sedimentos de mineração, contendo elevadas taxas de concentrações de mercúrio (Ghoshal *et al*., 2010).

A remoção de minerais nos ambientes fluviais ocorre desde meios mais simples até a extração com máquinas pesadas, como escavadeiras, balsas e dragas (Brack et al., 2011). Ademais, na Amazônia, a atividade de garimpo ilegal está, quase sempre, associada à remoção de floresta. Para extração de ouro em solos aluviais, como nas margens e nos leitos de rios em terra firme, a floresta é destruída, pois é debaixo dela que estão as partículas de ouro depositadas (Brack *et al*., 2011). Aliás, o desmatamento só não está associado às práticas de mineração quando ocorrem no meio do rio, em balsas.

O lançamento de mercúrio nos rios da Amazônia devido a mineração representa uma grande preocupação ambiental porque a contaminação por mercúrio, predominantemente causada pelo consumo de água contaminada e pela ingestão de peixes contaminados com o descarte do material nos rios, constitui uma ameaça significativa para o ambiente (Brack *et al*., 2011) e saúde humana. Essa problemática agrava-se em regiões remotas e de difícil acesso, onde a ausência de infraestrutura hospitalar adequada prejudica particularmente a população de baixa renda, intensificando os impactos da intoxicação por mercúrio (Brack *et al*., 2011).

De acordo com Farella *et al*. (2006) a entrada constante de cátions básicos associados a diversos usos da terra na Amazônia pode desestabilizar o mercúrio em todo o perfil do solo, indicando um potencial contaminação de rios e lagos, já que ocorrerá lixiviação desse material nas próximas décadas. Essa dinâmica representa desafios ambientais e de saúde associados às atividades mineradoras.

Stella *et al*. (2013) utilizou técnicas de dendrocronologia para analisar as respostas de uma espécie arbórea ripária, vulnerável a mudanças hidrológicas, após a incisão de canais resultante da atividade mineradora de cascalho no Rio Drôme, no sudeste da França. Após a análise de 55 árvores em sete locais da planície de inundação, larguras dos anéis foram calculadas para se ter a área basal, permitindo, assim, a verificação da redução do crescimento ao longo do rio. Essa alteração no padrão da série de anéis evidenciou uma significativa redução no crescimento das árvores em quatro localidades a partir de 1978, coincidindo com a incisão provocada pela mineração no canal. Então, estudos como esse observam que

vegetações propensas à seca são vulneráveis a alterações hidrogeomórficas. Isso demonstra como a atividade mineradora afeta a vegetação e o ecossistema fluvial.

Os sistemas fluviais também podem ser significativamente impactados por mudanças climáticas, como secas e inundações, que estão frequentemente associadas a flutuações atmosféricas, como o fenômeno El Niño (Zanin, 2019). Além disso, processos dinâmicos fluviais podem influenciar diretamente as comunidades ecológicas.

A implementação de técnicas de manejo conservativo, como a restauração do regime de fluxo e a reconstrução da morfologia do canal, citadas por Steuvax e Latrubesse (2017), emerge como estratégia essencial para mitigar os impactos ambientais do garimpo em ecossistemas fluviais. Exemplo disso pode ser observado no rio Pine Creek, nos Estados Unidos, onde os gestores empreenderam projetos para tornar o canal em um padrão mais estável.

1.3 Sensoriamento em Sistemas Aquáticos

Os sistemas aquáticos continentais podem ser definidos em dois grandes grupos: os sistemas lóticos, onde a água possui um fluxo constante, e os sistema lênticos, caracterizado pela baixa ou ausência de fluxo de água (BARBOSA et al., 2019). As compreensões do funcionamento desses dois tipos de sistemas são importantes para a análise geoespacial, pois a frequência de variação do nível da água com o tempo, assim como a amplitude com que essa variação se dá, permite avaliar a previsibilidade do comportamento biogeoquímico do sistema e para a compreensão do sensoriamento remoto em sistemas aquáticos (Barbosa et al., 2019). Portanto, o uso de sensoriamento remoto deve ser relacionado ao conhecimento geográfico da bacia hidrográfica.

Dentro das possibilidades do uso de sensoriamento remoto em ambientes aquaticos está estimativa de alguns parâmetros de qualidade da água, como, por exemplo, concentração de clorofila-a, matéria orgânica dissolvida e concentração de sedimentos suspensos. Por conta das propriedades de interação da água com a luz (radiação eletromagnética), o sensoriamento da cor da água faz uso de sensores passivos, ultilizando principalmente a região do espectro eletromagnético entre 400 e 900 nm (Barbosa, 2019). De acordo com as características específicas de cada rio, a cor da água é determinada pela concentração e composição das partículas e das substâncias dissolvidas que absorvem e espalham a radiação solar direta e difusa do céu que penetra na água.

Na análise das propriedades ópticas da água a comprensão de algumas grandezas radiométricas são fundamentais. A primeira se refere à energia radiante, que é a energia

transportada por um campo de radiação (Zibordi, 2007). Na mesma perspectiva, temos o conceito de irradiância que é definida pela densidade ou taxa de fluxo radiante interceptado por unidade de área (Barbosa, 2019). Por fim, temos o conceito de radiância, que é ultilizado para descrever a intensidade da radiação eletromagnética em um determinado ângulo sólido e por unidade de área (Barbosa, 2019)

A partir da observação de algumas curvas padrão para cada tipo de cor de água, a partir da análise da reflectancia da luz em diferentes objetos (alvos), é possível determinar as características espectrais dos componentes opticamente ativos da água (COAs) – substâncias que interagem com a luz de maneira específica (Barbosa *et al*., 2019). Estes autores destacam que a quantidade de luz refletida aumenta com a concentração de sedimentos na água. Com base nessa relação, algoritmos podem estimar a quantidade de sedimentos presentes, utilizando a intensidade da luz refletida em comprimentos de onda entre 400 e 900 nm. Abaixo estão alguns exemplos da variação dessas curvas em diferentes rios da amazonia (figura 4).

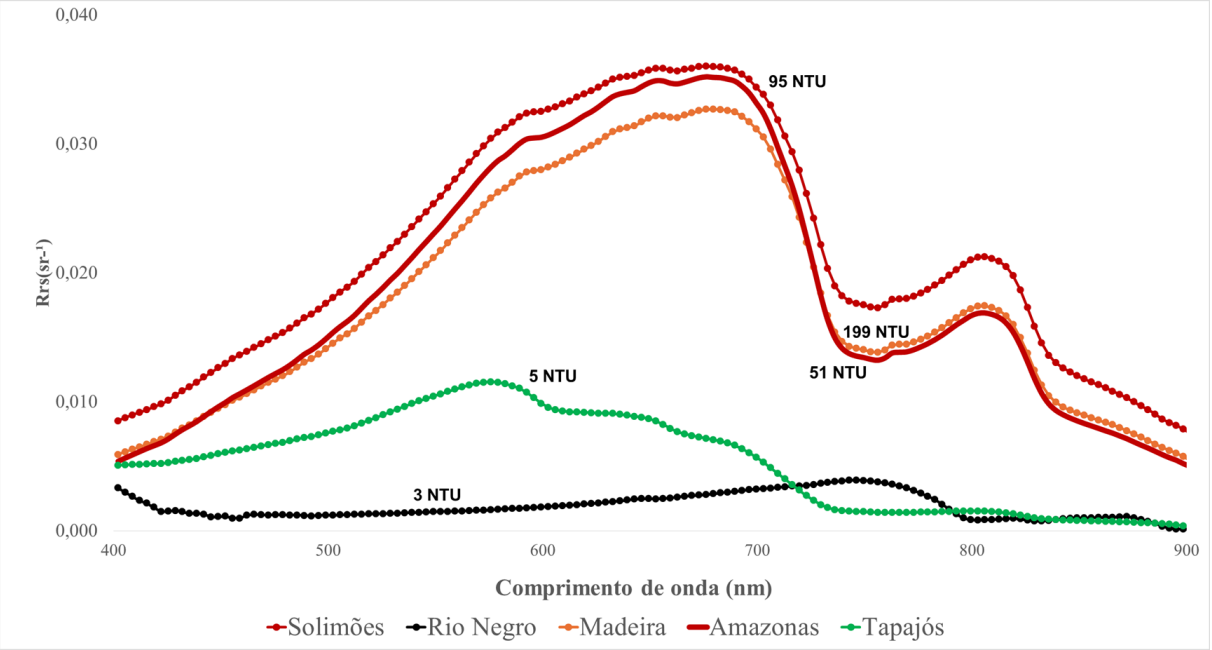


Figura 4: Exemplo dos espectros de reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) em diferentes rios amazônicos e seus valores relacionados à turbidez.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o médio e baixo curso da bacia do rio Tapajós, que se forma após a confluência dos rios Juruena e Teles Pires (Figura 5). A área de estudo possui aproximadamente em 160.000 km², representando 35% da bacia total da bacia, com 97% dessa área localizada no estado do Pará e 3% no estado do Amazonas. O Rio Tapajós é o canal principal, e o Rio Jamanxin é o maior afluente na área analisada. Segundo Sioli (1991), os rios nessa região são classificados como de água clara, devido à baixa concentração de material em suspensão, relacionado à formação geológica dos maciços do Brasil central, resultando em menor erosão e águas cristalinas de cor verde-claro.

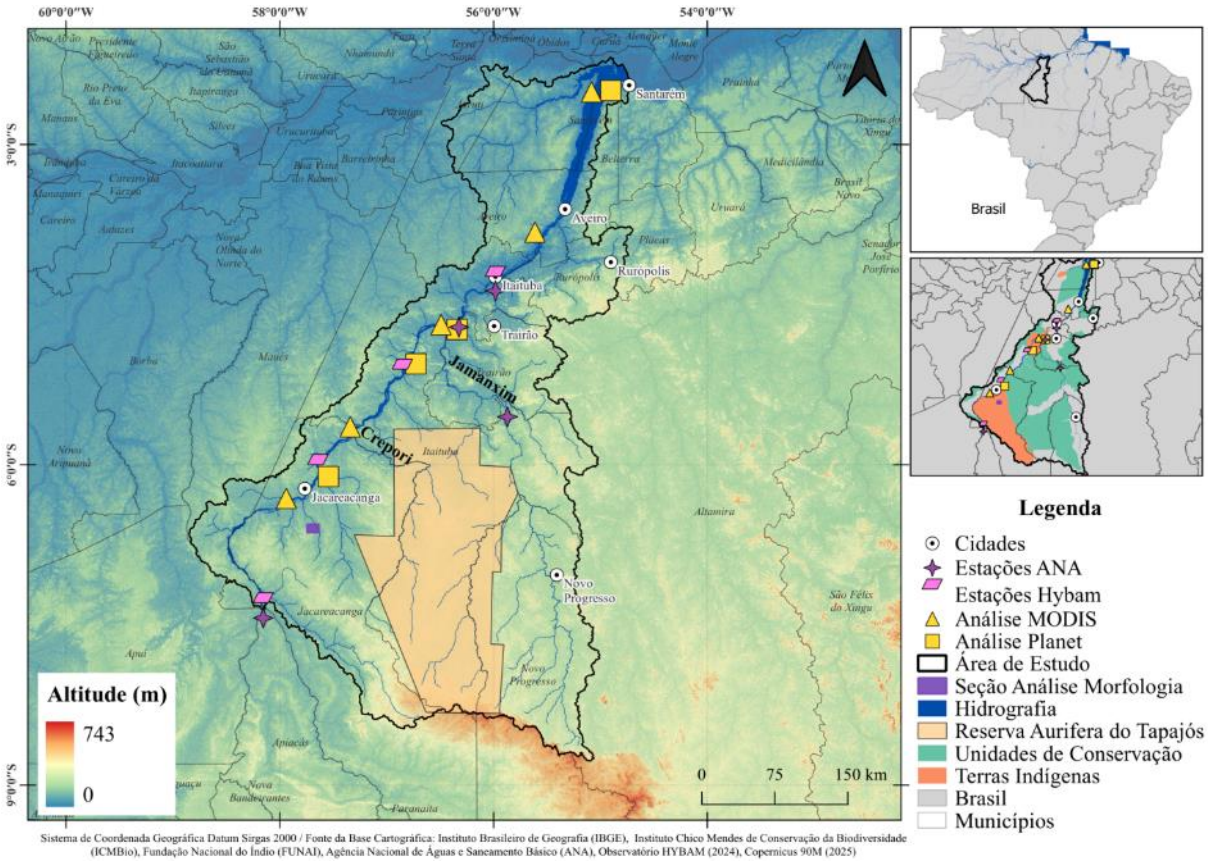


Figura 5: Mapa de localização da área.

A área está inserida na compartimentação geológica das coberturas Fanerozóica, influenciada pelo cráton amazônico, ao sul, com sobreposição ao Planalto do Tapajós (IBGE, 1995; João, 2013; Nascimento *et al*., 1976). Essa região se caracteriza por uma sequência de planaltos de menores altitudes se comparados com os da borda norte. No seu curso inferior, faz parte da unidade geomorfológica dos Baixos Platôs da Amazônia centro-oriental, onde a formação de Alter do Chão se destaca, surgindo como resultado de atividades neotectônicas

(Figura 06).

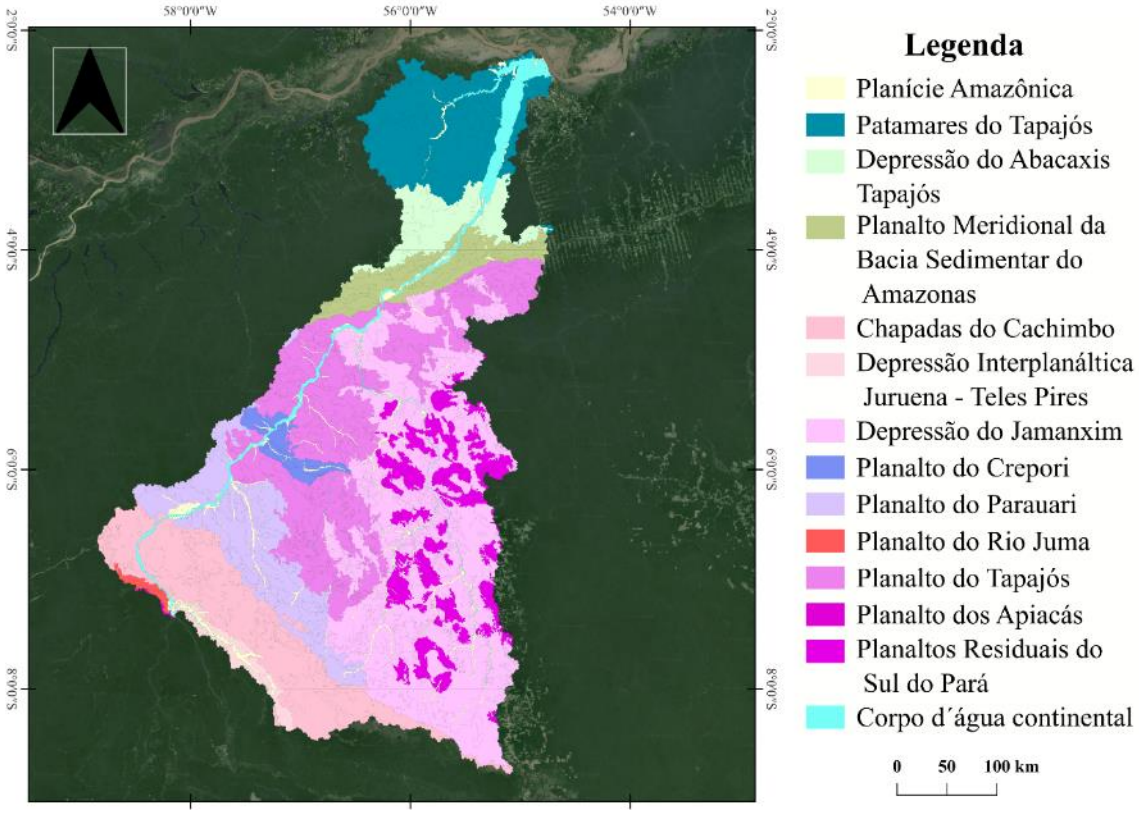


Figura 6: Unidades Geomorfológicas. **Fonte:** IBGE (2023).

À medida que o Rio Tapajós atravessa essa região de baixos platôs em direção ao Rio Amazonas, ele cria uma extensa ria fluvial. Na região de menor altitude da bacia, especialmente entre Itaituba e Santarém, o Rio Tapajós forma uma ampla praia fluvial, com larguras de até 13 km. Próximo a Aveiro, onde a largura do canal é de 2,5 km, e perto da foz, com 1,5 km, o canal do rio se estreita de forma significativa. Esse último trecho, com mais de 280 km, é navegável com um calado de 5,5 m até Aveiro e de 3,5 a 4,5 m de Aveiro a Itaituba, conforme informações da ANA (2012). Nos últimos 100 km de seu trajeto, o rio Tapajós é muito largo e profundo devido à sua inserção na Formação de Alter do Chão, que se configura na unidade superior da Bacia Sedimentar do Amazonas, e se caracteriza por sedimentação cretácea e domínio de arenitos, argilitos e conglomerados (ANA, 2012).

Quanto à classificação dos solos da região, dois tipos predominantes podem ser observados (Figura 7). Na margem direita do Rio Tapajós, há uma maior ocorrência de argissolos vermelho-amarelo distróficos, caracterizados por uma saturação por bases inferior a 50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, conforme o sistema brasileiro de Classificação de Solos (Dos Santos *et al*., 2018). Já na margem esquerda, predominam os Latossolos Amarelos Distróficos, que se caracterizam por possuírem um horizonte A húmico e um conteúdo de carbono igual ou superior a 10 g kg^{-1} até uma profundidade de 80 cm ou

mais.

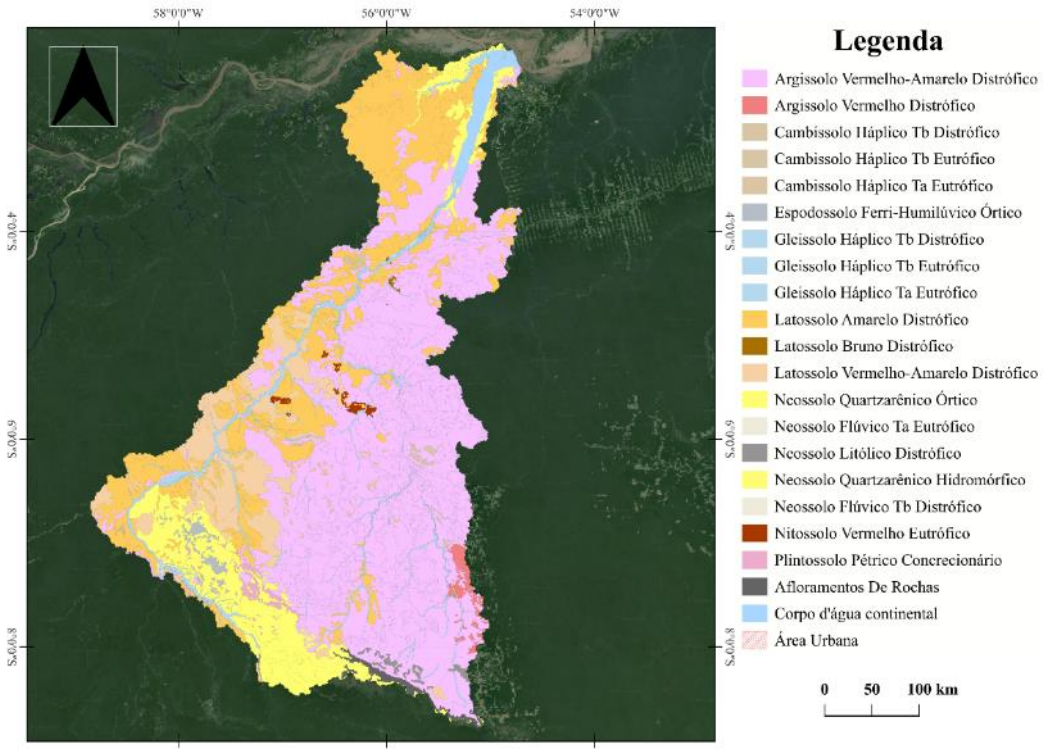


Figura 7: Classes de Pedologia na área de estudo. **Fonte:** IBGE (2023).

Apesar de o processo de uso e ocupação do solo ter desempenhado um papel expressivo na modelagem da paisagem nas últimas décadas, essa região ainda é predominantemente ocupada por floresta amazônica preservada. Os solos locais são caracterizados pela baixa fertilidade natural e boa drenagem (IBGE e EMBRAPA, 2001). Nessa região ocorrem dois tipos de clima, segundo a classificação proposta por Kottek *et al*. (2006). Na porção sul, o clima é do tipo Am, com características de clima tropical de monção, apresentando uma breve estação seca e com chuvas intensas durante o resto do ano. Ao norte da bacia, ocorre o clima do tipo Af, com chuvas de verão, característica climática de regiões de savana equatorial de inverno seco (Kottek *et al*., 2006).

Os dados anuais de precipitação do ano de 2023, obtidos pelo projeto CHIRPS v.2, foram utilizados para analisar o índice pluviométrico na região da Bacia do Tapajós. De acordo com esses dados, a precipitação na região varia de montante a jusante: valores maiores que 2263 mm/ano são observados no médio curso, enquanto no baixo curso os valores são iguais ou menores que 1592 mm/ano (Figura 8).

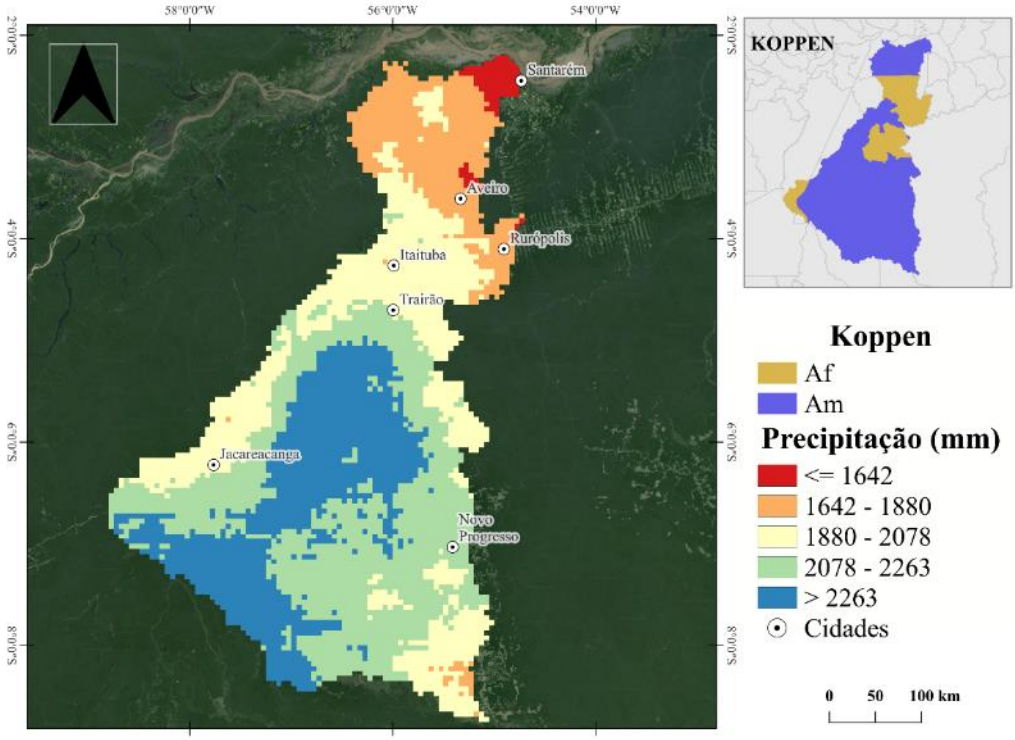


Figura 8: Precipitação média anual. **Fonte:** CHIRPS (2023); KOPPEN (2006)

Santos *et al*. (2015) destacam que a região é influenciada por dois sistemas meteorológicos distintos: a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), atuando de março a maio, e a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), agindo de outubro a fevereiro. Além disso, entre abril e setembro, a região sul da bacia apresenta baixa pluviosidade, indicando pouca ou nenhuma atuação dos sistemas meteorológicos precipitantes.

Quanto à vegetação, a área é predominantemente coberta por floresta tropical úmida (Figura 9), conhecida como floresta ombrófila, que predomina na paisagem terrestre da região do Tapajós, conforme o padrão típico observado em todo o bioma amazônico (Scoles, 2016). Segundo a classificação fitoecológica (IBGE, 2021), a área de estudo é composta por 57% de floresta ombrófila densa, 28% de floresta ombrófila aberta, 9% de áreas de transição (ecótono e encrave), 2% de savana e 2% de floresta estacional decidual e semidecidual, enquanto os 3% restantes referem-se aos corpos d'água continentais.

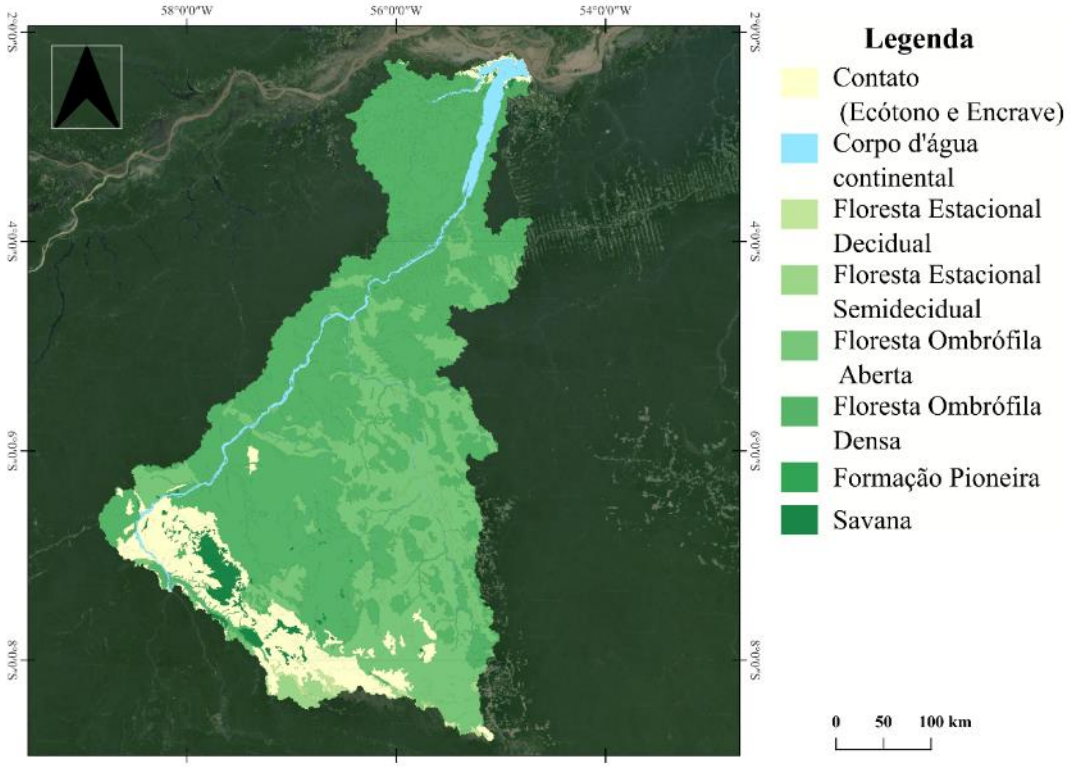


Figura 9: Classes de Vegetação. **Fonte:** IBGE (2021)

A vegetação predominante é a floresta ombrófila densa de complexa estratificação florestal, rica biodiversidade, abundância de lianas e epífitas e uma alta capacidade de regulação climática local. Conforme Scoles (2016), dependendo da faixa altimétrica, essa vegetação pode ser categorizada em várias formações: aluvial (0-5 metros de altitude), terras baixas (5-100 metros de altitude), sub montana (100-600 metros de altitude) e montana (600-2.000 metros de altitude). Em florestas tropicais que experimentam mais de 60 dias secos por ano, a floresta ombrófila densa pode ser substituída por floresta ombrófila aberta, desde que as condições topográficas e biogeográficas permitam a manutenção da umidade ambiental, mesmo durante os períodos de secas mais severas.

Em relação aos dados fluviométricos analisados, form utilizados dados coletados pelo observatório HYBAM. A região de estudo possui quatro estações fluviométricas situadas o longo do rio Tapajós com dados de cota e vazão. A Tabela 1 e a Figura 10, abaixo, possuem as informações das estações utilizaadas nesse estudo. Seguindo de montanto a jusante, a estação mais a montante é a de Barra do São Manuel a jusante (BSMJ), seguida por Fortaleza, Jatobá e Itaituba.

Tabela 1: Dados das estações fluviométricas (H - Cota; Q - Vazão).

Estação	Código	Latitude	Longitude	H - Período		Q - Período	
BSMJ	17430000	-7,339722157	-58,15528107	1975	2018	1978	2018
FORTALEZA	17500000	-6,045278072	-57,6427803	1982	2012	2004	2012
JATOBÁ	17650000	-5,152500153	-56,85388947	1972	2012	1972	2012
ITAITUBA	17730000	-4,283332825	-55,98332977	1968	2019	1968	2019

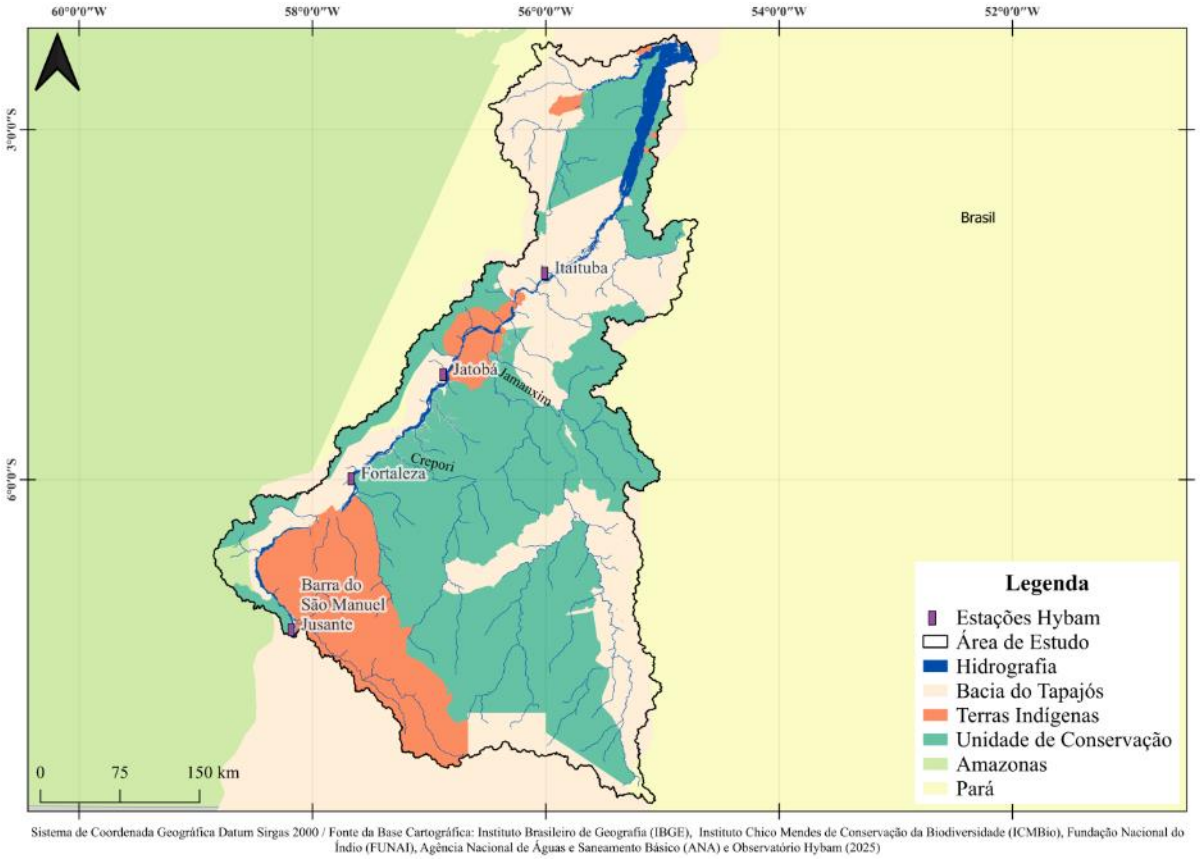


Figura 10: Mapa de Localização das Estações Fluviométricas Hybam.

De maneira geral, os dados indicam que o período de cheia ocorre no primeiro semestre e a vazante no segundo semestre, em todas as estações. No entanto, a estação de Itaituba apresenta uma diferença no regime de cota em comparação com as outras estações, com a vazante ocorrendo mais tarde, nos meses de agosto e setembro (Figura 11).

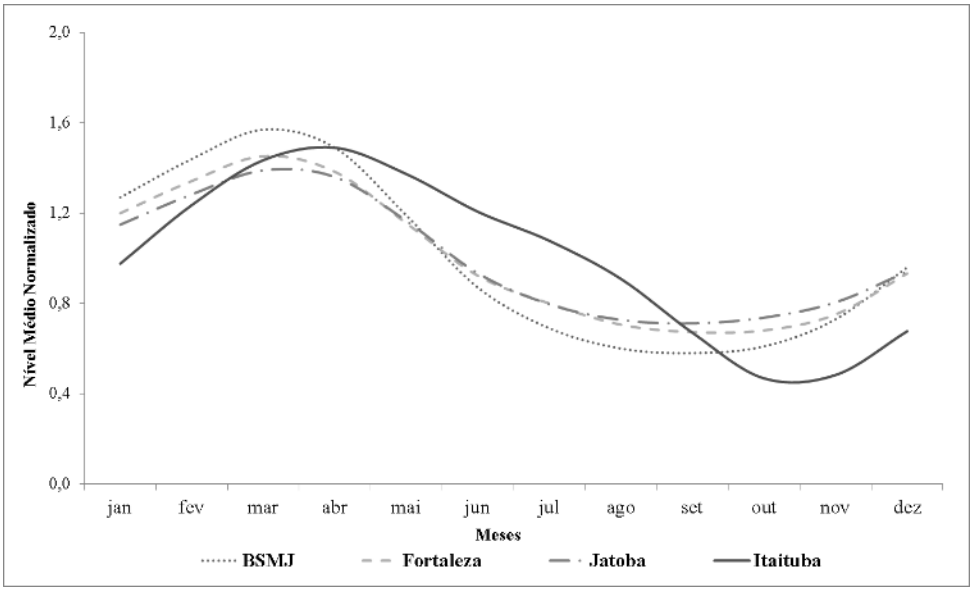
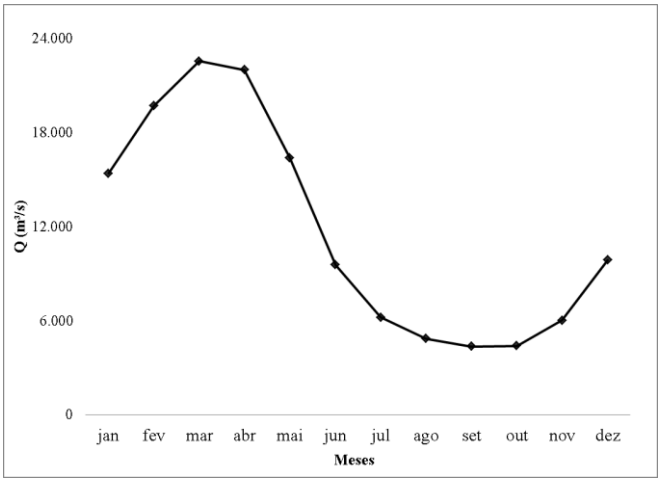


Figura 11: Nível Médio Normalizado das Estações Barra do São Manuel a jusante (BSMJ), seguida por Fortaleza, Jatobá e Itaituba. **Fonte:** Hybam (2024)

Quanto às médias anuais de vazão, a análise foi baseada nos dados da estação de Itaituba, que detém o maior período de registros (1968-2019). A avaliação dos dados interanuais mostrou uma estabilidade geral na amplitude da vazão, com mínimas nos anos de 1976 e 2003 e picos em 1978, 1979, 2004 e 2014. Em 2014, a descarga líquida alcançou 29.000 m³/s, enquanto em 2003 o valor foi de 2.274 m³/s. Além disso, não foram detectados períodos de ausência de dados superiores a três meses na área analisada, o que assegura maior precisão dos resultados (Figura 12).

(a)



(b)

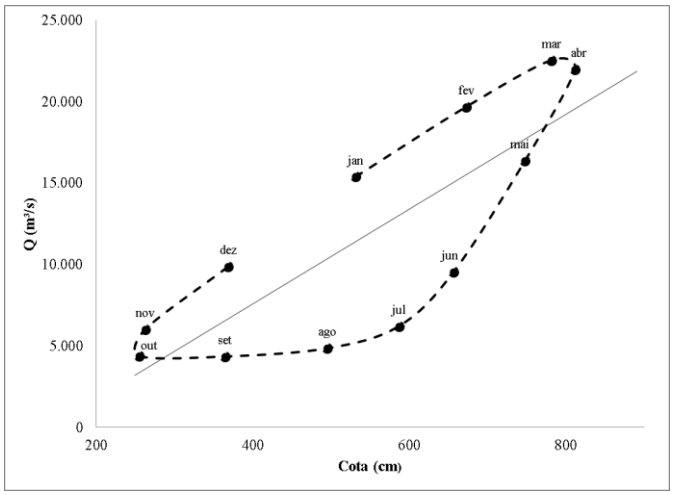


Figura 12: Dados de vazão média mensal versus cota média mensal na estação de Itaituba **Fonte**: Hybam (2024).

Santos *et al*. (2015) constataram que as médias anuais de vazão nos postos fluviométricos próximos à foz dos rios Juruena, Teles Pires e Tapajós foram de 4.655 m³/s, 3.667 m³/s e 12.259 m³/s, respectivamente. Esses dados indicam um aumento progressivo nos valores de vazão.

O período de maior descarga líquida média anual ocorre entre fevereiro e abril, com valores variando de 15.000 m³/s a 22.000 m³/s, enquanto o período de menor descarga é registrado entre agosto e setembro, com valores próximos a 4.000 m³/s. Comparando os valores máximos e mínimos de descarga líquida média anual, há uma variação de aproximadamente 18.000 m³/s entre os meses de pico e os de menor vazão. Comparando os dados de descarga com as cotas, obtém-se uma correlação mediana (R^2 = 0,6628), indicando que os picos de cheia/vazante e vazão máxima e mínima nem sempre ocorrem ao mesmo tempo (Figura 12).

Observou-se uma tendência de aumento nos valores das máximas anuais, enquanto a média e a mínima (Figura 13) apresentaram uma tendência decrescente. A descarga líquida anual máxima variou entre 19.000 m³/s e 29.000 m³/s, com médias em torno de 12.000 m³/s e valores mínimos entre 3.000 m³/s e 6.000 m³/s. Esses dados são semelhantes aos encontrados por Santos *et al*. (2015) para a estação de Itaituba no médio baixo Tapajós, onde calcularam uma vazão média anual de 12.259 m³/s.

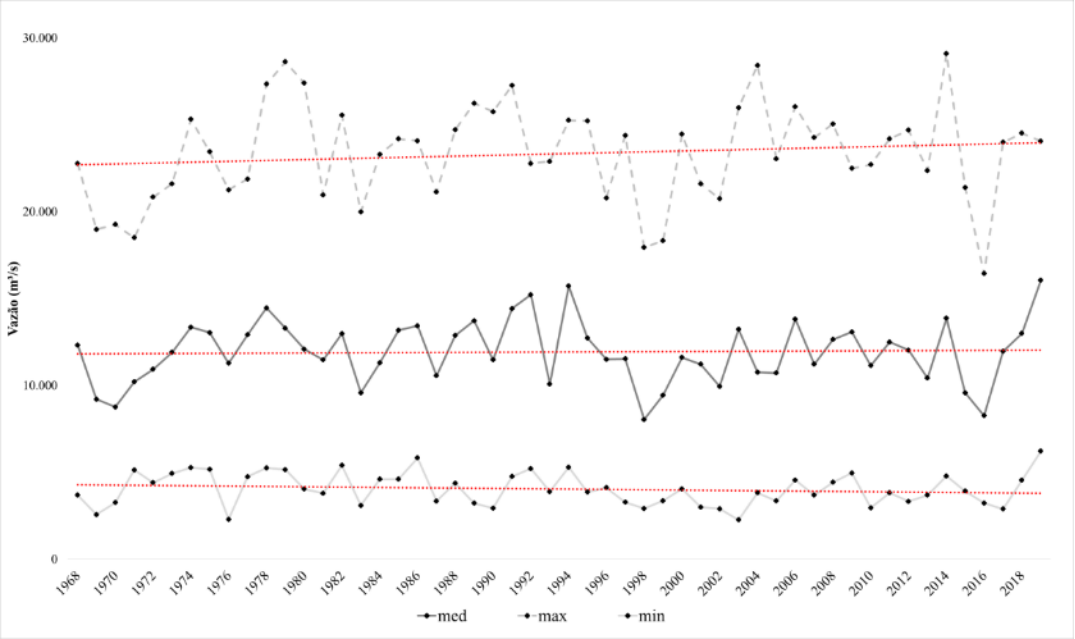


Figura 13: Dados de vazão máxima, média e mínima, respectivamente, na estação de na estação de Itaituba (1968-2019). **Fonte:** Hybam (2024).

Dados de CSS da estação de Itaituba (1968- 2019) mostram o que se espera de rios de água clara, conforme proposto por Sioli (1991), aproximadamente uma média de 10 $mg.L^{-1}$, um valor considerado baixo. O mês de menor CSS é maio e os picos ocorrem em janeiro e dezembro. O valor máximo mensal foi de 12 $mg.L^{-1}$ e o mínimo 8 $mg.L^{-1}$, o que corresponde a uma amplitude de apenas 4 mgL^{-1}. Stevaux e Latrubesse (2017) afirmam que a concentração de sedimentos suspensos varia em relação à vazão do rio. Ademais, a atividade garimpeira no local pode contribuir para o processo de erosão das margens, refletindo no aumento das taxas de transporte de sedimentos suspensos (Figura 14).

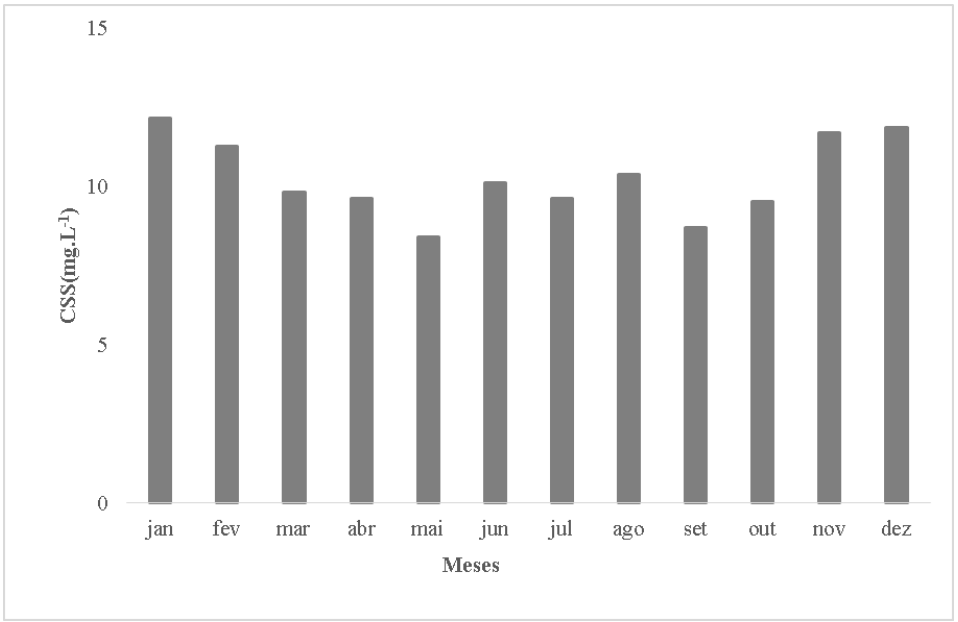


Figura 14: Dado de sedimentos em suspensão na Estação de Itaituba**. Fonte:** Hybam (2024)

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa seguiu abordagem dedutiva, utilizando dados retrospectivos e prospectivos. Os dados retrospectivos são derivados da análise de sensoriamento remoto disponível no período de 1985 a 2022. Os dados prospectivos são os coletados em campo, do comportamento espectral da água nos anos de 2023 e 2024, focando no baixo curso do rio Tapajós, o que pode ser observado no fluxograma da Figura 15.

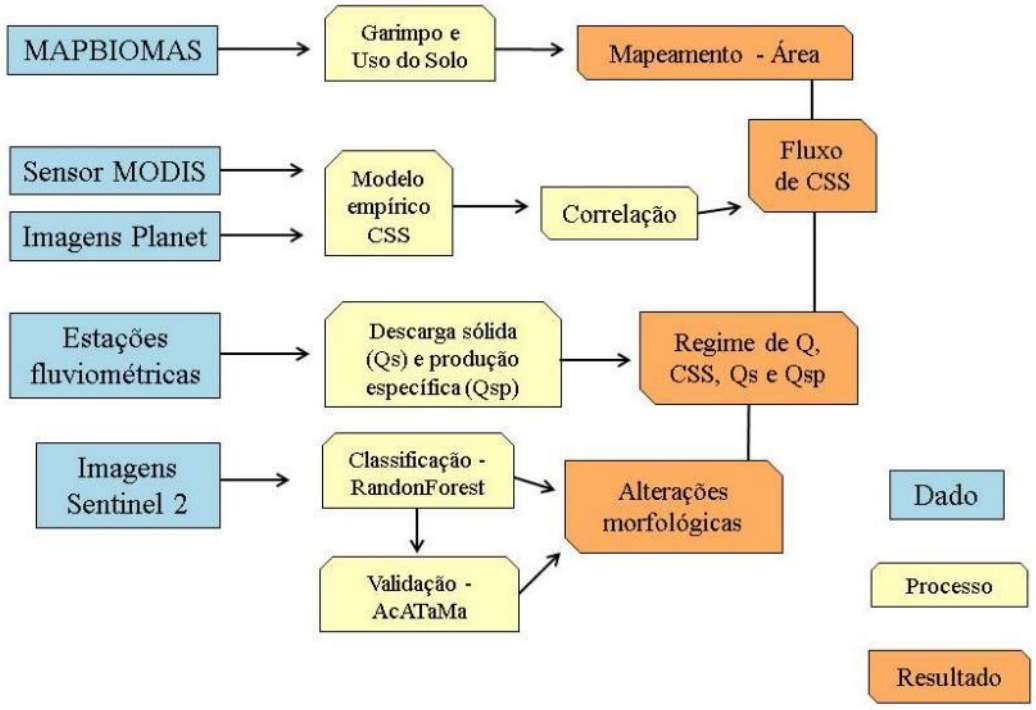


Figura 15: fluxograma metodológico. **Fonte:** Adaptado de Marinho *et al*, 2021.

A análise dos dados foi baseada em técnicas estatísticas, incluindo análise de séries temporais e medidas descritivas, bem como representações gráficas e da cartografia temática. A interpretação dos resultados foi realizada por meio de mapas temáticos que ilustram a extensão e a intensidade dos impactos do garimpo ao longo do tempo. Esses mapas destacaram áreas críticas e mudanças observadas nos dados. Também foram utilizados gráficos e tabelas. Por fim, com base na observação dos resultados foram fornecidas recomendações para políticas públicas, práticas de manejo sustentável e futuras pesquisas.

3.1 Dado Primário

3.1.1 Radiometria de campo

A radiometria *in situ* foi coletada a partir do equipamento RAMSES TriOs que

abrange o intervalado espectral de 350-950 nm do espectro eletromagnético. O equipamento consiste em três sensores, um para medição de irradiância e dois para radiância, dispostos em paralelo em um ângulo sólido de 135° em relação ao sol. A respeito da Rrs, cada comprimento de onda do espectro eletromagnético (λ) é calculada a partir da Equação:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_u(\lambda) - \rho . L_d(\lambda)}{E_d(\lambda)}$$

A radiometria foi coletada na foz do Tapajós nos anos de 2023 e 2024 para ser usada como parâmetro comparativo e de ajuste para o modelo empírico do modelo de satélite. Nessa coleta foi considerada a metodologia proposta por Mobley (1999), que indica um valor de p = 0,028 como fator de correção para a velocidade do vento menor que 5 m/s, Lu é radiância da superfície de água em 40º off-nadir, Ld é a radiância proveniente do céu em 40º utilizada para correção da reflexão da luz na superfície da área e Ed é a irradiância total que chega na superfície da água em um ângulo de 90°. Na Figura 16 pode-se observar a disposição dos equipamentos instalados e a geometria supracitada.

Figura 16: Disposição do radiômetro para aquisição da radiometria. **Fonte:** Noriega (2024).

3.1.2 Qualidade da água

Os dados de concentração de sedimentos suspensos (CSS) foram coletados em pontos distintos nos anos de 2023 e 2024 no baixo curso do rio Tapajós e região de confluência com

o rio Amazonas. A coleta e a determinação da CSS foram desenvolvidas com base no protocolo do Observatório HYBAM, por sua vez baseado nas recomendações do Programa GEMS/water do PNUMA (Chapman, 1992), realizado em amostras de 500 ml, coletadas em uma profundidade de 20 cm em relação à superfície da água, filtradas em membranas de acetato de celulose, com uma porosidade de 0,4 μm, onde são pesadas inicialmente e após a secagem em estufa a 105 °C, durante o período constante de duas horas, para determinação do seu peso final. Com isso, é possível determinar a CSS em $mg.L^{-1}$ (Figura 17).

Figura 17: Filtragem, secagem e pesagem das amostras de sedimentos.

Para a modelagem da concentração de sedimento suspenso utilizou-se um modelo empírico (Equação 1) desenvolvido por Lobo *et al*., (2015) com dados coletados nos rios Tapajós e Crepori. Esse modelo leva em consideração as bandas do vermelho dos satélites Landsat 5/TM e LISS-III. Nesse estudo, os autores avaliaram os impactos causado pelo garimpo na água em diferentes rios da bacia do Tapajós (Lobo *et al*., 2015; 2016).

$$TSS = 2.3036 \times 2.71828^{0.0018 \times Red} \qquad \text{Equação 1}$$

Na Equação 1, TSS é a concentração de sólidos totais suspensos e Red é a refletância da banda do vermelho (comprimento de onda central em 665 nm).

3.2 Dado Secundário

3.2.1 Imagens de satélite

A análise temporal de imagens de satélite foi usada para avaliar as alterações provocadas pelo garimpo na superficie de água nos rios. A obtenção dessas imagens se deu por meio do banco de dados público USGS (United States Geological Survey) e do observatório Copernicus, programa da União Europeia de observação da Terra. Além disso, a

detecção de mudanças na refletância da água possibilitou estimar a concentração de sedimentos suspensos, um indicador da intensificação dos processos erosivos ocasionados pela atividade garimpeira.

Mediante a análise da reflectância, das séries temporais e da classificação do uso do solo, foi possível mapear as alterações na morfologia do canal e na qualidade da água ao longo do tempo. A detecção dessas mudanças e as análises morfométricas contribuem para a identificação dos processos erosivos e deposicionais. Para essas análises, utilizaram-se os sensores apresentados adiante.

3.2.2 Sensor MODIS

O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) foi desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) como parte de um esforço global para monitorar as mudanças climáticas e os impactos ambientais em larga escala (Latorre *et al*., 2003). Ele entrou em operação em 1999 a bordo do satélite Terra e, posteriormente, em 2002 no satélite Aqua, ambos do programa EOS (Earth Observing System). O MODIS é um instrumento multiespectral com 36 bandas espectrais, que abrangem desde o espectro visível até o infravermelho térmico (0,4 a 14,4 μm), permitindo a observação detalhada de diversos processos terrestres, atmosféricos e oceânicos.

Com uma resolução espacial que varia de 250 metros, para bandas no visível e infravermelho próximo, a 1.000 metros, para bandas térmicas e infravermelhas distantes, o sensor é capaz de fornecer dados com alta precisão em diferentes escalas de análise. Sua resolução temporal, entre 1 e 2 dias, permite uma atualização frequente dos dados, o que o torna fundamental para o monitoramento contínuo de eventos rápidos, como queimadas, desmatamento e mudanças no uso da terra.

O MODIS também possui uma resolução radiométrica de 12 bits, o que melhora a capacidade de discriminar pequenas variações nos sinais captados, aumentando sua sensibilidade para detectar variações na cobertura terrestre, na concentração de aerossóis na atmosfera, na temperatura da superfície e na qualidade da água. A coleta de dados do MODIS tem sido fundamental para estudos de dinâmica fluvial, monitoramento de vegetação, ciclo hidrológico, bem como para a observação de processos atmosféricos e oceanográficos, como a formação de nuvens e a temperatura da superfície do mar.

A vasta gama de produtos derivados do sensor MODIS, como refletância da superfície, temperatura da terra, índices de vegetação e detecção de focos de calor, tem sido amplamente utilizada em aplicações de gestão de recursos naturais e políticas públicas

voltadas à mitigação de impactos ambientais. O acesso gratuito e global a esses dados também tem facilitado a colaboração científica internacional e a realização de estudos detalhados sobre mudanças climáticas e ecossistemas em regiões remotas, como a Amazônia.

3.2.3 Sentinel-2 MSI

O Multispectral Instrument (MSI), a bordo do satélite Sentinel-2A (2015) e Sentinel-2B (2017) é uma importante ferramenta para o monitoramento ambiental. Esse recurso disponibiliza imagens de satélite com a resolução espacial de 10 m, resolução radiométrica de 12 bits, importante na discriminação entre água, solo exposto, vegetação e plumas de sedimento. Esse satélite contém 13 bandas espectrais que cobrem do visível ao infravermelho.

Os produtos de level-2A, utilizados neste trabalho, já vêm corrigidos para refletância de superfície pelo algoritmo Sen2Co da Agência Espacial Europeia (ESA). A resolução espectral, resolução espacial e tempo revisita torna o Sentinel-2 MSI particularmente adequado para mapear mudanças morfológicas ao longo de grandes rios, como o Tapajós.

3.2.4 Sensor PlanetScope

As imagens da constelação de satélites PlanetScope[1] oferecem alta resolução espacial, variando de 3 a 5 metros, o que proporciona detalhamento adequado para a análise de pequenos corpos d'água (< 100 metros de largula) e mudanças em escala local. A banda azul (455-515 nm) e a banda verde (500-590 nm) são frequentemente utilizadas para detectar a refletância de corpos d'água, permitindo o estudo de mudanças na cor da água associadas à sedimentação e à qualidade da água. O uso de imagens Planet para o período de 2016 a 2022 forneceu dados sobre as mudanças nas áreas impactadas pelo garimpo.

3.2.1 MapBiomas

Foram utilizados dados provenientes do Programa MapBiomas, uma iniciativa do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Observatório do Clima (OC). Esses dados são baseados no mapeamento de imagens capturadas pelo satélite Landsat, que possui uma resolução espacial de 30 metros.

O MapBiomas fornece mapas anuais da classificação dos tipos de uso e cobertura do solo desde 1985. No que diz respeito aos dados de garimpo, são disponibilizadas duas classes

[1] https://www.planet.com/

distintas de dados: o tipo de mineral extraído e a atividade que caracteriza essa extração (garimpeira ou industrial). Isso permitiu caracterizar a variabilidade espacial e temporal das dinâmicas de uso do solo na bacia analisada durante o período de 2012 a 2022, incluindo os anos de 1985, 1995 e 2005 para fins de comparação.

A análise espacial é uma ferramenta fundamental para a compreensão de fenômenos geográficos, pois permite identificar padrões e dinâmicas que não seriam evidentes em uma abordagem não espacial. O uso de softwares abertos é importante, pois facilita a integração de dados, combinando diferentes fontes e tipos de informações, o que enriquece a análise e proporciona uma visão mais abrangente das interações espaciais, auxiliando na compreensão das dinâmicas espaciais e dos padrões não evidentes em uma perspectiva não espacial (Rosa, 2011). Assim, a análise espacial é útil para interpretar dados e desenvolver estratégias, destacando-se na compreensão aprofundada da realidade geográfica.

Os dados da presente pesquisa foram acessados na ferramenta do Projeto MapBiomas no Google Earth Engine[2]. Para o download dos dados, o polígono da Bacia do Tapajós (ANA, 2016) foi utilizado, considerando a área do médio e baixo Tapajós. Além disso, também foram empregados dados tanto do IBGE quanto do Projeto HYBAM[3] e, deste último, tais informações foram mobilizadas para a caracterização da dinâmica fluvial. O Projeto HYBAM, inclusive, tem como foco disponibilizar dados para amparar pesquisas científicas multidisciplinares centradas na hidrologia da Bacia Amazônica. Por fim, o processamento dos dados foi realizado com auxílio do software de geoprocessamento QGIS.

3.3 Classificador RandomForest (RF)

Para determinar mudanças na cobertura de água, como áreas de possível assoreamento ou erosão, e detectar modificações na forma do canal ocasionadas pela atividade garimpeira, foram utilizadas imagens do Sentinel-2 MSI (produto *Surface Reflectance*) e do classificador RandomForest (Breiman, 2001) no Google Earth Engine

Nesse ambiente computacional, foi selecionada, para cada ano de interesse, a cena com menor cobertura de nuvens (< 10 %) entre junho a agosto. De cada cena foi recortada a área de estudo, a qual foi melhorada com os índices espectrais NDVI e NDWI, totalizando seis variáveis de entrada (B2, B3, B4, B8, NDVI, NDWI).

O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é o indicador relacionado à

[2] https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit&scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-mining.js
mine

vegetação, que calcula a razão entre o infravermelho-próximo (NIR) e o vermelho (RED).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{\text{NIR+RED}} \qquad \text{Equação 2}$$

Já o NDWI (Normalized Difference Water Index) é ultilizado comumente para realçar corpos d'água ao comparar a refletância da banda do verde com a do NIR, conforme a equação abaixo.

$$NDWI = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}} \qquad Equação\ 3$$

As amostras foram determinadas em quatro classes temáticas: água, não-água, vegetação e outros alvos– para que o algoritmo não confundisse com desmatamento ou campinarana –, totalizando, aproximadamente, 200 pontos distribuídos para o ano de 2024, e 100 pontos para o ano de 2019, para o polígono delimitado no estudo. O modelo RandomForest (RF) foi ajustado para 50 árvores de decisões. O classificador foi aplicado a duas imagens, uma datada em 22/07/2024 e outra em 24/06/2018.

A validação do mapeamento foi realizada no QGIS, por meio do plugin AcATaMA[4], no qual foi gerada a matriz de erro para os mapas classificados, por meio da coleta de 30 amostras aleatórias reservadas para teste e validadas por meio de interpretação visual com imagens PlanetScope e Google Satelite. As métricas de desempenho alcançaram uma boa acurácia global superior a 90 %. Por fim, as pequenas ilhas foram removidas, resultando em um produto cartográfico homogêneo.

[4] https://plugins.qgis.org/plugins/AcATaMa/

4. RESULTADOS

4.1 Usos do solo no médio e baixo curso da Bacia do Tapajós

Durante as últimas décadas, a Bacia do Tapajós passou por transformações significativas no uso da terra, refletindo a interação complexa entre atividades humanas e processos ambientais. O presente estudo analisou as mudanças na paisagem da bacia ao longo do período de 1985 a 2022, levando em consideração as seguintes classes de uso e cobertura da terra: formação florestal, formação campestre, agropecuária e garimpo.

Ao analisar os dados do MapBiomas nesse período, foi possível observar padrões temporais e espaciais nas mudanças de uso do solo na região. Desde 1985, houve uma notável expansão dos espaços destinados à agropecuária, particularmente nas áreas próximas às rodovias BR-163 e BR-230, locais mais acessíveis e vulneráveis à exploração humana. Esse processo tem sido acompanhado por um aumento nas taxas de desmatamento e fragmentação florestal, com consequências relevantes para a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos.

No ano de 1985, nota-se a predominância da formação florestal na área de estudo, ocupando 15.140.911 hectares da área total, equivalente a 95% de toda a região analisada. No mesmo período, 147.866 hectares (0,92% da área total da bacia) foram mapeados como uso antrópico, incluindo pastagem, áreas urbanizadas, plantações de soja e outras lavouras temporárias. Esses dados indicam uma boa preservação da cobertura florestal para esse período (Figura 18)

Em 1985, o garimpo ocupava 0,3% da área analisada, o equivalente a 4354 hectares. Nesse período, os garimpos atingiram seu ápice no estado do Pará, como o de Serra Pelada (Coelho *et al*., 2017). Apesar da expansão expressiva dessas atividades em outras regiões da Amazônia, o impacto do garimpo na Bacia do Tapajós permaneceu limitado durante a década de 1980.

Em 1995, a área de formação florestal na região diminuiu para 93%, abrangendo aproximadamente 14.922.310 hectares. Paralelamente, o uso antrópico nessa mesma época dobrou em comparação com os dados de 1985, alcançando 357.611 hectares e representando 2,2% da área total da bacia. Além disso, houve um intenso aumento na atividade de garimpo, cuja área quase quadruplicou, passando de 4354 para 17.232 hectares e representando 0,11% da área total da bacia.

No ano de 2005, a área de cobertura florestal nativa continuou a diminuir, representando 91% da região, abrangendo uma extensão de 14.499.586 hectares. Enquanto isso, a área de garimpo permaneceu estável em 0,11%. No entanto, os outros usos antrópicos

registraram um crescimento elevado, ocupando agora uma área de 792.255 hectares, o que equivale a 4,9% da bacia. É notável, nesse período, uma expansão da pastagem, especialmente nas áreas próximas às estradas já existentes.

Mais tarde, em 2012, a extensão da cobertura florestal foi estimada em 14.253.283 hectares, seguindo sua tendência de declínio e representando 89% da área total. Nesse intervalo de tempo, a área destinada ao garimpo apresentou um aumento, atingindo 23.875 hectares (0,15%). Além disso, outros usos antrópicos foram mapeados em 1.031.630 hectares, dos quais 99% desse valor (1.019,650 hectares) foram identificados como áreas de pastagem.

Posteriormente, em 2022, a área da bacia possuía 85% da sua cobertura florestal original, o que reflete em uma área de 13.549,045 hectares, ou seja, menos 1.591.866 hectares de floresta nativa foram destinados a outros usos em um período de 37 anos. Nesse ano, a área de garimpo quadruplicou em relação a 2012 (23.875 hectares) e passou a ser equivalente a 88.826 hectares (0,55% do total da área de estudo).

Ao examinar os dados dos anos de 1985, 1995, 2005, 2012 e 2022, tornou-se evidente uma série de mudanças nas áreas de formação florestal. Todavia, é notável o aumento da extensão das áreas destinadas à pastagem e ao garimpo, com uma concentração maior perto de rodovias, próximo a Itaituba e ao sul da bacia. Simultaneamente, houve uma redução de 10% na área de floresta para dar lugar a algum tipo de uso antrópico. Esses dados estão dispostos na Figura 18.

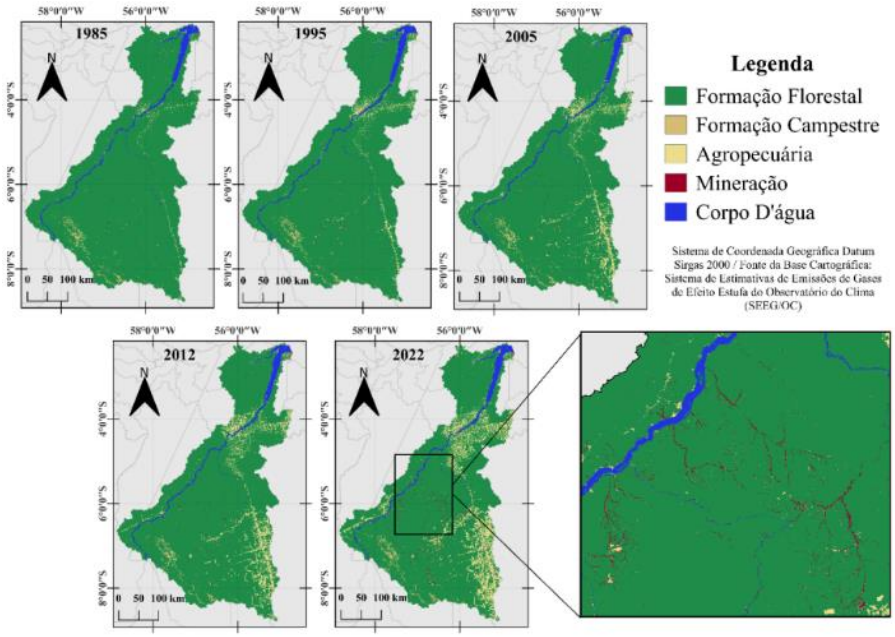


Figura 18: Mapa de uso do solo. **Fonte:** MapBiomas (2024).

Ainda na perspectiva dos usos do solo na bacia do médio e baixo Tapajós pode-se

comparar a atividade garimpeira aos demais usos. Focando nos usos antrópicos previamente definidos, como pastagem, áreas urbanizadas, plantações de soja e outras lavouras temporárias, é possível comparar esses dados com os de garimpo. Em 2012, a área destinada ao garimpo correspondia a apenas 2,26% do uso total do solo. Desde então, esse valor tem crescido de forma constante, atingindo 5% em 2022, o que equivale a uma área de 88.826 hectares (Figura 19).

O garimpo na região do médio/baixo Tapajós ocorre principalmente em seus afluentes. Entre 2020 e 2021, a área de garimpo aumentou exponensialmente em 24,45%, quase o dobro dos aumentos observados nos anos anteriores, que desde 2012 não ultrapassavam 15%. Pode ser atribuído a esse crescimento a alta nos preços do metal, resultando em um aumento de 14,9% nas exportações nos primeiros quatro meses de 2020 em comparação ao mesmo período de 2019. Isso pode ser explicado pelas políticas da época, como a discussão sobre a liberação do garimpo em unidades de conservação de uso sustentável pelo Governo Federal (Salomon, 2020).

Foi possível identificar a relação entre essa ampliação da atividade garimpeira, a partir de 2020, e o crescimento do valor do ouro. Freitas *et al.* (2024) observam que em 2010 os preços do ouro saltaram de 30 para 60 dólares americanos por grama, em 2011, oscilando em torno de 45 dólares por grama entre 2012 e 2020. No último triênio, os preços retomaram e ultrapassaram novamente o pico, mantendo-se em uma média de 60 dólares por grama. Atualmente, o ouro está em um dos seus valores mais altos dos últimos 10 anos, custando cerca de 70 dólares por grama.

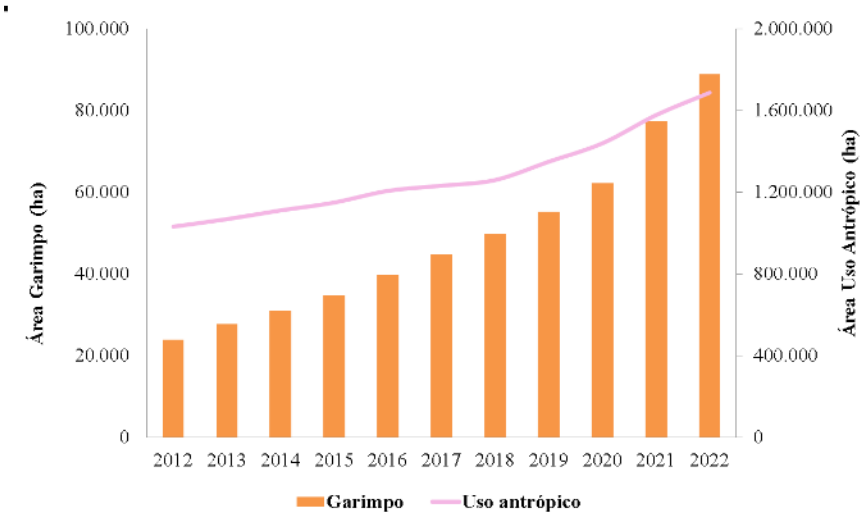


Figura 19: Comparação Garimpo x Demais Usos Antrópicos na Bacia do Tapajós.

Foi possível espacializar as principais áreas garimpadas na Bacia do Tapajós. Em

2012, 98% da área classificada como garimpo era destinada à exploração do ouro, e esse valor permaneceu acima de 94% até 2022. Essas informações destacam que o garimpo na região é predominantemente voltado para a extração de ouro.

Os dados sobre o uso do solo na região do médio/baixo Tapajós revelam uma dinâmica preocupante de transformação da paisagem. Segundo os dados do MAPBIOMAS, analisado, a diminuição constante da cobertura florestal nativa, combinada com a expansão das áreas de pastagem e garimpo, indica uma pressão crescente sobre os ecossistemas locais. No presente trabalho, a análise dos dados mostrou que, desde 1985, houve uma ampla redução de áreas florestais, acompanhada por um aumento expressivo das atividades antrópicas.

O recente crescimento acentuado da atividade de garimpo, apontando com os dados do MAPBIOMAS, motivado por altos preços do metal e políticas governamentais permissivas, destaca um desafio adicional para a conservação ambiental. Esses dados sublinham a necessidade urgente de políticas eficazes de gestão e conservação que equilibrem o desenvolvimento econômico junto da preservação ambiental, assegurando a sustentabilidade da Bacia do Tapajós em longo prazo.

4. 2 Balanço de fluxo suspenso

As estações utilizadas nesta análise foram selecionadas em função da disponibilidade dos dados de vazão, CSS e turbidez (Figura 20). Foram utilizados os dados de vazão pertencentes às estações de Barra do São Manuel (BSM), Itaituba e Jamanxim, abrangendo o período de 1987 a 2025. Os dados de CSS média mensal foram obtidos nas estações de Barra do São Manuel, período de 1996 a 2024, e Itaituba, período de 1992 a 2024, enquanto os dados anuais foram analisados entre 2010 e 2024. Além disso, os dados de turbidez foram coletados das estações de Jamanxim e Baburé, compreendendo o período de 2009 a 2025 para ambas.

Tabela 2: Resumo das estações da ANA analisadas, seus respectivos dados e o período.

Código	Estação	Área de drenagem (km^2)	Latitude	Longitude	Q - Período	CSS Mensal - Período	CSS Anual - Período	Turbidez - Período
17430000	Bsm	333.000	-7,3397	-58,1553	1987-2025	1996-2024	2010-2024	-
17730000	Itaituba	458.000	-4,2756	-55,9822	1987-2025	1992-2025	2010-2024	-
17680000	Jamanxim	40.200	-5,4556	-55,8700	1987-2025	-	-	2009-2025
17710000	Baburé	450.000	-4,6156	-56,3250	-	-	-	2009-2025

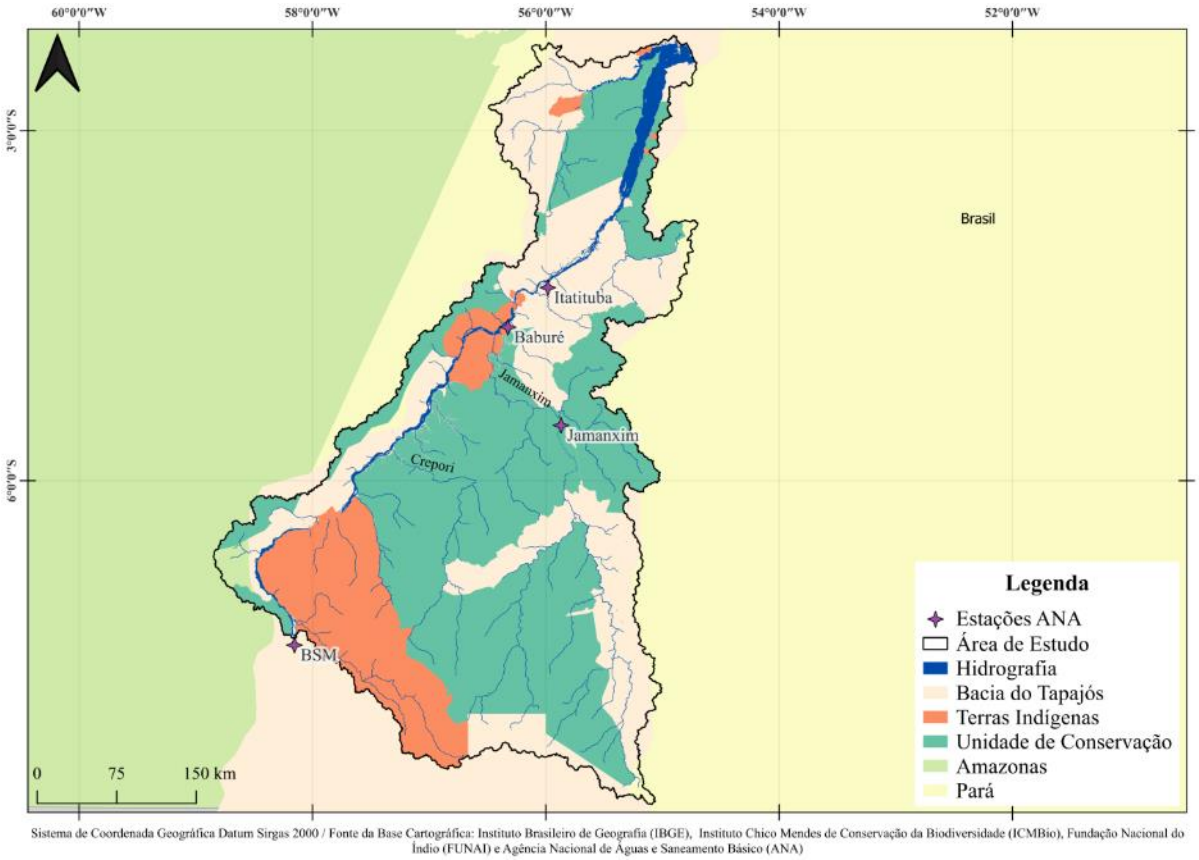


Figura 20: Mapa de Localização das Estações Fluviométricas ANA.

A análise do regime de vazão mensal no rio Tapajós evidencia valores mais elevados, de 10.091 m³/s, entre os meses de fevereiro e abril, e mais baixos entre agosto e outubro, conforme Figura 21. Observa-se aumento gradual da vazão a partir de janeiro, atingindo 27.338 m³/s em Itaituba no mês de março, seguido por uma queda nos meses subsequentes, com médias em torno de 3.000 m³/s, tanto em Itaituba quanto em Barra do São Manuel (BSM). Esse comportamento hidrológico está diretamente relacionado ao regime pluviométrico da região, cuja estação chuvosa se concentra no primeiro semestre do ano, intensificando o volume de água no Tapajós e em seus afluentes, como o rio Jamanxim.

Entre as estações analisadas, verificou-se uma diferença entre as vazões do rio Tapajós e de seus afluentes, com os maiores valores registrados em março e os menores nos meses de agosto e setembro. Em Barra do São Manuel (BSM), a vazão variou de 3.154 m³/s em setembro para 16.527 m³/s em março. Em Itaituba, os valores oscilaram entre 3.747 m³/s em agosto e 27.338 m³/s em março. No rio Jamanxim, a vazão foi de 95 m³/s em setembro, alcançando um máximo de 2.798 m³/s em março. Esses dados indicam que, durante o período de cheia, o Jamanxim contribui com aproximadamente 10,2% da vazão registrada em Itaituba.

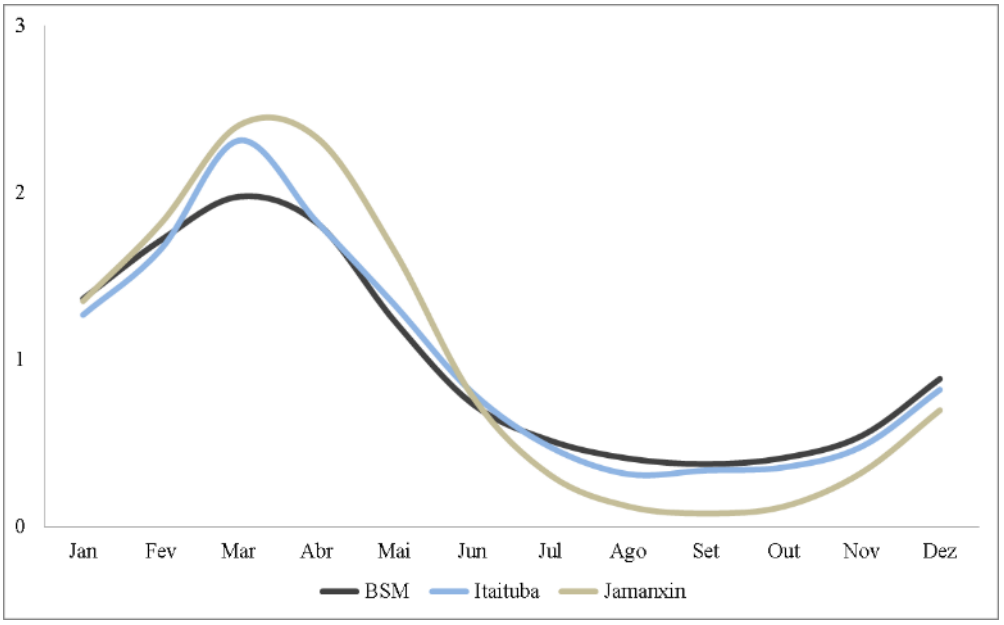


Figura 21: Vazão média mensal normalizada em BSM, Itaituba e Jamanxim. **Fonte:** ANA, 2025.

Ao analisar os dados apresentados na Figura 22, observa-se que a razão comparativa entre as vazões na estação de BSM e Itaituba demonstra a dinâmica do fluxo no rio Tapajós. Durante o período de cheia, a contribuição das áreas a montante varia de 60 a 70%, refletindo a predominância do volume de água observado em BSM no fluxo total. Essa variação é coerente com o comportamento hidrológico regional, no qual o aumento da precipitação nas sub-bacias eleva a vazão em Itaituba, conforme descrito por Santos *et al*. (2015). A análise da curva de permanência para esse posto fluviométrico (série 1975-1995) mostra que a vazão foi de 3.279 m³/s, com média anual de 12.259 m³/s, enquanto a cota foi de 224 cm, com média anual de 545 cm, evidenciando a variabilidade hidrológica da bacia.

Durante os períodos de vazante, observa-se um aumento na vazão registrada em BSM, que passa a representar uma parcela significativamente maior do fluxo total. Esse padrão indica uma possível redução na contribuição dos trechos a montante, atribuída à menor recarga hídrica e ao aumento dos processos de evapotranspiração. Segundo Zanin (2021), a reciclagem da precipitação na Bacia Amazônica apresenta um gradiente crescente de leste para oeste e de norte para sul, o que pode influenciar de forma direta essa dinâmica de redistribuição dos fluxos.

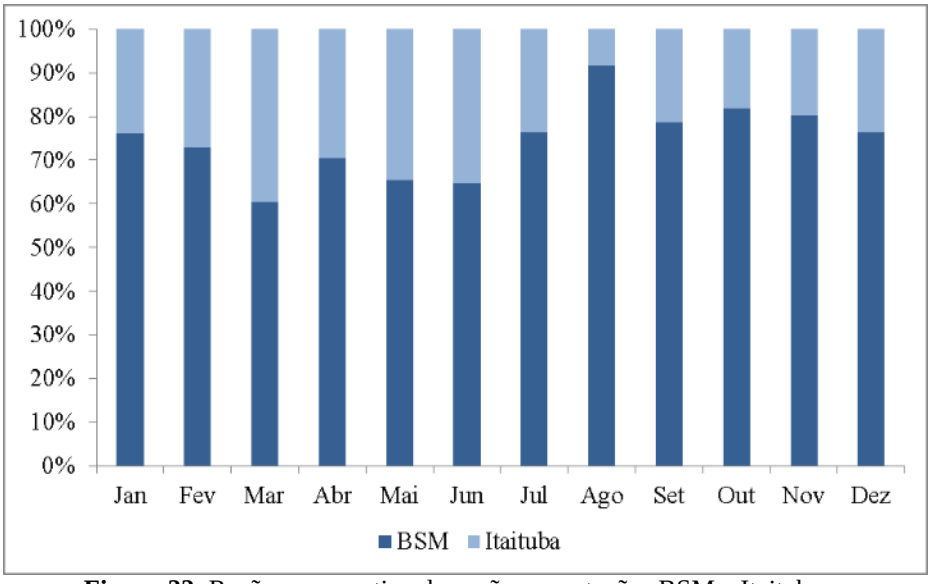


Figura 22: Razão comparativa da vazão nas estações BSM e Itaituba.

Ao analisar os dados apresentados na Figura 23, percebe-se que a carga de sedimentos suspensos nas estações de BSM e Itaituba varia significativamente ao longo do ano. Na estação de BSM, os valores se mantêm em uma média de 9 $mg.L^{-1}$ entre janeiro e junho, reduzindo para cerca de 6 $mg.L^{-1}$ entre julho e dezembro. Em Itaituba, a média de sedimentos no primeiro semestre é de 12 $mg.L^{-1}$, diminuindo para 9 $mg.L^{-1}$ no segundo semestre. Os dados de 1994 a 2024 indicam que BSM reflete um menor aporte sedimentar, possivelmente por estar localizada em uma região de drenagem sobre o escudo cristalino do Brasil Central. Por outro lado, Itaituba apresenta um padrão mais dinâmico, sugerindo o acréscimo de sedimentos ao longo do curso do rio, possivelmente advindos de afluentes como os rios Jamanxim e Crepori, conforme discutido por Santos *et al.* (2015).

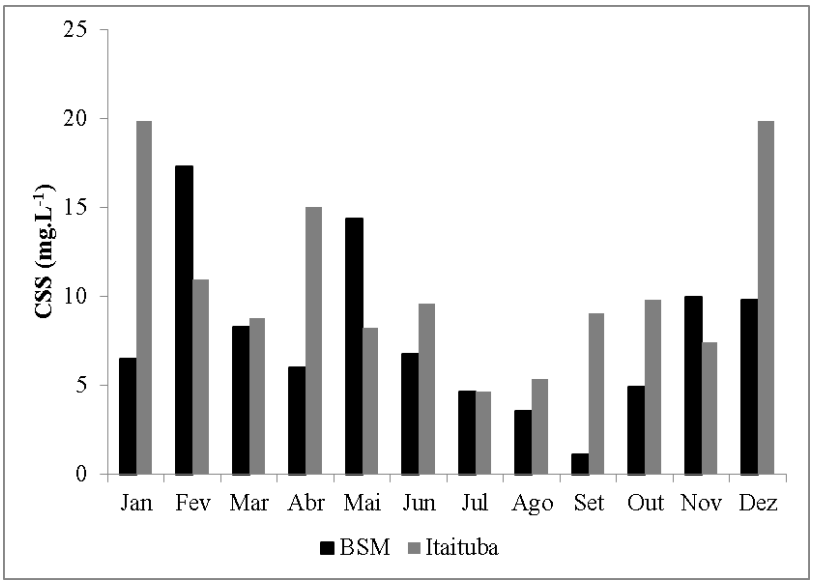


Figura 23: CSS Mensal em BSM e Itaituba

Entre os meses de janeiro e maio observa-se um aumento na carga sedimentar nas estações, por exemplo, em BSM, os valores máximos chegam a 17 $mg.L^{-1}$, e, em Itaituba, esse valor é de 20 $mg.L^{-1}$. Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da vazão e da capacidade de transporte do rio, favorecendo a erosão e o carreamento de partículas ao longo do Tapajós. Nos meses de estiagem (junho a novembro), a concentração de sedimentos suepensos apresenta redução, atingindo valor mínimo em BSM de 4 $mg.L^{-1}$ e em Itaituba 5 $mg.L^{-1}$, para um período de menor vazão.

A diferença entre os padrões registrados em BSM e Itaituba sugere que a dinâmica sedimentar pode ser influenciada por processos naturais e, possivelmente, por atividades antrópicas na bacia. Entretanto, a distinção precisa entre essas influências exige uma análise mais detalhada dos fatores hidrossedimentológicos e do uso da terra na região. Essa variabilidade ressalta a importância de integrar dados de sensoriamento remoto e monitoramento *in situ* para uma avaliação mais detalhada dos mecanismos que controlam o transporte sedimentar na Bacia do Tapajós.

Os dados de turbidez apresentados na figura 24 reforçam essa necessidade, especialmente ao considerar a diferença entre os pontos de monitoramento. A turbidez é amplamente utilizada para correlacionar os sedimentos suspensos e, em algumas condições, pode apresentar uma relação aproximada de 1:1 com a concentração de material particulado na água (Dodds & Whiles, 2010).

Na Figura 24 observa-se uma diferença significativa nos padrões de turbidez entre as estações Baburé e Jamanxim ao longo do ano. Por um lado, os valores de turbidez na estação de Baburé, localizada no rio Tapajós, permanecem relativamente estáveis durante o ano; por outro, os dados da estação de Jamanxim, um tributário fortemente impactado pela atividade garimpeira, demonstram aumento a partir do mês de agosto, apresentando seu pico em dezembro. Esse aumento acentuado na turbidez pode sugerir uma relação direta entre a intensificação do garimpo e o aumento da carga de sedimentos transportados pelo rio, indicando que a atividade mineradora influencia os processos hidrossedimentares do Jamanxim. Embora os meses de fevereiro, março e abril apresentem maior precipitação, esses picos não coincidem com o aumento da turbidez neste tributário, o que sugere que, ao contrário do esperado, a chuva não é o principal fator que influencia a dinâmica sedimentar dessa região.

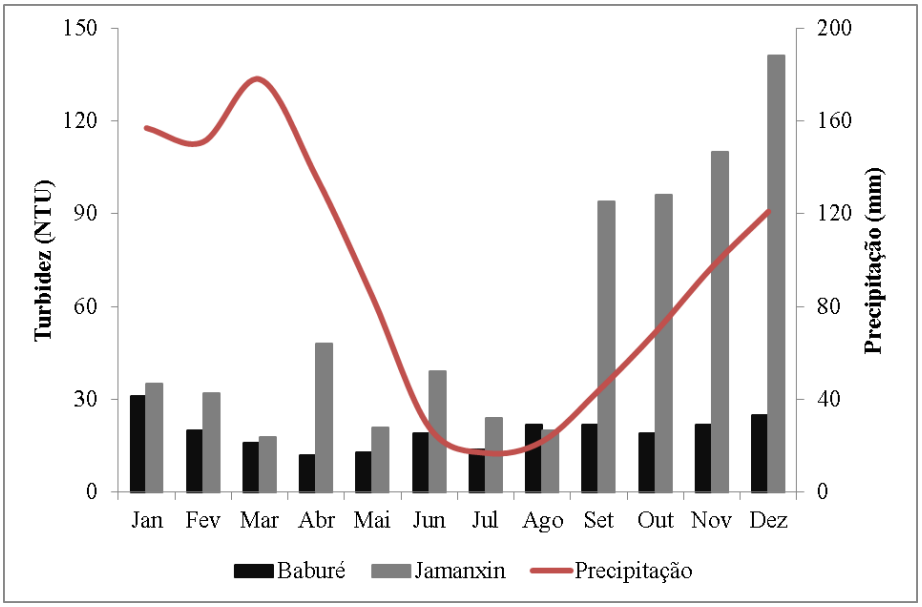


Figura 24: Dado mensal da turbidez em Baburé e Jamanxim

A concentração de sedimentos média anual nas estações BSM e Itaituba, no período de 2010 a 2024 (Figura 25), revelam padrões distintos de variação. Observa-se que ambas as séries temporais apresentam oscilações ao longo dos anos, com picos expressivos em períodos específicos, como 2012 em BSM e 2013 em Itaituba.

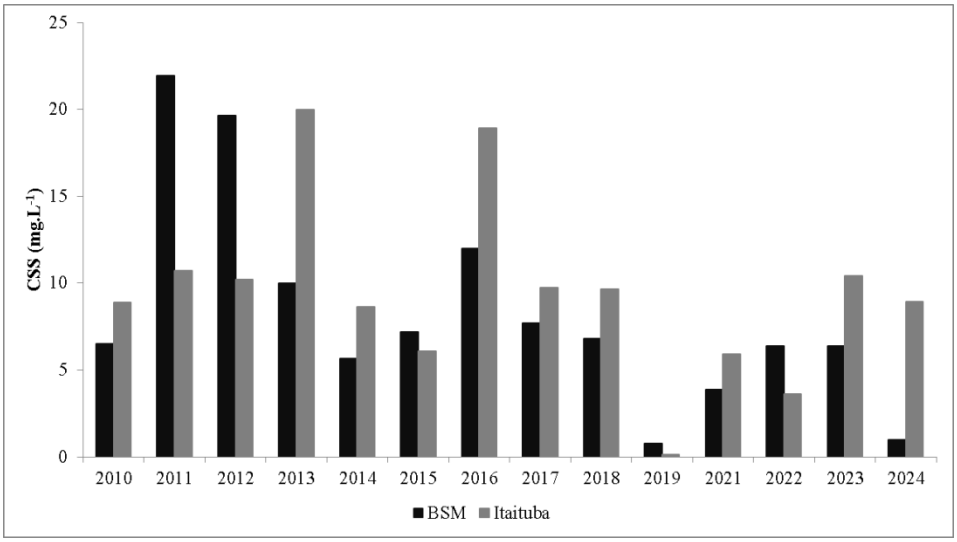


Figura 25: CSS Anual em BSM e Itaituba

Embora a relação entre os dados de CSS e a atividade garimpeira na região seja discutida, a limitação na frequência das coletas dificulta a realização de associações diretas. De acordo com os registros da Agência Nacional de Águas (ANA), a média anual de amostras de sedimentos para cada estação varia entre três e cinco coletas, um número reduzido para a caracterização adequada da variabilidade hidrossedimentológica. Essa baixa frequência de

amostragem pode comprometer a representatividade da média anual de CSS, levando à sub ou superestimativas, além de mascarar flutuações sazonais e eventos extremos de aporte sedimentar. Como apontado por Filizola (2009) deve-se considerar as limitações dos dados da ANA, dos quais incluem falhas nos procedimentos de amostragem em algumas estações, especialmente antes da década de 1980, além de incertezas nos métodos utilizados para calcular os fluxos de sedimentos em suspensão (TSS). A tabela abaixo demonsta a quantidade de amostras por ano analisada para o número de CSS média anual.

Tabela 3: Quantidade de amostras de sedimentos disponibilizadas pelas ANA em cada ano observado.

Código	Estação	Qtd de amostras por ano									
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
17430000	BSM	1	4	1	1	4	4	4	0	3	6
17730000	Itaituba	2	3	2	4	3	4	4	3	5	5

A Figura 26 apresenta a variação da CSS por ano nas estações BSM e Itaituba, no período de 2013 a 2022, juntamente com o incremento anual da atividade garimpeira na região segundo os dados do MapBiomas. A análise dos dados indica que, embora haja oscilações naturais na CSS ao longo dos anos, os picos de atividade garimpeira parecem coincidir com aumentos acentuados na concentração de sedimentos, sobretudo a partir de 2015, quando a extração mineral na Bacia do Tapajós se intensificou.

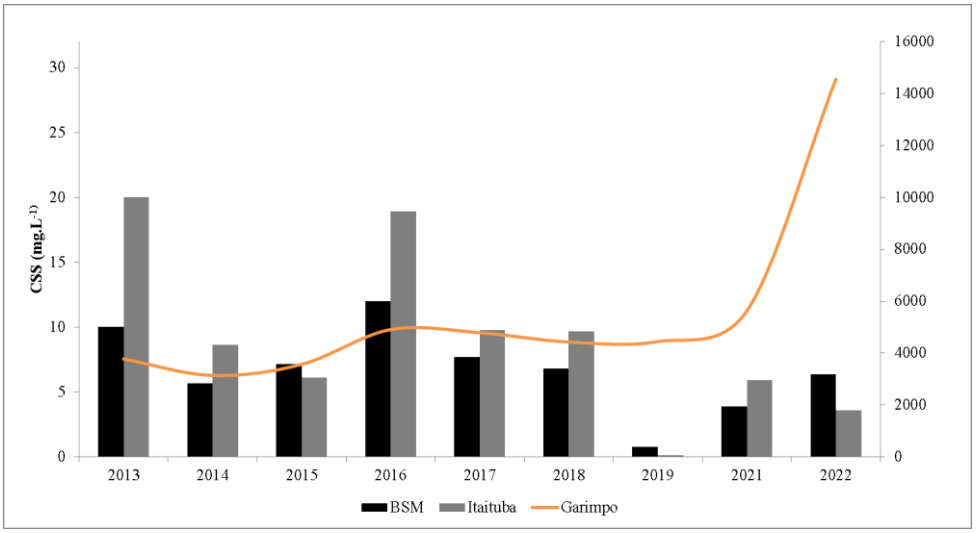


Figura 26: CSS média anual observada nas estações BSM e Itaituba e a taxa de incremento anual do garrimpo.

Ao integrar os dados do sensor MODIS à análise, é possível identificar padrões espaciais e temporais na CSS, evidenciando o impacto do garimpo. A relação entre o aumento da atividade garimpeira e a carga sedimentar é mais evidente quando se observam os pontos de montante e jusante das áreas de extração. Isso sugere que o garimpo contribui diretamente para o aporte de sedimentos no sistema fluvial.

A Figura 27 apresenta o fluxo médio mensal de sedimentos suspensos (Qs) nas estações BSM e Itaituba, expresso em toneladas por dia. Observa-se um comportamento com os maiores valores ocorrendo no primeiro trimestre do ano, seguidos de uma maior redução entre os meses de maio e agosto, e um leve aumento no final do ano.

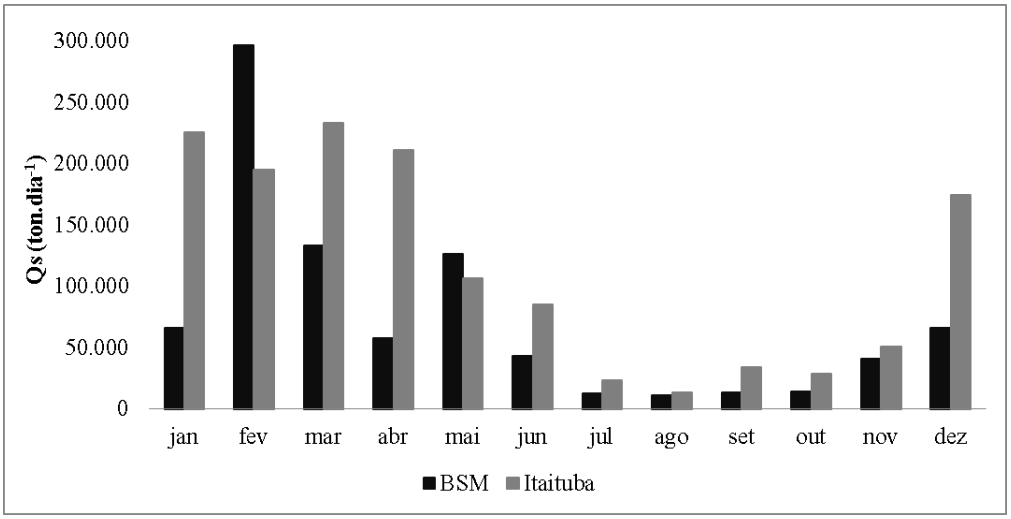


Figura 27: Fluxo mensal de descarga de sedimentos suspensos (Qs) em BSM e Itaituba.

A variação do Qs reflete a dinâmica hidrológica da bacia, fortemente influenciada pela atividade garimpeira. Contudo, ao integrar esses dados com as informações do sensor MODIS, nota-se que, além dos fatores naturais, há uma correlação entre os períodos de maior carga sedimentar e a atividade garimpeira intensificada na região. Durante os meses chuvosos, a maior disponibilidade de água favorece tanto o transporte natural de sedimentos quanto a mobilização de material oriundo das áreas de extração.

A Tabela 4 demonstra as estimativas do fluxo sólido suspenso (Qs) diário, anual e a produção específica (Qsp), observada na bacia com base nos dados da ANA, para as estações de BSM e Itaituba. O balanço do Qs médio anual do médio e baixo curso do rio Tapajós estimado para a região indica um fluxo sólido anual que pode variar de $2{,}36\times10^{6}$ ton.ano-¹ a $4{,}02\times10^{6}$ ton.ano-¹ de montante a jusante. A avaliação do Qs anual com base dados ficou próxima do Qs estimado por Filizola e Guyot (2009), que estimaram $5{,}28\text{x}10^{6}$ ton.ano-¹ na estação de Jatobá, também no rio Tapajós.

Tabela 4: Média do fluxo sólido suspenso (Qs) estimado nas estações de BSM e Itaituba.

Seção	Qs Médio (ton.dia $^{-1}$)	Qs Ano (ton.ano $^{-1}$)	Qsp (ton.ano $^{-1.}$ km^{2})
BSM	6.459	$2{,}36 \times 10^{6}$	7,08
ITAITUBA	11.026	$4{,}02\times10^{6}$	8,79

Os dados da Agência Nacional de Águas (ANA) oferecem uma visão do balanço de

sedimentos suspensos, fundamental para compreender a variabilidade temporal da carga sedimentar no rio Tapajós. No entanto, algumas séries apresentaram vazios e frequências de amostragem irregular, o que exige a integração com fontes orbitais para uma análise mais consistente da dinâmica sedimentar.

Para uma análise mais abrangete, é relevante comparar esses dados com os de outros rios que apresentam diferentes características geomorfológicas e níveis de impacto antrópico. No rio Madeira, por exemplo, o fluxo sólido anual é de aproximadamente 371×10^6 toneladas por ano (Filizola & Goyt, 2011). Em contraste, o rio Negro, conhecido por suas águas com baixa carga sedimentar, apresenta uma média anual de apenas 12×10^6 toneladas por ano (Filizola & Goyt, 2011). Já o rio Congo, um dos maiores sistemas fluviais do planeta, transfere para o oceano um volume de sedimentos da ordem de $33{,}66 \times 10^6$ ton.ano^{-1} (Silveira e Marinho, 2024), valor comparável ao de grandes rios tropicais.

De modo geral, a análise do fluxo de sedimentos suspensos no Rio Tapajós revela uma forte influência sazonal em seu afluente Jamanxim, ocasionado pela intensificação da atividade garimpeira. Os dados da ANA fornecem um panorama essencial da dinâmica sedimentar, mas a integração com informações de sensoriamento remoto, como os dados do sensor MODIS, permite uma avaliação mais detalhada das variações espaço-temporais. A comparação com outros grandes rios reforça a complexidade dos processos de transporte de sedimentos, evidenciando como fatores naturais e antrópicos interagem de maneira distinta em diferentes bacias hidrográficas.

4.3 O transporte do sedimento suspenso na Bacia do Tapajós com Sensoriamento Remoto

O monitoramento da CSS na Bacia do rio Tapajós é importante para a compreensão dos efeitos da variabilidade hidrossedimentar e das atividades antrópicas, como o garimpo sobre a dinâmica fluvial. Nesta seção, são apresentados os resultados da estimativa da CSS por meio de dados orbitais, utilizando imagens dos sensores MODIS e PlanetScope, com ênfase na variação espaço-temporal dos sedimentos em diferentes trechos do rio e na comparação entre os períodos de cheia e vazante. Desse modo, a análise buscou identificar padrões e intensificações associados a processos naturais e intervenções humanas, contribuindo para uma avaliação integrada da carga sedimentar ao longo da bacia. A figura 28 baixo apresenta a localização dos pontos analisados no sensor MODIS.

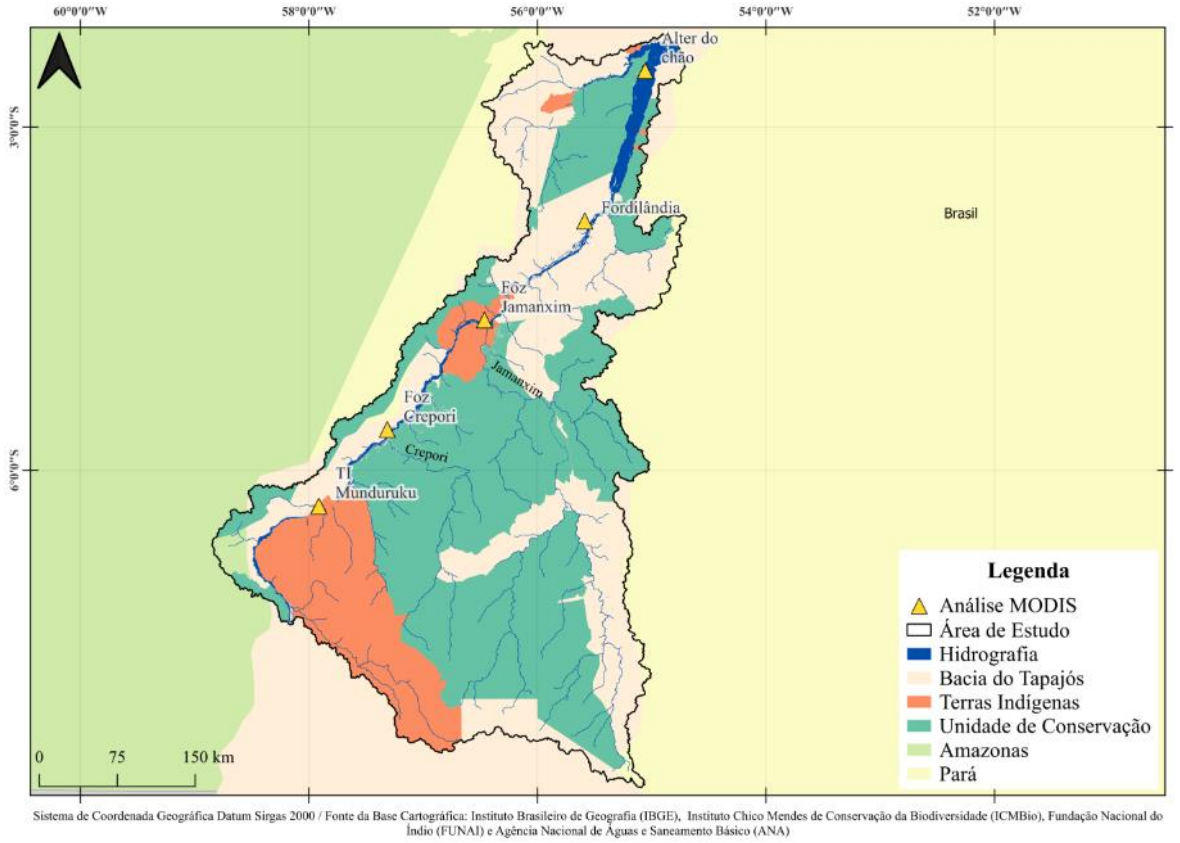


Figura 28: Localização dos pontos analisados com sensor MODIS.

4.3.1 Dados MODIS

A Figura 29 apresenta a CSS média anual estimada pelo sensor MODIS para diferentes trechos do rio Tapajós do período de 2012 a 2022. Ao longo desse intervalo de tempo foi possível observar o aumento gradual da CSS a partir de 2019, especialmente em seu baixo curso, próximo de Fordlândia e Alter do Chão.

A CSS média nos diferentes trechos foi de 20,28 $mg.L^{-1}$, com valores variando de 6,54 $mg.L^{-1}$, em Alter do Chão no ano de 2016, a 43,94 $mg.L^{-1}$, em Fordlândia, no ano de 2021. Observou-se aumento de 59% em Fordlândia no ano de 2020 em relação a 2019 e, posteriormente, 28% em 2021 em relação a 2020. Nesse contexto, é importante ressaltar que, no final de 2021 e começo de 2022, a região de Alter do Chão foi impactada com uma extensão pluma de sedimentos oriunda do médio curso do Tapajós (Diniz *et al*., 2021).

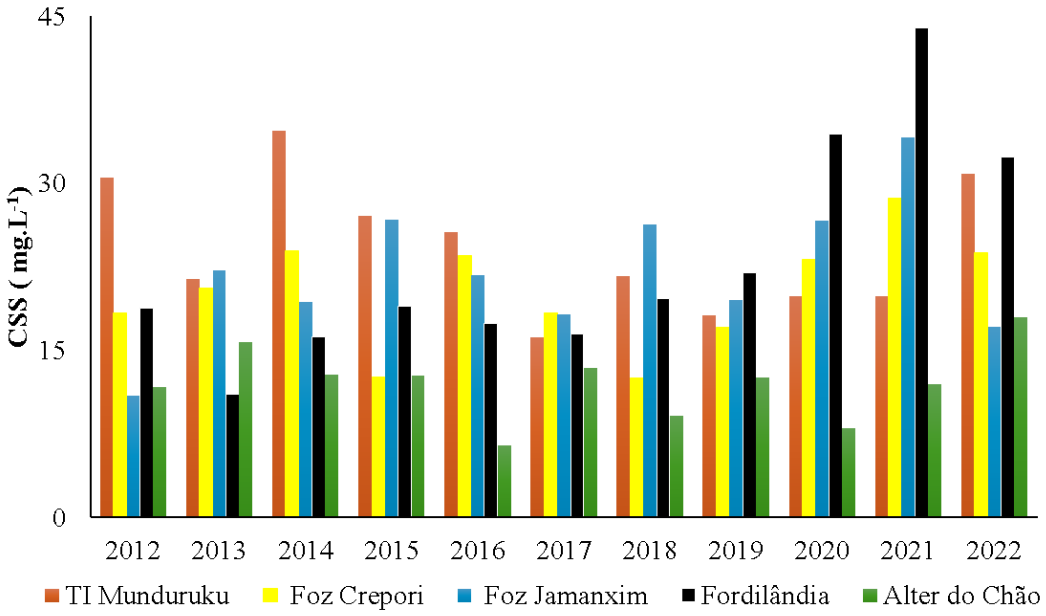


Figura 29: CSS média anual estimada pelo sensor MODIS para as estações virtuais do rio Tapajós.

Foi observado um aumento médio da CSS de montante (TI Munduruku) para jusante (Alter do Chão), o que pode indicar maior alcance do transporte de sedimentos, especialmente após as confluências do Tapajós com rios onde as atividades garimpeiras são intensas. O solo exposto pelo garimpo libera uma maior quantidade de partículas finas para o leito fluvial, que acabam aumentando a turbidez da água.

A Figura 30 apresenta a variabilidade média mensal da CSS, em que se destaca a relação inversa entre o nível do rio (cota) e a CSS. Em abril, o pico de CSS foi detectado na estação virtual perto da TI Munduruku, com um valor próximo de 50 $mg.L^{-1}$ e a cota do rio Tapajós em Itaituba está em torno de 800 cm. Nos meses de junho e julho, a CSS reduz para valores inferiores a 15 $mg.L^{-1}$ na maior parte das seções monitoradas. Essa relação inversa ocorre porque, à medida que o volume de água do rio Tapajós aumenta, há uma diluição na concentração de sedimentos. Por outro lado, nos meses de águas baixas, nota-se aumento da CSS em relação à cheia.

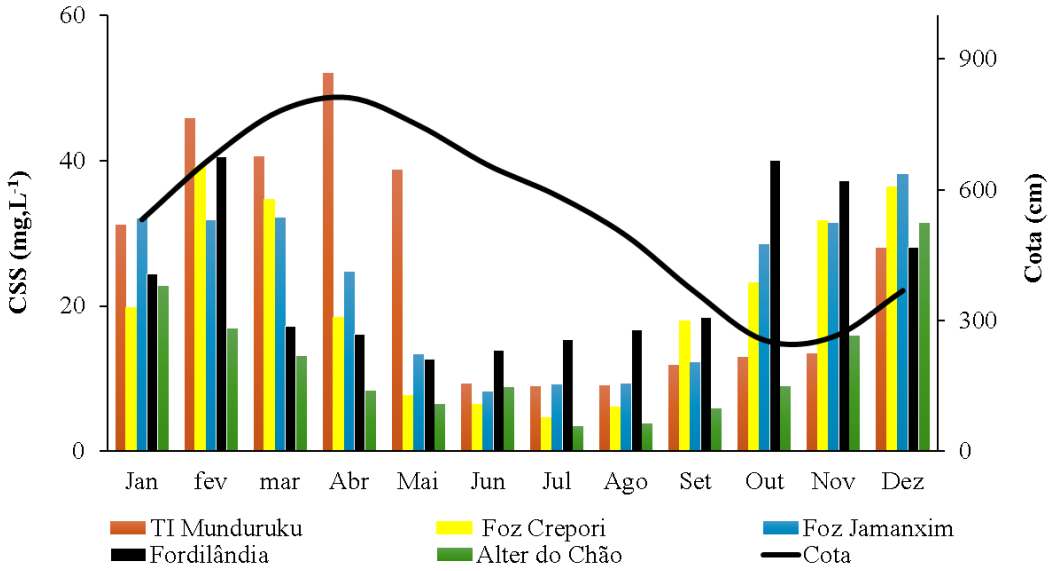


Figura 30: Variabilidade média mensal da CSS estimada pelo sensor MODIS e da cota média mensal do rio Tapajós em Itaituba.

Essa tendência inversa entre nível e CSS se repete nos meses de outubro a dezembro, nos quais, à medida que o nível do rio diminui, a CSS aumenta. Em dezembro, quando a cota do Tapajós em Itaituba está em torno de 400 cm, as concentrações de sedimentos voltam a aumentar, com valores estimados em torno de 40 $mg.L^{-1}$ em Alter do Chão e Fordlândia. A análise dos dados aponta que a dinâmica hidrossedimentar do rio Tapajós pode ser influenciada tanto pela variabilidade da precipitação, que controla a variação dos níveis, quanto pelas mudanças no uso e cobertura da terra, como a área de garimpo.

Ademais, observou-se que a atividade de garimpo nos tributários pode influenciar o regime hidrossedimentar do Tapajós pelo aumento significativo da CSS observado no período analisado, no trecho de montante (TI Munduruku) a jusante (Alter do Chão). Esse impacto é mais acentuado próximo de Fordlândia, cerca de 170 km da foz, onde os efeitos da atividade garimpeira pode ser claramente detectados devido à contribuição de sedimentos provenientes do rio Jamanxim (Figura 31).

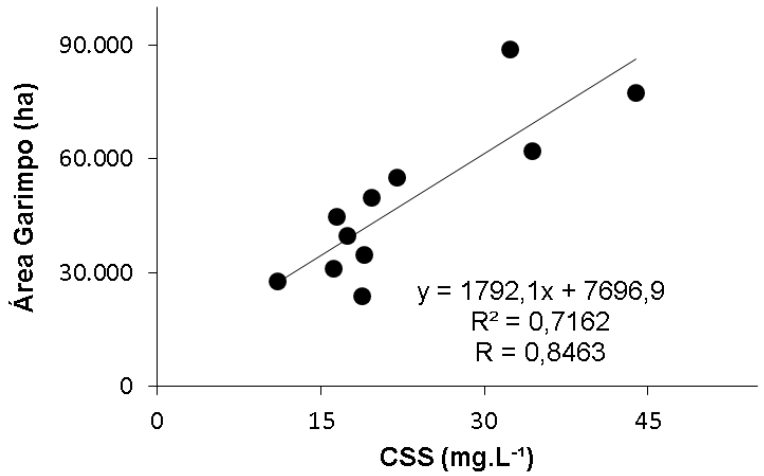


Figura 31: Relação entre área de garimpo e a CSS do rio Tapajós em Fordlândia.

O coeficiente de correlação de Pearson para o ponto de Fordlândia (0,84) e o coeficiente de determinação (R^2 = 0,71) indicam uma relação positiva entre a expansão da área de garimpo e a concentração de sedimentos suspensos (CSS) na Bacia do Tapajós. Esses valores reforçam que a CSS observada em Fordlândia pode ser um sinal do aumento da turbidez pela atividade garimpeira na região.

No trecho do rio Tapajós próximo à Terra Indígena Munduruku e a montante dos rios Crepori e Jamanxim (Figura 32), o coeficiente de correlação de Pearson (-0,2106) e o R^2 (0,0444) indicam uma relação fraca e negativa entre a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e a área de garimpo. Isso sugere que, nessa região, o garimpo não tem influência na dinâmica hidrossedimentar nesse trecho da bacia.

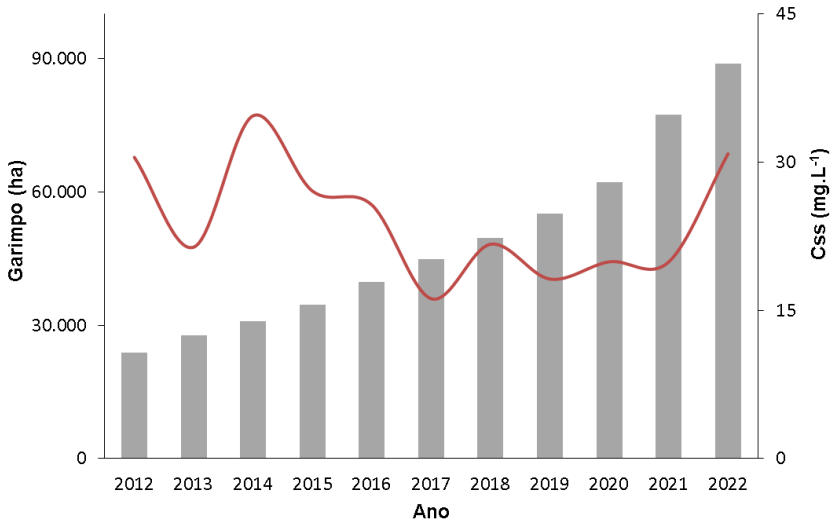
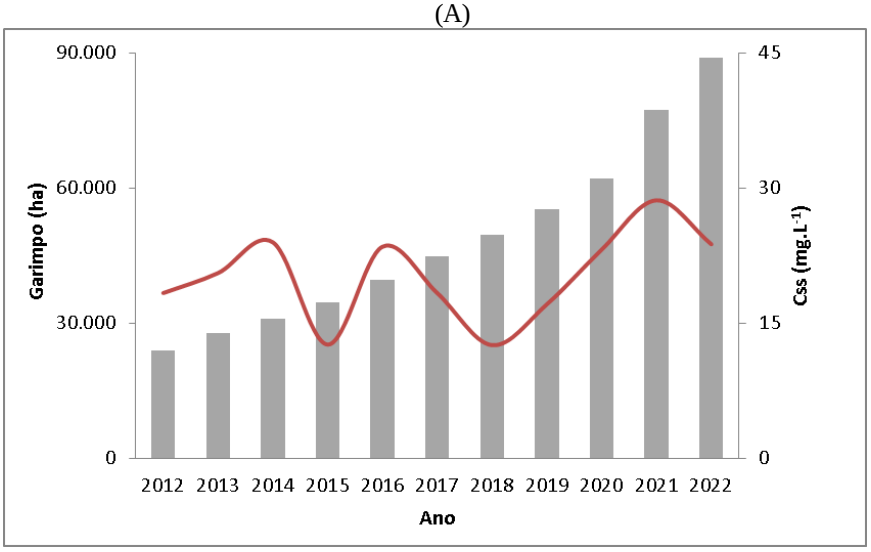


Figura 32: Variabilidade média anual da área de garimpo (barras) e a da CSS (linha) do rio Tapajós próximo da Terra indígena Munduruku.

No médio curso do Tapajós, a influência da atividade garimpeira é mais intensa nos rios Crepori e o Jamanxim. A relação da área de garimpo com a CSS do Tapajós observada após a foz do rio Jamanxim mostrou coeficiente de correlação de Pearson (0,36) e o R^2 (0,13), que representa relação positiva moderada entre as variáveis (Figura 33 A e B). Após a foz do rio Crepori, a jusante, esses valores são maiores, com Pearson de 0,43 e R^2 de 0,18.

(A)



(B)

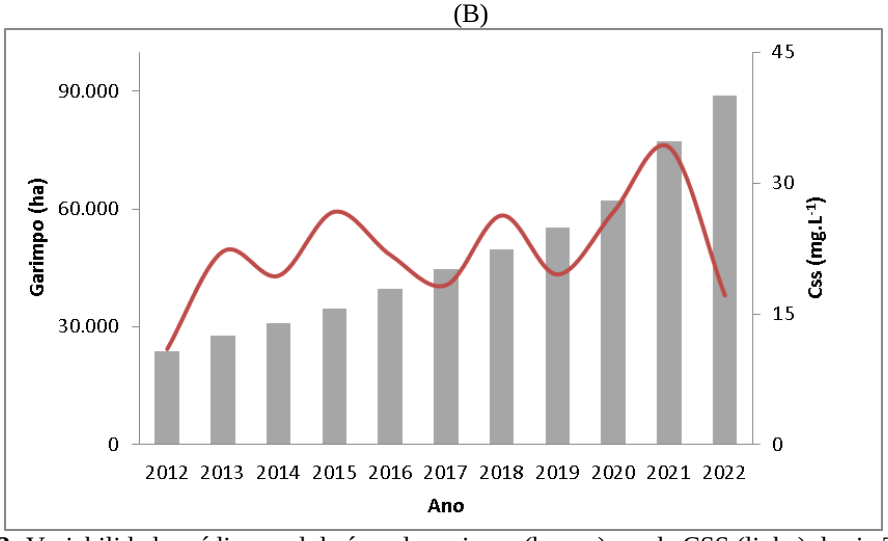


Figura 33: Variabilidade média anual da área de garimpo (barras) e a da CSS (linha) do rio Tapajós a jusante da foz do Crepori (A) e da foz do Jamanxim (B).

Próximo a Alter do Chão, no baixo curso do rio Tapajós (Figura 34), observa-se uma redução na relação entre a CSS e a área de garimpo. Essa diminuição pode ser relacionada à diluição dos sedimentos na região, onde o fluxo do Tapajós é barrado pelo rio Amazonas, possibilitando a deposição de sedimentos devido à velocidade menor do rio.

Os valores do coeficiente de correlação de Pearson (0,19) e do coeficiente de determinação (R^2 = 0,18) indicam uma relação fraca, sugerindo que, nesse trecho, os impactos

diretos do garimpo sobre a CSS são menos evidentes. Esses resultados destacam a importância de considerar as características hidrodinâmicas locais e os processos de mistura fluvial para entender a dinâmica sedimentar ao longo do rio Tapajós.

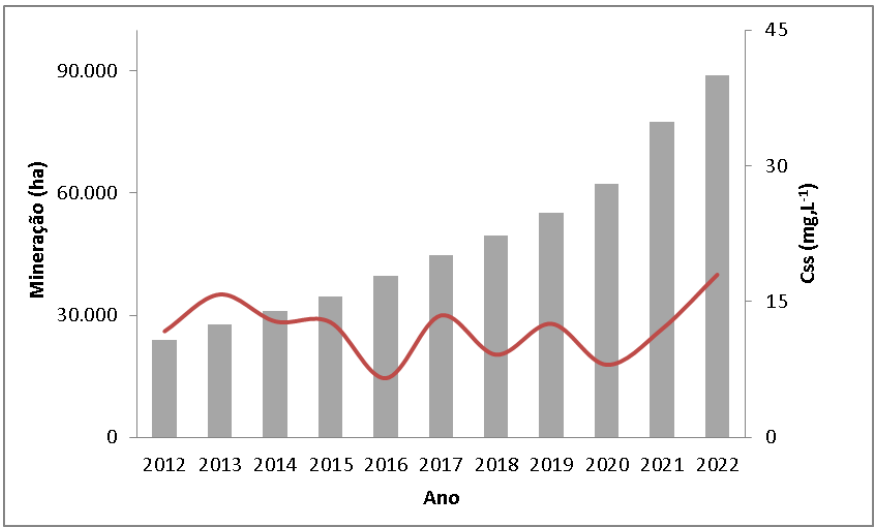


Figura 34: Variabilidade média anual da área de garimpo (barras) e a da CSS (linha) do rio Tapajós em Alter do Chão.

A análise dos dados de concentração de sedimentos suspensos no Rio Tapajós entre 2012 e 2022 revela uma tendência crescente de aumento da turbidez da água, especialmente a partir de 2017, com elevadas concentrações detectadas pelo sensor MODIS próximo de Fordlândia. A correlação positiva entre a área de expansão do garimpo e a concentração de sedimentos suspenso do rio Tapajós é clara, sendo mais pronunciada na transição do médio para o baixo curso, devido à contribuição de sedimentos de afluentes da margem direita. A influência do garimpo nos processos de transporte de sedimento é especialmente visível na região do médio curso, como no rio Jamanxim, enquanto a jusante, a diluição dos sedimentos diminui os efeitos da atividade garimpeira, como ocorre em Alter do Chão.

Além disso, a análise sazonal mostra a interação entre a cota do rio e a concentração de sedimentos, com picos da concentração durante o período de águas baixas. Os resultados indicam que, apesar da sua variabilidade natural, a atividade de garimpo aluvial mostra impactos significativos em processos hidrossedimentares do Tapajós.

Os coeficientes de correlação de Pearson, na Figura 35, demonstram uma correlaçação positiva moderada, variando de 0,36 a 0,87, entre área de garimpo e CSS com os dados do MODIS nas estações Fordlândia, Foz do Jamanxim e Foz do Crepori. Em contrapartida, a área de garimpo, a taxa de incremento do garimpo em relação aos registros de CSS da estação da ANA em BSM apresentaram correlação negativa. A precipitação média anual apresentou relações estatísticas moderada, indicando influencia da chuva na dinâmica hidrossedimentar.

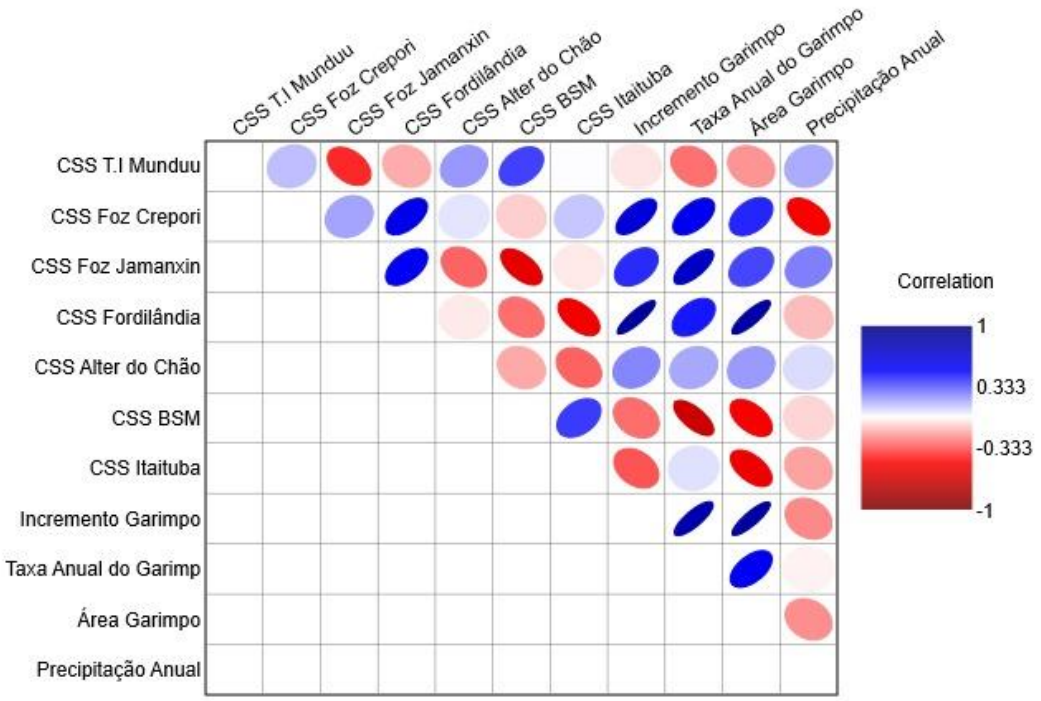


Figura 35: Correlograma entre a CSS estimada com dados MODIS em diferentes trechos do Rio Tapajós, acumulado de chuva anual e garimpo. Círculos azuis representam correlações positivas e vermelhas, negativas; a intensidade da cor e o formato elíptico indicam a magnitude do coeficiente.

4.3.2 Imagens PlanetScope

Para compreender a dinâmica hidrossedimentar no rio Tapajós durante o período analisado em maior resolução espacial, foram utilizados dados de CSS extraídos de imagens PlanetScope. A análise foi conduzida com base em estatísticas descritivas, considerando valores médios, mínimos e máximos de CSS em diferentes quadrantes do rio. Essa abordagem permitiu observar variações espaço-temporais da concentração de sedimentos, contribuindo para uma avaliação mais detalhada dos padrões de transporte e deposição de sedimentos em trechos estratégicos da Bacia do Tapajós.

Em Jacareacanga, o trecho a montante demostrou entre maio e outubro de 2021 valores médios entre 3,0 $mg.L^{-1}$ e 3,6 $mg.L^{-1}$ (Figura 36). Valores permanecem abaixo da média de 10 $mg.L^{-1}$ registrada nas estações de monitoramento do Projeto HYBAM para o rio Tapajós, refletindo o padrão esperado para áreas a montante da bacia, onde a influência antrópica e a carga de sedimentos são menores.

Os valores estão de acordo com os definidos por Lobo *et al*., (2016) entre os anos de 1973 e 2012, onde observou, para a mesma região, uma variação da CSS na região de jacareaganga entre 5-10 $mg.L^{-1}$. Ainda, em regiões do tapajós que apresentam essa quantidade de CSS, zona eufótica é relativamente profunda, chegando a ~6 m e varindo para ~1 m nos

tributários que apresentam mais de 100 mg.L^{-1} (Lobo *et al.*, 2017). Nesse sentido, ainda é necessário verificar qual seria o efeito dessa variação na composição dos fitoplânctons, segundo o autor.

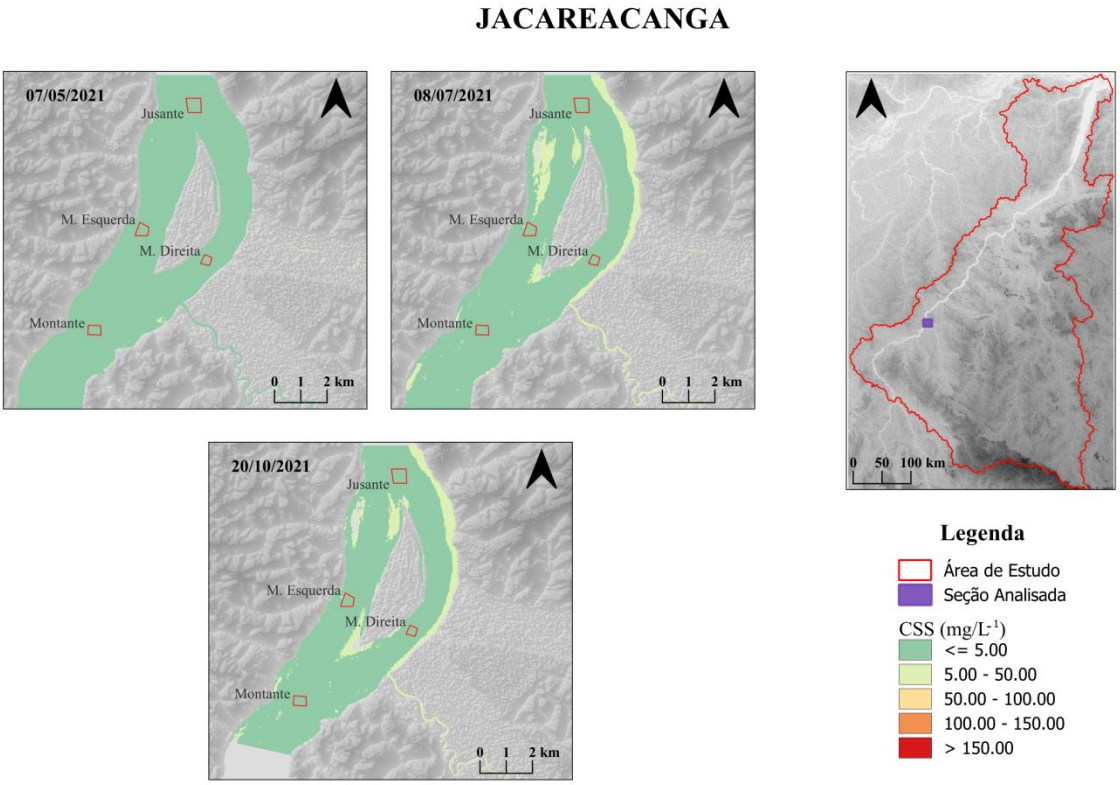


Figura 36: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho e novembro de 2021 em Jacareacanga.

Além da análise desse trecho, foram obtidos dados para outros três trechos em Jacareacanga: margem direita, margem esquerda e jusante (Figura 37). A distribuição dos valores médios nesses pontos, representada no gráfico de variação espaço-temporal, evidencia que a concentração de sedimentos se mantém relativamente homogênea nos trechos analisados, com pequenas variações entre as margens e montante a jusante. Essa uniformidade reforça o padrão observado na estação do HYBAM para o rio Tapajós, que registra uma média de cerca de 10 mg.L^{-1}. Isso indica que, apesar das variações locais e sazonais, a dinâmica sedimentar da região permanece dentro dos parâmetros esperados para áreas de cabeceira da bacia.

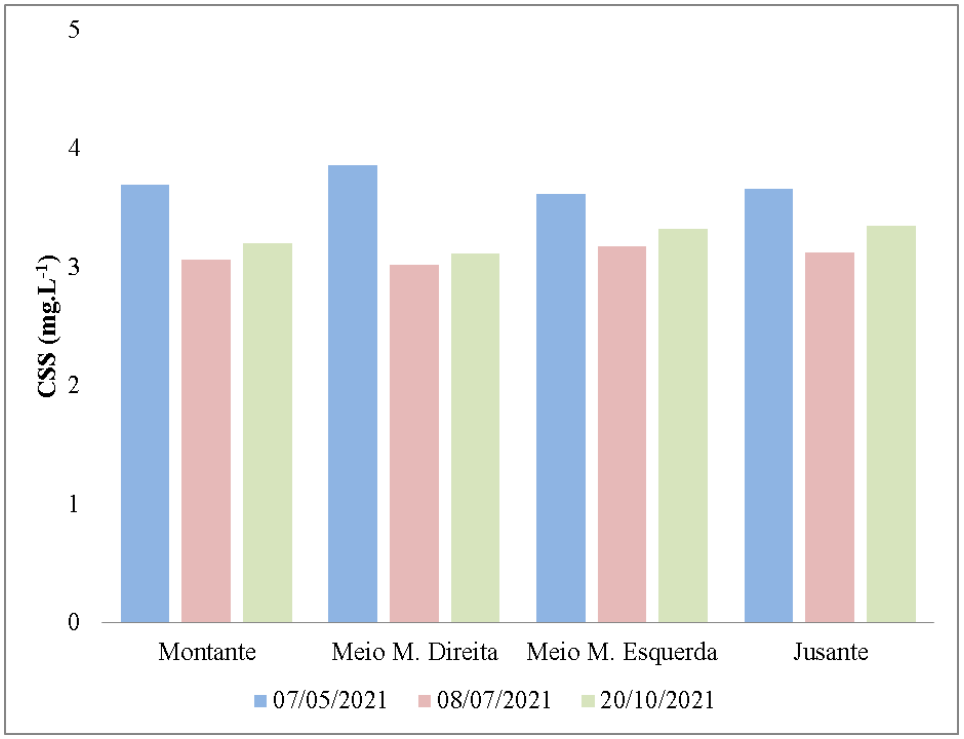


Figura 37: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes analisados.

Em direção à foz do Tapajós, aproximadamente a 87 km jusante da foz do Rio Crepori, foi observado atuação da zona de mistura de sedimentos, conforme a identificação da pluma sedimentar visível na Figura 38, entre a margem direita do rio. Telmer & Stapper (2007) também identificaram uma pluma de sedimentos no Tapajós oriunda do garimpo no rio Crepori, atuando em até 50 km de distância da confluência dos rios. Esses pesquisadores observaram também fluxos anuais de Mercúrio (Hg) de 666 kg e 518 kg na mesma região em amostras de água coletadas a jusante dos tributários Creporizão e Marupá, totalizando 1,2 toneladas.

A média da CSS nesse ponto variou de 10,85 $mg.L^{-1}$ na margem esquerda, em 28/07/2021, chegando a 35,41 $mg.L^{-1}$ na mesma data analisada, um aumento aproximado de 226,4% de uma margem a outra. Também ocorreu variação nas concentrações observadas em 31/10/2021, quando a margem esquerda apresentou valores de 15,73 $mg.L^{-1}$, enquanto e a margem direita chegou em 46,91 $mg.L^{-1}$, apresentando uma amplitude de 31,18 $mg.L^{-1}$. Isso se dá por conta dos maiores afluentes com atividade garimpeira recente estarem na margem direita.

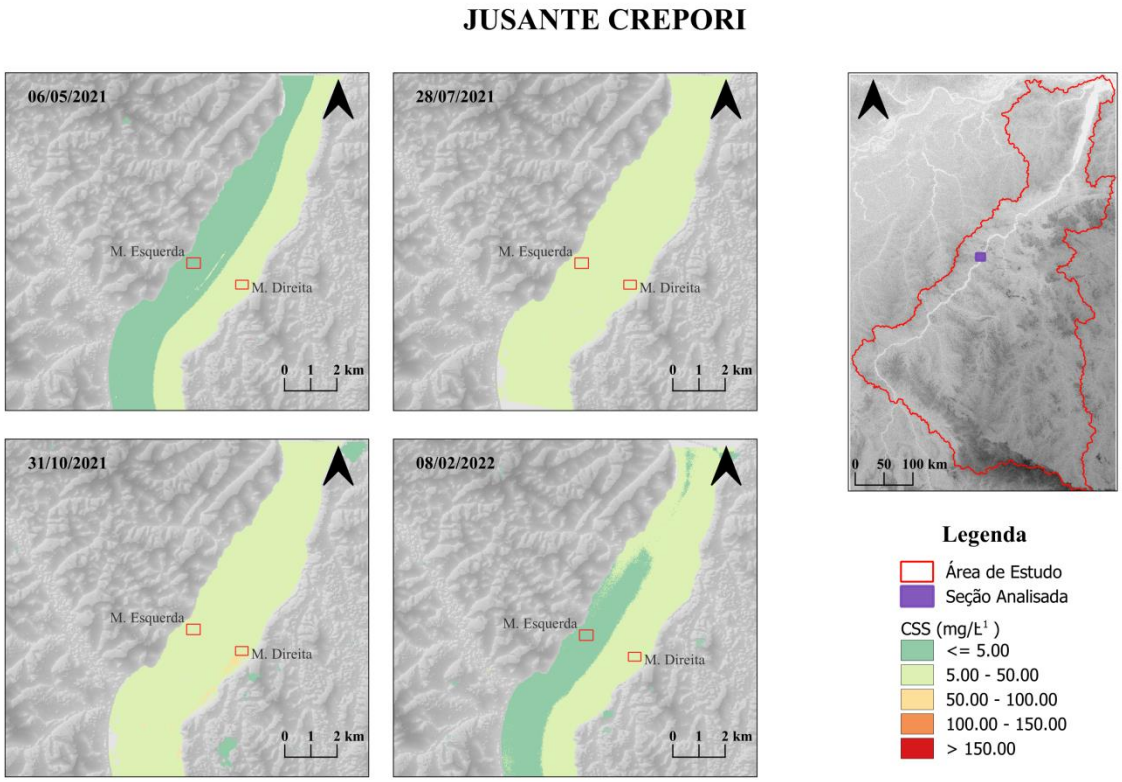


Figura 38: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho e novembro de 2021 e fevereiro de 2022 a 87 km a jusante da foz do Rio Crepori.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os de Lobo *et al.* (2015) para o Rio Crepori, localizado a montante e distante cerca de 87 km do ponto de análise atual, verifica-se um padrão semelhante na variação sazonal das concentrações de sedimentos suspensos (CSS). Os autores identificaram concentrações de 35,3 $mg.L^{-1}$ em período de águas altas, com aumento expressivo para 115,2 $mg.L^{-1}$ em águas baixas, representando uma elevação de aproximadamente 227%. No trecho analisado do Rio Tapajós neste estudo, as concentrações médias observadas foram de 7,27 $mg.L^{-1}$ em maio (águas altas), aumentando para 31,32 $mg.L^{-1}$ em outubro (águas baixas), o que indica um crescimento em torno de 330%. Esses dados reforçam a influência das atividades garimpeiras sobre a dinâmica sedimentar do rio, mesmo em áreas situadas significativamente a jusante das principais zonas de extração (Figura 39).

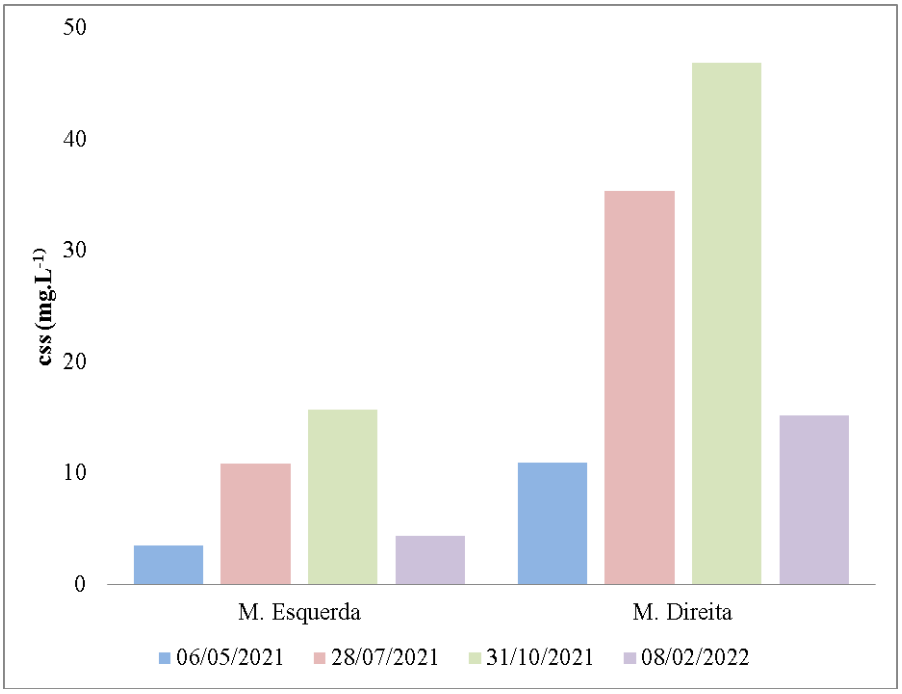


Figura 39: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes a jusante do Rio Crepori.

Essas variações temporais de CSS são importantes para entender o impacto das condições ambientais, incluindo as variações sazonais, e os efeitos das atividades humanas sobre o transporte de sedimentos na bacia. Lobo *et al*. (2015) identificaram que a pluma sedimentar gerada pelo garimpo se estende por grandes distâncias, com valores de TSS atingindo 45 $mg.L^{-1}$ até 100 km a jusante do ponto de origem. Esse comportamento foi observado também no Rio Crepori, onde as concentrações de TSS se mantiveram elevadas em áreas a jusante de pontos de intensa atividade mineradora, corroborando a relação entre o garimpo e a dinâmica de sedimentação no rio.

Os valores de CSS no rio Tapajós, na região da confluência com a foz do Jamanxim (Figura 40), indicam que a montante as concentrações permanecem estáveis, sobretudo no mês de maio, com média em torno de 10 $mg.L^{-1}$, o que também foi observado nos dados de turbidez (ver seção 5.2), nos quais a estação de Baburé apresentou-se estável ao longo dos meses, variando de 12 NTU (abril) a 25 NTU (dezembro), em contrapaposição com o observado na estação de Jamanxim. Ademais, conforme a análise das imagens de setembro, o rio Jamanxim apresentou valores superiores a 150 $mg.L^{-1}$, evidenciando um aumento no aporte de sedimentos.

Foi observado que a pluma de sedimentos se apresenta próxima da margem direita, com uma média de 103 $mg.L^{-1}$ no Jamanxim e 51 $mg.L^{-1}$ no Tapajós pós confluência (Figura 40). Esses valores apresentam aumento de 101,96% no valor médio da CSS para a data de 31/07/2021. Quando o período de águas baixas chegou próximo do seu estágio máximo, a

CSS no Jamanxim alcançou 178 mg.L^{-1} para a data de 17/09/2021, marcando o rio Tapajós com uma média de 83 mg.L^{-1} para o mesmo período em sua margem direita. Além disso, observa-se claramente a dispersão lateral da pluma de sedimentos, que se dilue progressivamente conforme avança pelo leito principal.

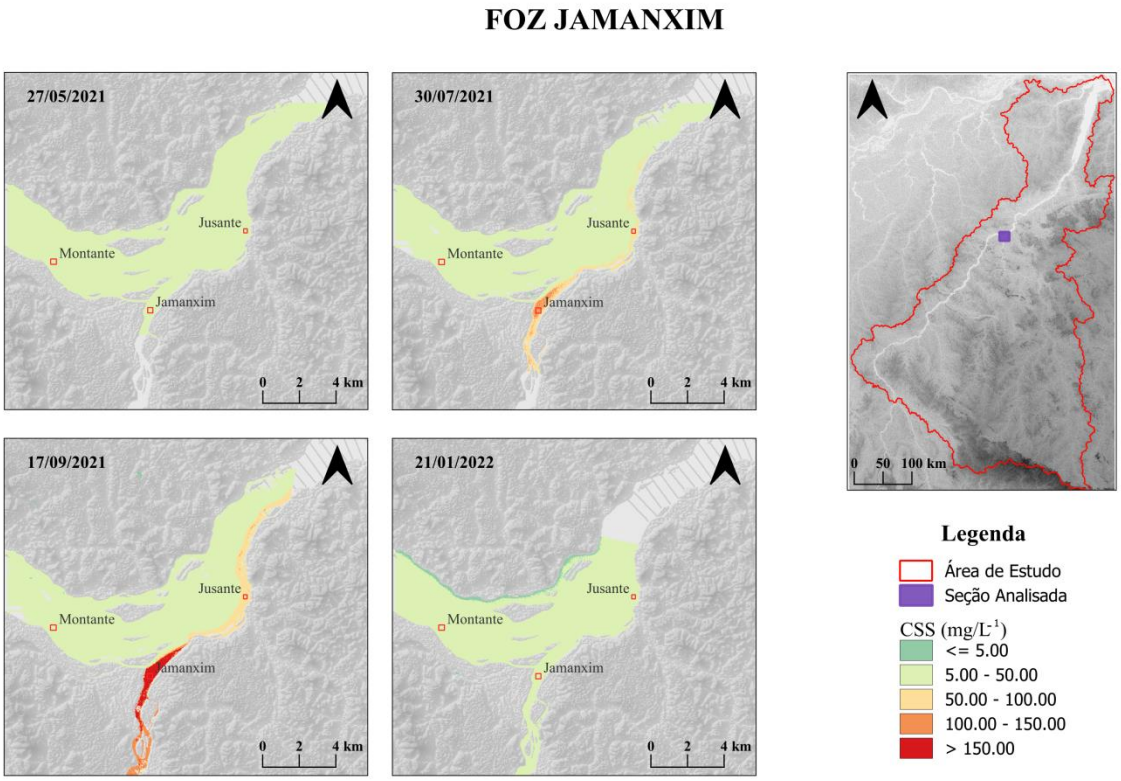


Figura 40: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho e outubro de 2021 e janeiro de 2022 na foz do Jamanxim.

Lobo et al., (2016) analisando dados entre 1973 e 2012 observaram que a corrida do ouro na época influenciou a CSS nas bacias dos rios Novo e Tocantins e que os valores máximos encontrados, nesse mesmo período, para o rio Jamanxin, foi de 120 mg.L^{-1} com contribuição para o Tapajós em torno de 20 a 50 mg.L^{-1}. Entretando, no presente estudo, que considera dados de 2021, foi estimada concentrações maiores que 170 mg.L^{-1} e contribuição de sedimentos maior que 80 mg.L^{-1}.na margem direita do tapajós. Esse resultado demonstra, mesmo que pontualmente, uma variabilidade considerável, no aporte de sedimentos dos canais.

Os dados de CSS da foz do rio Jamanxim ao longo do período analisado indica que em 27/05/2021, os valores médios nas três seções foram relativamente baixos a montante (7,5 mg.L^{-1}), jusante (15,5 mg.L^{-1}) e no rio Jamanxim (16,1 mg.L^{-1}). Já no mês de julho de 2021, observou-se um aumento no trecho do Jamanxim, que atingiu o valor de 103, mg.L^{-1}, aumento

de 539% na média em relação a maio. Posteriormente, o valor mais expressivo foi registrado na data de 17/09/2021, quando o Jamanxim apresentou 178 mg.L^{-1}, representando um aumento de 77% em comparação a julho. Por fim, em 21/01/2022, os valores voltaram a cair, com CSS no Jamanxim reduzido para 11,6 mg.L^{-1}, uma queda de 94% em relação ao pico de setembro (Figura 41).

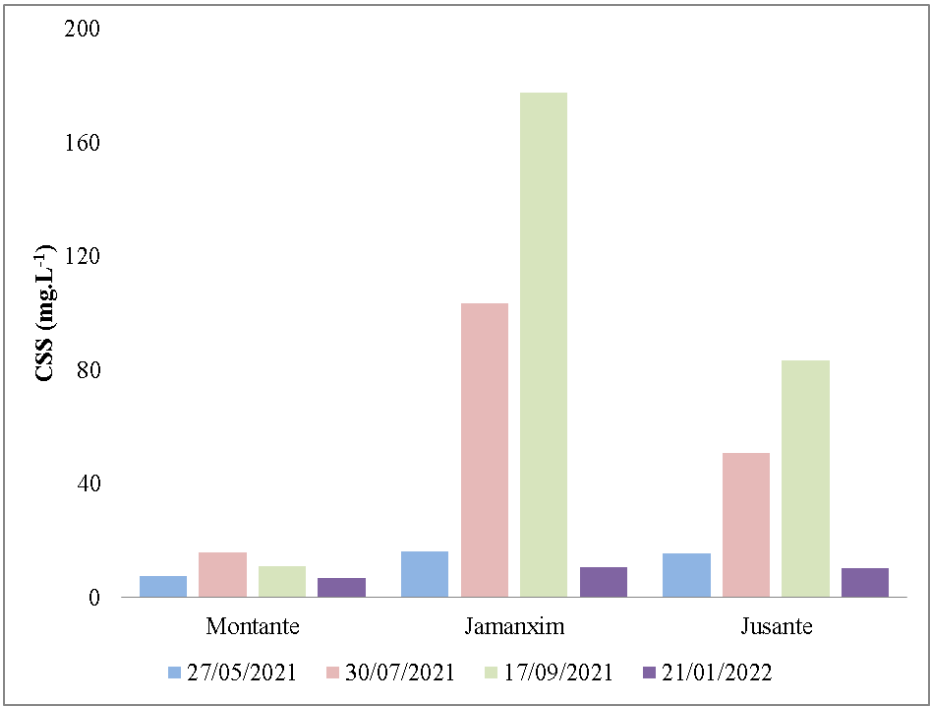


Figura 41: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes da foz do Jamanxim.

Já próximo à foz do rio Tapajós, na região de Alter do Chão, a CSS demonstou um padrão de estabilidade na maioria dos trechos analisados ao longo de 2021 e 2022, com valores médios variando entre 3,38 mg.L^{-1} e 5,94 mg.L^{-1}, com picos mais baixos observados durante os meses de maior descarga líquida. As análises observadas em 27/05/2021, 25/07/2021 e 08/09/2021, por exemplo, apresentaram valores médios entre 3,52 mg.L^{-1} e 3,83 mg.L^{-1} na margem direita e 3,29 mg.L^{-1} a 3,55 mg.L^{-1} no meio do canal, sugerindo estabilidade nas concentrações ao longo do ano (Figura 42).

A não observação dos efeitos do garimpo na região da foz do Tapajós pode estar relacionada com a necessidade de observações mais frequentes para essa região, considerando que esta é uma região mais afastada das atividades e, portanto, menos sensível as modificações rápidas. Com isso, é necessário avaliar de maneira mais frequente os dados desta localidade, para a definição do padrão de comportamento da CSS e da sua relação com a atividade garimpeira que ocorre a montante. Lembrando que, em janeiro de 2022 uma expressiva pluam de sedimentos foi observada nas águas de Alter do Chão.

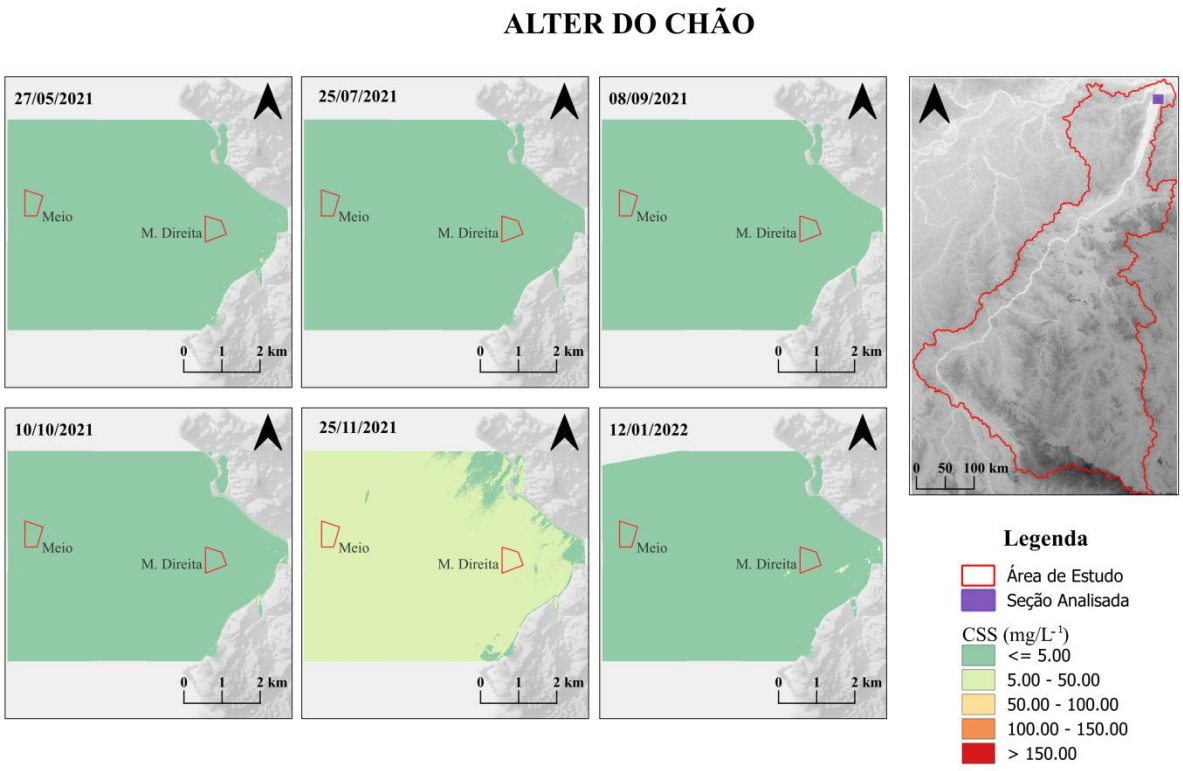


Figura 42: Variabilidade espacial e temporal da CSS nos meses de maio, julho, setembro, outubro, novembro de 2021 e janeiro de 2022 no rio Tapajós, na margem direita em alter do chão.

Em 25/11/2021, foi observado um aumento nas concentrações médias de sedimentos suspensos, com 5,94 $mg.L^{-1}$ na margem direita e 7,82 $mg.L^{-1}$ no meio do canal, o que representa uma concentração 31,65% maior no meio em relação à margem direita (Figura 43). Embora não seja possível atribuir diretamente esse aumento às atividades ocorridas a montante, é provável que os picos sedimentares registrados antes, possivelmente em outubro, tenham influenciado esses valores, considerando o tempo necessário para o deslocamento dos sedimentos até Alter do Chão. Posteriormente, em 12/01/2022, ocorreu uma redução das médias para 4,19 $mg.L^{-1}$ na margem direita e 3,45 $mg.L^{-1}$ no meio, representando diminuições de aproximadamente 29,46% e 55,88%, respectivamente. Essa redução sugere que o aumento de sedimentação no final de 2021 reflete eventos sedimentares ocorridos meses antes, em específico, nas regiões mais altas da bacia próximas aos afluentes impactados pelo garimpo, como os rios Jamanxim e Crepori.

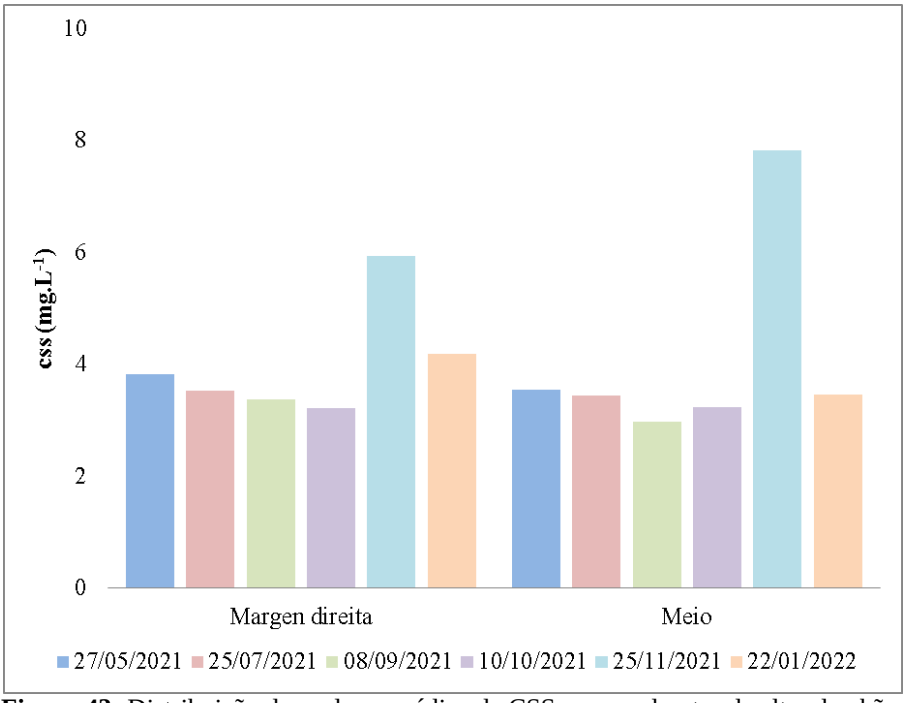


Figura 43: Distribuição dos valores médios de CSS nos quadrantes de alter do chão.

Esse comportamento está de acordo com a dinâmica fluvial observada em outras bacias da Amazônia, onde o transporte de sedimentos leva tempo para se manifestar em pontos distantes do local de origem. A estabilidade observada nas primeiras medições de 2021 reflete uma condição de base, enquanto os picos mais elevados no final do ano indicam a influência de eventos antrópicos ou mudanças nas condições hídricas e sedimentares a montante.

Em 17 e 18 de junho de 2024, durante coleta de dados em campo na foz do Rio Tapajós, observou-se CSS de 3,72 $mg.L^{-1}$ e 4,67 $mg.L^{-1}$, respectivamente, para a mesma região observada na imagem de satélite. Tais valores estão de acordo com o observado nas imagens e, ao comparará-los (aproximadamente 4,20 $mg.L^{-1}$), a diferença entre a média desses valores e a observada entre os dois trechos em julho de 2021 – mesmo período hidrológico, apesar de datas distintas – é de 3,47 $mg.L^{-1}$ (-17%).

Os impactos do garimpo nos sedimentos podem estar relacionados também aos valores de Hg encontrados na região. Em muitas discussões sobre garimpo de ouro, é comum supor que o principal problema é o Hg derivado do processo de amalgamação. Porém, Telmer *et al.* (2006) afirmam que o maior responsável pelas altas concentrações de Hg dissolvido ou em suspensão não é esse elemento recém-adicionado, mas sim o sedimento antigo que o garimpo ressuspende. Assim, o garimpo não apenas acrescenta Hg novo ao ambiente, mas, sobretudo, coloca de volta em movimento o mercúrio que já estava naturalmente no solo, expondo-o novamente à corrente, aos peixes e às cadeias alimentares.

4.4 Impactos do Garimpo na morfologia fluvial de tributários do rio Tapajós

Em uma seção localizada em um afluente da margem esquerda do rio Cabitu, um tributario do alto curso do Tapajos e situado no interior da Terra Indígena Munduruku, a análise morfológica planar mostrou alterações expressivas nos canais fluviais atribuídas à atividade garimpeira ilegal. Por meio de classificação supervisionada de imagens Sentinel-2 de julho de 2019 e junho de 2024, estimou-se que a área de solo exposto nas margens aumentou de cerca de 27 ha para 117 ha no intervalo de cinco anos (Figura 44). Esse acréscimo de 90 ha corresponde a um incremento aproximado de 333%, demonstrando a ação rápida da expansão das frentes de garimpo atuantes na região.

À luz de outros trabalhos em rios tropicais que relacionam desmatamento por garimpo e alteração no fluxo de sedimentos, vale destacar o estudo de Gallay *et al*. (2018). Ao analisarem os rios Maroni e Oyapock, no Escudo das Guianas, os autores demonstraram que o garimpo começa a elevar de forma detectável a CSS e a turbidez da água quando o desmatamento associado ultrapassa, aproximadamente, 0,1% da área da bacia. No trecho médio-baixo do Tapajós, a superfície garimpada já correspondia, em 2022, a aproximadamente 0,55% da bacia, o que dá um valor de mais de 5,5x ao estipulado por Gallay *et al* (2018).

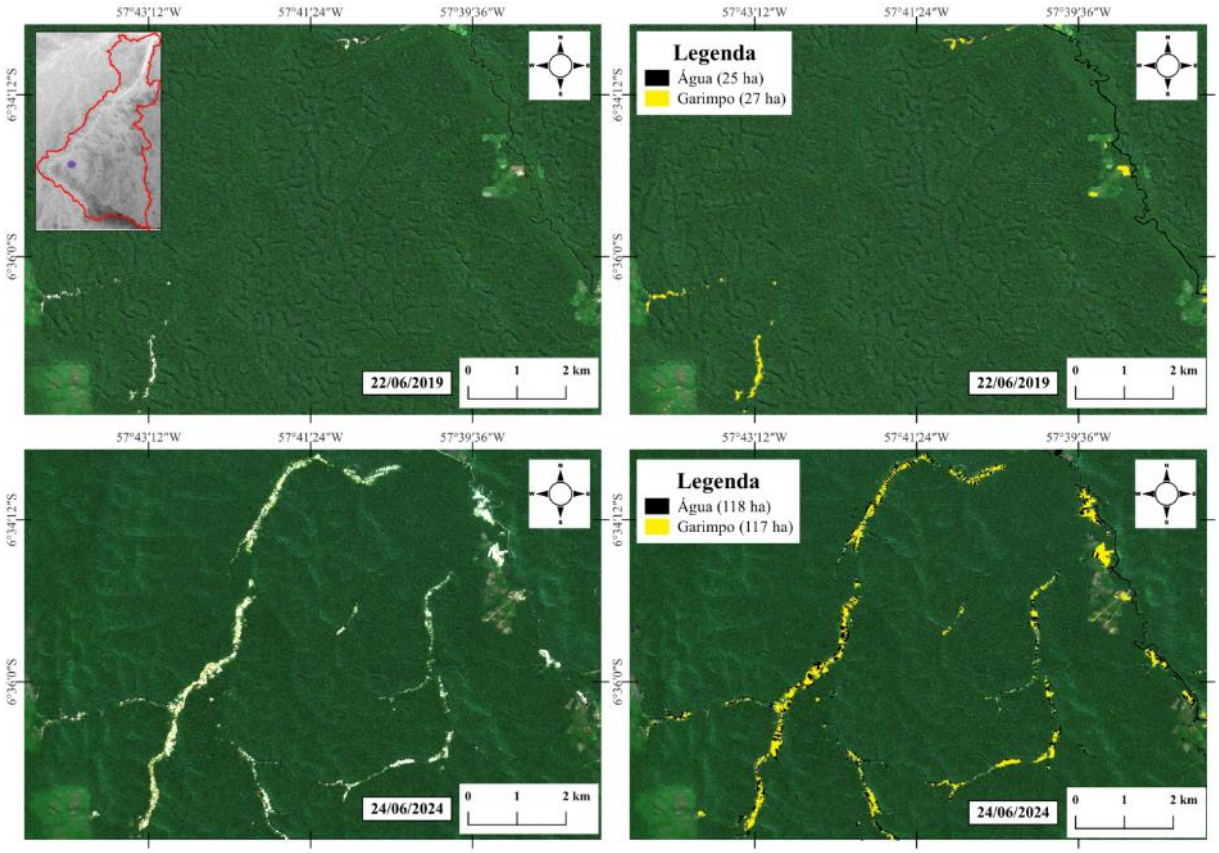


Figura 44: Classificação das classes de água e solo exposto na seção analisada dentro da Terra Indígena Munduruku.

No mapa de junho de 2019, a classe "garimpo" demonstra ser resultado direto da remoção da vegetação primária (Figura 45). Entre 2019 e 2024, a intensificação do garimpo nesses afluentes transformou trechos antes cobertos por floresta em canais de leitos abertos, nos quais a média de largura, que era de 60 m em junho de 2019, saltou para 118 m em junho de 2024. Consequentemente, a classe "água" (incluindo a água barrenta) se expandiu nas mesmas áreas onde a perda de vegetação e o recuo das margens aconteceu, demonstrando o impacto geomorfológico da atividade garimpeira sobre a estrutura fluvial local.

Figura 45: Estimativa da largura das magerns em 2019.

Entre 2019 e 2024, observou-se um alargamento expressivo dos canais onde a atividade de garimpo ocorreu. Em junho de 2019 (Figura 46), a largura variava de, no mínimo, 29 m a, no máximo, 86 m. Cinco anos depois, esses valores passaram para 44 m e 236 m, respectivamente, dando um valor incremento de aproximadamente 52% para o mínimo e 174% no máximo. Essa expansão resulta na formação de bancos de detritos e sumidouros do material solto (Bruno *et al*., 2022). Com isso, onde antes predominava a mata primária e canais estreitos (menores que 10 m), agora se encontram canais mais largos e assoreados, que contribuem para a presença de plumas de sedimento no rio a jusante, evidenciando uma reconfiguração na forma dos canais.

Figura 46: Etimativa da largura das margens em 2024.

As alterações morfológicas são importantes parâmetros de avaliação do impacto da atividade garimpeira na região. Bruno *et al*. (2022). Observaram que as escavações na região do Tapajós correm dentro e fora dos meandros dos rios e apagam frequentemente a morfologia desses meandros, moldando-os a uma aparência quase geométrica (Bruno *et al*., 2022). Essas modificações refletem a necessidade de monitoramento contínuo e de intervenções estratégicas pelas governanças locais que visem minimizar e, até mesmo, reverter os danos causados por essa atividade na paisagem fluvial amazônica.

É importante ressaltar que a seção observada reflete os impactos não só geomorfológicos e ambientais, mas também sociais, uma vez que ocorrem em um ambiente que é, ou deveria ser preservado, por se tratar de uma área protegida: a Terra Indígena Munduruku. Especialistas estimaram que o garimpo ilegal de ouro no Tapajós despeja aproximadamente sete milhões de toneladas de rejeitos por ano no rio. Para efeito de comparação, isso equivale a dizer que a cada 11 anos, o garimpo despeja no Rio Tapajós a mesma quantidade de sedimentos (em massa) que a mineradora Samarco despejou no Rio Doce (Geiser, 2018).

As análises apresentadas demonstram que a expansão do garimpo na região do médio-baixo Tapajós exerce impactos diretos e severos sobre a morfologia fluvial. Em apenas cinco anos, os canais monitorados sofreram aumentos significativos na largura, o que se reflete na

intensificação de processos erosivos e no escoamento superficial dos sedimentos. Tais resultados demonstraram-se compatíveis com estudos anteriores realizados em outras regiões tropicais, indicando que os limites críticos de alteração geomorfológica já foram ultrapassados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou compreender os impactos do garimpo nos canais fluviais com a avaliação no fluxo de sedimentos suspensos com dados de campo e imagens de satélites, assim como entender o regime hidrossedimentar do rio Tapajós. Foi possível observar que os rios de água claras da região vem sofrendo alterações nos seus processos geomorfomológicos nas últimas décadas.

O rio Tapajós apresentou descarga líquida média de 10.091 m³/s (período de 1987-2025), o que faz esse rio estar entre os cinco maiores tributários do Rio Amazonas, com maior fluxo entre os meses de fevereiro a abril, e menor de agosto a outubro. Quanto ao fluxo sólido médio anual, foi estimado entre 2 e 3 milhões de toneladas de sedimentos por ano, com produção específica de 6 toneladas por ano por km².

Quanto à identificação das mudanças na cor da água e a concentração de sedimento suspenso (CSS), os resultados mostraram uma correlação positiva entre a expansão da área de garimpo e o aumento da CSS, com valores do coeficiente de Pearson de 0,84 e R^2 de 0,71 na estação de Fordlândia. Observando a correlação entre os dados do sensor MODIS na Terra Indigena Munduruku (montante) e Alter do Chão (jusante), o coeficiente de Pearson foi de -0,21 e 0,19, respectivamente, demonstrando correlações fracas e negativas entre as duas variáveis.

O mapeamento da dinâmica de transporte hidrossedimentar em cinco trechos do rio Tapajós com o uso das imagens Planet, foi possivel verificar variações na concentração de sedimentos em diferentes períodos hidrológicos. A média da CSS em 87 km a jusante da foz do Crepori variou entre 15,73 $mg.L^{-1}$ e 46,91 $mg.L^{-1}$ de margem esquerda a direita, respectivamente, no mês de novembro. O mesmo comportamento foi observado na foz do Jamanxim, onde a CSS atingiu 178 $mg.L^{-1}$ em outubro, enquanto, no Tapajós, a CSS atingiu 83 $mg.L^{-1}$ a jusante.

A investigação dos impactos na morfologia fluvial dos canais tributários do rio Tapajós afetados pelo garimpo demonstaram alterações rápidas dos canais. Em apenas cinco anos, os canais analisados demonstraram alargamento significativo, transformando áreas anteriormente cobertas por vegetação primária em canais amplos e com solo exposto. Essas modificações, que chegaram a incrementos de largura entre 52% e 174%, resultaram em formações características, como bancos de detritos e formas geomorfológicas como sumidouros, confirmando as observações feitas por Bruno *et al*. (2022).

Esses resultados demonstraram que as atividades garimpeiras modificam rapidamente

a forma dos canais e os processos hidrossedimentares. Dado que parte da região estudada está localizada em área protegida, Terra Indígena Munduruku, torna-se fundamental buscar ações efetivas de comando e controle voltadas à mitigação desses impactos. Em síntese, esta pesquisa reforça a necessidade urgente de uma gestão integrada, que concilie o desenvolvimento econômico regional com a preservação ambiental e cultural da Bacia do Tapajós.

Aponta-se como um fator importante observado nesse estudo a disponibilidade contínua dos dados das estações fluviométricas para o monitoramento da qualidade da água, bem como para a calibração de modelos empíricos capazes de estimar a CSS a partir dados de sensoriamento remoto. Nessa perspectiva, as estações de Itaituba e Barra de São Miguel destacaram-se como pontos estratégicos para o monitoramento hidrossedimentológico. Isso porque elas permitem avaliar comparativamente o comportamento da carga sedimentar antes e após as contribuições de afluentes impactados diretamente pelas atividades garimpeiras, o que é fundamental para a compreensão das dinâmicas associadas à atividade.

Esses resultados demonstraram que as atividades garimpeiras modificam rapidamente a geomorfologia fluvial e alteram profundamente a dinâmica hidrossedimentar da região, apresentando desde impactos ambientais, como na geomorfologia, até sociais, conforme atinge as populações indígenas que moram em área protegida e comunitários locais. Por fim, as principais recomendações desta pesquisa são:

- Instalação de estações virtuais entre BSM e Itaituba, bem como nos principais afluentes minerados (Jamanxim, Crepori) com maior periodicidade de dados de turbidez e CSS.
- Incluir o monitoramento da CSS nas atividades de gestão do Plano de Manejo das Unidades de Conservação presentes na região, assim como na gestão das Terras Indígenas.
- Aprofundar os estudos sobre o comportamento espectral da água e a influência do aumento da CSS na zona eutrófica de rios sob atividade garimpeira.
- Incentivar políticas públicas e a reformulação de leis a partir do desenvolvimento de protocolos de ciência cidadã (inclusão dos comunitários locais no monitoramento) junto das comunidades para reportar novas frentes de garimpo e anomalias na qualidade da água.

REFERÊNCIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. P**lano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Amazônica** – Afluentes da Margem Direita (PERH-MDA), Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2012.

ALARCON, Daniela Fernandes; MILLIKAN, Brent; TORRES, Mauricio. **Ocekadi: hidrelétricas, conflitos socioambientais e resistência na Bacia do Tapajós**. International Rivers Brasil ; Santarém, PA : Programa de Antropologia e Arqueologia da Universidade Federal do Oeste do Pará, 2016.

ALMEIDA, F.F.M. 1978. A Evolução dos Cratons Amazônicos e do São Francisco comparada com seus homólogos do hemisférico norte. In: **Conor. Bras.** Geol., 30. Recife, 1978. Anais. Recife, SBQ. v.6. p.2303-2407.BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPAJÓS. In: **Revista Geografia Acadêmica**. v.9, n.1. ISSN 1678-7226. 2015.

BARBOSA, Claudio; NOVO, Evelyn; MARTINS, Vitor. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). ISBN 978-85-17-00095-9. Abril de 2019.

BRACK, Antonio; IPENZA, Cesar; ALVAREZ, José; Sotero, VITOR. **Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio - Una Bomba de Tiempo**. Ministerio del Ambiente, Lima abril del 2011.

BREIMAN, Leo. Random forests. Machine learning, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

BROSSE, Sebastien. Influence of small-scale gold mining on French Guiana streams: Are diatom assemblages valid disturbance sensors?. **In: Ecological Indicators**. 14. 100-106. 10.1016/j.ecolind.2011.07.018. 2012.

BRUNO, Delia E.; RUBAN, Dmitry A.; TIESS, Günter; […] Remote sensing study of artisanal and small-scale gold mining in Brazil and Indonesia. In: **Science of the Total Environmen**t, v. 748, art. 141129, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.

CHAPMAN, D. **Water Quality Assessments-A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring-Second Edition**. London, 651p. 1992.

COELHO, Maria Célia; WANDERLEY, Luiz Jardim; COSTA, Reinaldo Costa. Garimpeiros de Ouro e Cooperativismo no século XXI. Exemplos nos rios Tapajós, Juma e Madeira no Sudoeste da Amazônia Brasileira. In**: Revista franco-brasilera de geografia**. Número 33, 2017.

Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SA.21-Santarém. Rio de Janeiro: DNPM, p. 131-181, 1976.

DINIZ, Cesar; CORTINHAS, Luiz; SADECK, Luis; WALFIR, Pedro; SHIMBO, Julia; Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27858105/. Acesso em: 19/01/2024.

DODDS, W. K.; WHILES, M. R. **Freshwater Ecology: Concepts and Environmental**

Applications of Limnology. 2. ed. Amsterdam: Academic Press/Elsevier, 2010.

DOS SANTOS, Humberto Gonçalves; JACOMINE, Paulo Klinger Tito; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos; OLIVEIRA, Virlei Álvaro de; LUMBRERAS, José Francisco; COELHO, Maurício Rizzato; ALMEIDA, Jaime Antonio de; FILHO, José Coelho de Araújo; OLIVEIRA, João Bertoldo de. Tony Jarbas Ferreira Cunha. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

ESPINOZA VILLAR, R. *et al*. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **In: Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 45–54. 2013.

Filizola, N.; Guyot, J.L. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. **Hydrological Processes** 23: 3207–3215. 2009.

FORSHAGE, Allen; Carter, Neil. Effect of gravel dredging on the Brazos River. In: **South east. Assoc. Game Fish Comm**., 24: 695-708. Disponível em: https://seafwa.org/journal/1973/effects-gravel-dredging-brazos-river. Acesso em: 19/01/2024.

FREITAS, Alan Ferreira de *et al*. Garimpo de ouro e cooperativismo no Brasil: formalização e dispersão geográfica da atividade garimpeira. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, n. 62, 2024.

FRITZSONS, Elenice; MANTOVANI, Luiz Eduardo; NETO, Anselmo Chaves; HINDI, Eduardo Chemas. Eduardo Chemas Hindi. In: **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.14 n.3. pg. 381-390. 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300012. Acesso em: 31/07/2024.

GALLAY, Marjorie; MARTINEZ, Jean-Michel; ALLO, Sébastien; MORA, Abrahan; COCHONNEAU, Gérard; GARDEL, Antoine; DOUDOU, Jean-Claude; SARRAZIN, Max; CHOW-TOUN, Franck; LARAQUE, Alain. Impact of land degradation from mining activities on the sediment fluxes in two large rivers of French Guiana. In: **Land Degradation & Development**, v. 29, p. 1-14, 2018. DOI: 10.1002/ldr.3150.

GBEDZI, Divine Dodzi; OFOSU, Eric Antwi; MORTEY, Eric Mensah; YEBOAH, Abena Obiri; NYANTAKYI, Emmanuel Kwesi; SIABI, Ebenezer Kwadwo; ABDALLAH, Faisal; DOMFEH, Martin Kyereh; MINKAH, Anna Amankwah. Impact of mining on land use land cover change and water quality in the Asutifi North District of Ghana, West Africa. In: **Environmental Challenges,** volume6, ISSN 2667-0100, https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100441. 2022.

GEISER. **Laudo de Perícia Criminal Federal n. 091/2018 – UTEC/DPF/SNM/P**A. Santarém, 12 Jul. Laudo técnico final. 2018. Acesso em: https://www.escolhas.org/wp-content/uploads/2020/05/Laudo-pericial-Tapaj%C3%B3s.pdf. Acesso em: 16 maios de 2025.

GEBREKIROS, Solomom Tesfay. Factors Affecting Stream Fish Community Composition and Habitat Suitability. In: **Journal of Aquaculture & amp; Marine Biology.** 4(2): 00076. DOI: 10.15406/jamb.2016.04.00076.2016. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/306106878_Factors_Affecting_Stream_Fish_Comm unity_Com position_and_Habitat_Suitability . Acesso em: 19/01/2024.

Geodiversidade do estado do Pará. CPRM (Serviço Geológico do Brasil), 256 p.: il. 30 cm + 1 DVD-ROM. Belém, 2013.

GHOSHAL, S.; JAMES, L.A.; SINGER, M.B.; AALTO, R. Channel and Floodplain Change Analysis over a 100-Year Period: Lower Yuba River. In: **California. In: Remote Sensing**, 2, 1797-1825. 2010. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs2071797 Acesso em: 19 /01/2024.

HILMES, Marsha M.; WOHL, Ellen E. CHANGES IN CHANNEL MORPHOLOGY ASSOCIATED WITH PLACER MINING. in: **Physical Geography**, 16(3), 223–242. Doi:10.1080/02723646.1995.10642551. 1995. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02723646.1995.10642551 . Acesso em: 19/01/2024.

HOFMEISTER, Naira; SILVA, José Cícero da. O rio está morto': uma mina está poluindo as águas da tribo Xikrin do Brasil?. 2018. Disponível em: https://www.theguardian.com/global-development/2018/may/15/brazil-xikrin-catete-river-amazon. Acesso em: 15/09/2024.

HUANG, Ming-Wan; LIAO, Jyh-Jong , PAN, Yii-Wen, CHENG, Meng-Hsiung. Rapid channelization and incision into soft bedrock induced by human activity Implications from the Bachang River in Taiwan. In: **Engineering Geology**, Volume 177, Pages 10-24. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.002 Acesso em: 19 /01/2024.

IBGE - EMBRAPA. Mapa de solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE/EMBRAPA, 2001. Mapa, color., 107 x 100 cm, escala 1:5.000.000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa agrícola municipal 2006. In: **Banco de dados agregados Sidra**. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/home/pnadct/brasil. Acesso em: 18 abril de 2024.

JOÃO, Xafi da Silva Jorge; TEXEIRA, Sheila Gatinho; FONSECA, Dianne Danielle Farias. KONDOLF, G. Mathias. Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. In: **Landscape and Urban Planning**, Volume 28, Issues 2-3, Pages 225-243. 1994. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)90010-8 . Acesso em: 19/01/2024.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Koppen Geiger climate classification updated. In: **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

LATORRE, Marcelo Lopes; ANDERSON, Liana Oighenstein; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; JÚNIOR, Osmar Abílio de Carvalho. Sensor modis: características gerais e aplicações. In: *Espaço & Geografia*, Vol.6, No 1, 91:121 ISSN: 1516-9375. 2003.

LOBO, F., Costa, M.P.F., Novo, E.M.L.M., Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. In: **Remote Sens. Environ**. 157, 170–184. https:// doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.030. 2015.

LOBO, Felipe de Lucia; COSTA, Maycira; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; TELMER, Kevin. Effects of Small-Scale Gold Mining Tailings on the Underwater Light Field in the Tapajós River Basin, Brazilian Amazon. In: **Remote Sensing**. 2017, 9, 861;

doi:10.3390/rs9080861. 2017.

LOBO, Felipe de Lucia; COSTA, Maycira; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; TELMER, Kevin. Distribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the Past 40 Years and Relationship with Water Siltation. In: **remote sensing**. 8, 579; doi:10.3390/rs8070579. 2016. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/8/7/579. Acesso em: 19/01/2024.

Luis; MORENO- BRUSH, Monica. **Influencia de la minería aurífera aluvial en la geodinámica fluvial del río Madre de Dios, Amazonía peruana, en el periodo 1984-2020**. Proyecto River Mining (PEER 8-235). 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370059981_Influencia_de_la_mineria_aurifera_aluvial_en_la_geodinamica_fluvial_del_rio_Madre_de_Dios_Amazonia_peruana_en_el_periodo_1984-2020. Acesso em: Acesso em: 19/01/2024.

MARINHO, Rogério Ribeiro. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro**. Universidade Federal do Amazonas, Amazonas, 2019.

MERTES, Leal A. K. DUNNE, Thomas. Martinelli, Luiz Antonio. Channel-Floodplain Geomorphology along the Solim??es-Amazon River, Brazil. I**n: Geological Society of America Bulletin.** 108(9):1089-1107 108(9):1089-1107. DOI:10.1130/00167606(1996)108<1089:CFGATS>2.3.CO;2. 1996.

MOBLEY, Curtis. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. In: **Applied Optics** 38: 7442. 1999.

MOL, Jan; OUBOTER, Paul. Downstream Effects of Erosion From Small-Scale Gold Mining on the Instream Habitat and Fish Community of a Small Neotropical Rainforest Stream. In: **Conservation Biology**. 18. 201 - 214. 10.1111/j.1523-1739.2004.00080.x. 2004.

MOSSA, JOANN; JAMES, Allan. Impacts of Mining on Geomorphic Systems. In: **John F. Shroder (ed.) Treatise on Geomorphology,** Volume 13, pp. 74-95. San Diego: Academic Press. 2013.

NASCIMENTO, D.A.; MAURO, C.A.; GARCIA, M.G.L. Geomorfologia. In: **BRASIL.** OESTREICHER, Jordan S.; LUCOTTE, Marc; MOINGT, Matthieu; BÉLANGER, Émilie; ROZON, Chistine; DAVIDSON, Robert; MERTENS, Frédéric; ROMAÑA, Christina A. Environmental and Anthropogenic Factors Influencing Mercury Dynamics During the Past Century in Floodplain Lakes of the Tapajós River, Brazilian Amazon. In: **National Library of Medicin's-NLM.** 2017 Jan; 72(1):11-30. doi: 10.1007/s00244-016-0325-1. 2017.

QUEIROZ, M. S. de; MARINHO, R. R. Rio congo: análise do fluxo de sedimentos suspensos em um megassistema multicanal na África central. Raega. In: **O Espaço Geográfico em Análise**, 61(1), 153–172. https://doi.org/10.5380/raega.v61i1.95541. 2024.

ROSA, Marcos; AZEVEDO, Tasso. **Nota técnica sobre garimpo no rio tapajós**. MAPBIOMAS. Dezembro, 2021.

ROSA, Roberto. Análise espacial em geografia**. in: Revista da ANPEGE**, v. 7, n. 1, número

especial, p. 275-289. ISSN 1679-768 X. Out. 2011.
SALOMON, Marta. **A nova corrida do ouro na Amazônia: Onde garimpeiros, instituições financeiras e falta de controle se encontram e avançam sobre a floresta**. Instituto escolhas, maio de 2020.

ROLAND, Fabio; ESTEVES, Francisco de Assiss. Effects of bauxite tailing on PAR attenuation in an Amazonian crystalline water lake. In: **Hydrobiologia**, 377 , 1–7. DOI https://doi.org/10.1023/A:1003252805671. 1998.

SANTOS, A. L. M. R. DOS. Variabilidade no aporte de sedimentos do Rio Purus: avaliação por sensores remotos e aspectos observacionais. [s.l.] UFAM, 2015.

SANTOS, Andre Luis Martinelli Real dos. Variabilidade no aporte de sedimentos do Rio Purus: avaliação por sensores remotos e aspectos observacionais. INPA/UEA, Setembro, 2022.

SANTOS, Cleber Assis dos.; Araujo, Ivinny Barros de; WANZELER, Romero Thiago Sobrinho; SERRÃO, Edivaldo Afonso de Oliveira; FARIAS, Monique Helen Cravo Soares; LIMA, Aline Maria Meiguins de. REGIONALIZAÇÃO HIDROCLIMATOLÓGICA DA SANTOS, Daniel N.; STEVAUX, José Cândido. Alterações De Longa Duração Na Dinâmica Hidrossedimentar Por Extração de Areia no Alto Curso do Rio Paraná Na Região de Porto Rico, PR. In: **Geosciences**, volume 29, n. 4, páginas 603-612. 2010. Disponível em: https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/5480. Acesso em: 19/01/2024.

SANTOS, Zilda Joaquina Cohen Gama dos; SILVA, Leonardo Xavier da. Desenvolvimento e conflitos ambientais na região do Tapajós: Uma Perspectiva Histórica. In: **Brazilian Journal of Development.** ISSN 2525-8761. V.5, n. 10, p. 18581-18597 oct. 2019.

SCOLES, Ricardo. Caraterísticas biogeográficas da bacia do Tapajós. In: ALARCON, Daniela Fernandes, MILLINKAN, Brent e TORRES, Maurício (orgs). **Ocekadi: hidrelétricas, conflitos socioambientais e resistência na Bacia do Tapajós**. Brasília, DF: International Rivers Brasil; Santarém, PA: Programa de Antropologia e Arqueologia da Universidade Federal do Oeste do Pará, p. 29-42. 2016.

SIOLI, Harald. Amazônia: **Fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais.** Editora: vozes, 3ª edição. Petrópolis, 1991.

SOUSA, Elielma dos Santos; COSTA, Carlos Eduardo de Souza; SOUZA, Matheus de Melo; PROGÊNIO, Mayke Feitosa; CONCEIÇÃO, Ruricksson Progênio da. Projeções Futuras de Sedimentos no Rio Tapajós e sua possível relação com Áreas de Garimpo. In: **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. e25085, 2024. DOI: 10.5585/2024.25085. Disponível em: https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/25085. Acesso em: 22 set. 2024.

STELLA, John C.; RIDDLE, Jess; PIÉGAY, Hervé;GAGNAGE, Matthieu; TRÉMÉLO, Marie-Laure. Climate and local geomorphic interactions drive patterns of riparian forest decline along a Mediterranean Basin river. In: **Geomorphology**, Volume 202, Pages 101-114. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.013 . Acesso em: 19/01/2024.

STEVAUX, José Cândido; LATRUBESSE, Edgardo Manuel. **Geomorfologia Fluvial**. Oficina de textos, ISBN: 978-85-7975-075-5, São Paulo, 2017.

TELMER, Keith; STAPPER, Daniel. Impacts of small-scale gold mining on suspended sediments and mercury. In: **Applied Geochemistry,** v. 22, n. 12, p. 2076-2086, 2007.

TELMER, Kevin; COSTA, Maycira; ANGÉLICA, Rômulo S.; ARAUJO, Eric S.; MAURICE, Yvon. The source and fate of sediment and mercury in the Tapajós River, Pará, Brazilian Amazon: ground- and space-based evidence. In: **Journal of Environmental Management, Amsterdam**, v. 81, n. 2, p. 101-113, 2006. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.09.027.

TERREL, Yulissa Estrada; Portocarrero Trigoso, Elisa Consuel; GARCIA VERAMATUS, Maria Paz; PILLACA, MARTIN; Castro, Joshua; QUISPE FLORES, Edwin; FERNANDEZ, TORRES, Maurício, *et al*. **Amazônia revelada: os descaminhos ao longo da BR163**. Brasília. CNPq. 2005.

TUDESQUE, Loïc; GRENOUILLEt, Gaël; GEVREY, Muriel; KHAZRAIE, Kamran; VITTE, Antonio Carlos. O desenvolvimento do conceito de paisagem e a sua inserção na geografia física. In: **Revista de Geografia da UFC**, vol. 6, núm. 11, pp. 71-78, Fortaleza, 2007.

WALKER, Robert;DEFRIES, Ruth; VERA-DIAZ; CARMEN, Maria del; SHIMABUKURO, Yosio; VENTURIERI, Adriano. The Expansion of Intensive Agriculture and Ranching in Brazilian Amazonia. In: **Geophysical Monograph Series**, January, 2009.

ZANIN, Paulo Rodrigo; SATYAMURTY, Prakki . Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from multi-decadal to inter-annual time scales: A critical review. In: **international Journal of Climatology**. Disponível em: https://doi.org/10.1002/joc.6442 . Acesso em: 19/01/2024.

Zibordi, G. **Marine optics: field radiometry** (Doctoral dissertation, University of Southampton). 2007.