

Qualidade hídrica na Bacia do Tapajós em relação às dinâmicas regionais de desmatamento e exploração mineral¹

Juan Doblas, Sarah Martins Frota, Antonio Oviedo

1 RESUMO

O presente relatório visa apresentar os resultados da avaliação exploratória da relação entre os dados de qualidade das águas continentais da bacia do Tapajós, nos municípios de Jacareacanga, Itaituba, Trairão, Rurópolis, Aveiro e Santarém, com os dados relativos à evolução temporal do desmatamento e garimpo na bacia. Esta pesquisa apresenta alguns aspectos inovadores, sendo o mais relevante a utilização de extensas séries temporais de dados de sensoriamento remoto para determinar os parâmetros relativos à qualidade d'água em locais que não possuem dados *in loco*. Posteriormente esses dados foram cruzados com dados sobre a evolução temporal de desmatamento e mineração. Esse procedimento, que foi embasado tecnicamente usando métodos estatísticos de validação, permite afirmar que:

- Existe uma correlação estatisticamente significativa entre o avanço da mineração ilegal na bacia do Tapajós e a degradação da qualidade das águas dos seus corpos hídricos. Essa correlação está geograficamente limitada à região onde se realiza a exploração.

- Não foi detectada uma correlação clara entre a evolução temporal do desmatamento por corte raso, associado à expansão de cultivos e/ou pecuária, com a degradação da qualidade d'água dos locais estudados.

- A contaminação por sedimentos provenientes de atividades de mineração de corpos hídricos distantes dos focos de mineração não transpareceu na nossa análise, mas não podem ser descartados outros mecanismos de contaminação, como o transporte coloidal de mercúrio.

¹ Nota Técnica elaborada em 14.06.2023

2 INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais do garimpo de ouro podem ser divididos em físicos e biológicos. Os impactos físicos são caracterizados pela destruição da capa vegetal e de solos assim como pelo assoreamento de rios. O revolvimento do solo promove intensa erosão das margens (barrancos) de rios, carreando sólidos em suspensão e mercúrio associado a matéria orgânica para o sistema de drenagem. Este processo pode ser uma das principais vias de entrada de mercúrio natural ou antropogênico nos sistemas aquáticos amazônicos”. (Veiga; Silva; Hinton, 2002).

Como a exploração aluvionar se desenvolve no leito e nas margens dos rios e córregos, os particulados sólidos (lama) são carregados pela drenagem diretamente para o sistema fluvial, aumentando a concentração de sólidos totais em suspensão nos corpos d’água, o que provoca e intensifica o assoreamento. O assoreamento dos rios produz alterações físicas, químicas e biológicas no ecossistema, como o aumento da turbidez e da temperatura da água, redução do volume de oxigênio dissolvido, mudança da acidez, proliferação de algumas espécies de algas e atenuação da luz, o que pode afetar a produtividade de fitoplâncton e contribuir para a mudança da biodiversidade dos rios, incluindo plânctons, macroinvertebrados e peixes (Lobo et al., 2017).

Estudos na Amazônia demonstram que para cada uma grama de ouro produzida são despejados entre uma ou duas toneladas de sedimentos sólidos diretamente nos rios e córregos (Lobo et al., 2017). Em razão da hidrodinâmica e característica dos depósitos aluvionares, os danos e impactos do garimpo operam na escala da bacia hidrográfica, em especial nos trechos à jusante das lavras. Isso ocorre porque os sedimentos mais leves e finos, como a argila, permanecem mais tempo em suspensão e são drenados pela hidrodinâmica da bacia hidrográfica, percorrendo longas distâncias.

O principal mecanismo de contaminação em áreas afetadas por mineração de ouro é a bioacumulação de mercúrio. A bioacumulação permite que as espécies no topo da cadeia trófica acumulem nos seus tecidos substâncias tóxicas (neste caso, mercúrio) encontradas em baixas proporções em organismos menores. O ser humano, como consumidor de topo de cadeia, é particularmente sujeito a este fenômeno. Desde o ano de 1956, em que foi estabelecida a origem da grave doença de Minamata como sendo provocada pela bioacumulação de mercúrio, numerosos casos têm sido documentados no mundo, em relação ou não com a mineração de ouro.

Nesse sentido, é importante notar que a contaminação por mercúrio dos grandes cursos d’água afetados por garimpo não provém maioritariamente do mercúrio usado na amalgama do ouro, e sim dos sedimentos mobilizados na prospecção e operação dos próprios garimpos (Termel, 2006). Isto quer dizer que a adequação das técnicas de manuseio dos operadores de garimpo (uso de redomas, uso de cianeto) não irá diminuir de forma sensível o teor de mercúrio e outros metais pesados.

Em 2015, o Estado do Pará delegou aos entes municipais a competência para conduzir o licenciamento ambiental de Lavras Garimpeiras. A delegação se deu por meio da edição da Resolução nº. 120/2015 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (Coema). O Pará tornou-se, assim, o único estado da Amazônia Legal em que os entes municipais receberam delegação administrativa do Estado para conduzir o licenciamento ambiental da Lavra Garimpeira. Neste caso, a atividade de Lavra Garimpeira de ouro está enquadrada como de impacto ambiental local

Por sua natureza, todos esses impactos e danos são caracterizados como microrregionais ou regionais, sendo questionável a hipótese de atividade garimpeira aluvionar cujos impactos se restrinjam ao âmbito local, discussão objeto deste relatório.

Neste estudo temos como unidade de análise a bacia do Tapajós, uma das principais sub-bacias do Rio Amazonas. A bacia do Tapajós é afetada, desde o início dos anos 70, por um número crescente de locais onde a mineração informal de ouro e, em menor medida, de cassiterita, é praticada em menor ou maior escala.

O objetivo deste estudo é estabelecer a correlação temporal e espacial entre a implantação de empreendimentos formais e informais de mineração na bacia e a diminuição da qualidade d'água no Rio Tapajós. Para tal, e devido à ausência de amostragem sistemática de parâmetros de qualidade d'água na bacia, iremos utilizar dados de sensoriamento remoto (imagens de satélites ópticos) para estabelecer tendências na qualidade d'água em pontos chave da bacia.

A correlação entre a ocorrência histórica de garimpos e o aumento da taxa de sedimentos na bacia do rio Tapajós já foi extensivamente estudada com ajuda de métodos de sensoriamento remoto quantitativo (Lobo; Costa; Novo, 2015). De fato, a Agência Nacional de Águas planeja, desde 2015, a implantação de um sistema de estações de medição de qualidade d'água virtuais, baseadas em dados de sensoriamento remoto. Este projeto, chamado HidroSat (<https://hidrosat.ana.gov.br/>), se encontra em fase final de implantação, em parceria com o instituto francês de desenvolvimento (IRD).

O presente estudo visa atualizar o citado estudo e fornecer novos insights em vista do aumento exponencial da presença de mineração ilegal na bacia no período 2010-2022 (MOLINA, 2023).

3 FONTES DE INFORMAÇÃO

3.1 REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL

A Agência Nacional das Águas (ANA) coordena uma rede automatizada de estações de medição, denominada Rede Hidro meteorológica Nacional (RHN). A RHN conta, segundo as informações mais atualizadas, com 4.641 pontos de monitoramento no nível nacional (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>). Para o presente estudo foram utilizados os dados disponibilizados para a bacia do rio Tapajós, Juruena e Teles Pires. Ao total foram utilizados dados de 11 estações, conforme Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Nome, código RHN e posição das estações utilizadas no presente estudo.

Nome	Código	Município	Latitude	Longitude	Ajustada	Data mínima	Data máxima
Acará do Tapajós	17650002	Itaituba	-4.8900	-56.7256	Sim	27/08/2002	08/07/2014
Barra São Manuel	17430000	Maués/ Jacareacanga	-7.3391	-58.1516	Sim	23/05/1980	01/09/2022
Buburé	17710000	Itaituba	-4.6210	-56.3279	Sim	03/08/2009	22/08/2022
Creporizão	17610000	Jacareacanga/ Itaituba	-6.8202	-56.8507	Sim	18/09/2002	04/05/2012
Fortaleza	17500000	Jacareacanga	-6.0500	-57.6400	Não	08/09/2002	01/07/2014
Itaituba	17730000	Itaituba	-4.2800	-55.9800	Não	31/07/2009	04/09/2022
Jamanxim	17680000	Itaituba	-5.5022	-55.8532	Sim	01/04/1976	19/08/2022
Jardim do Ouro	17675000	Itaituba	-6.2600	-55.7700	Não	09/08/2009	12/09/2022
Foz Juruena	17130000	Apuí / Apicás	-7.7302	-58.2846	Sim	30/08/2002	16/03/2022
Santa Rosa	17410000	Jacareacanga/ Apicás	-8.8600	-57.4000	Não	17/09/2002	02/01/2013
Três Marias	17420000	Jacareacanga/ Apicás	-7.6098	-57.9479	Sim	12/09/2002	02/09/2022

O mapa da Figura 2 detalha a localização das estações usadas no presente estudo. Vale assinalar que foi necessário ajustar minimamente o posicionamento de sete (7) estações, pois elas apresentaram localização manifestamente inexata no banco de dados da RHN (ver exemplo Figura 1).



Figura 1: exemplo de correção na localização de estação de medição fluviométrica da RHN. No caso da figura, a localização constante no banco de dados coincidia com a rodovia BR163, e se situava a aproximadamente 2 km. do Rio Jamanxim.

Dentre os dados fornecidos pela RHN, o de maior relevância para a pesquisa e que possui um número estatisticamente relevante de medições nas estações utilizadas é a turbidez. A medida, efetuada de forma sistemática com ajuda de um aparelho chamado turbidímetro ou nefelômetro, é uma medida da importância do espalhamento de um feixe de luz atravessando uma amostra padrão do líquido analisado. A unidade de medida da turbidez é o NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Níveis anormalmente altos de turbidez estão geralmente relacionados a erosão de solos, atividades de mineração ou lançamento de esgotos e efluentes industriais.

Em geral é comumente aceito que um nível de turbidez superior a 5 NTU inviabiliza uma fonte de abastecimento d'água para o seu consumo. Níveis acima de 10 NTU causam impacto na maior parte das formas de vida aquáticas, e níveis acima de 100 NTU comprometem seriamente a sobrevivência das mesmas.

A

Tabela 2 detalha o número de amostras disponíveis para os dois parâmetros mais importantes no contexto do estudo: Turbidez e teor em sólidos suspensos (TSS). Apesar do TSS representar uma medida mais direta do potencial contaminação por mercúrio de um determinado local, a escassez de medidas disponíveis fez com que os trabalhos de correlação empírica se centrassem nas medidas de turbidez. Vale a pena destacar que normalmente os valores de TSS e de Turbidez estão fortemente correlados (Dodds; Whiles, 2010).

Tabela 2: número de amostras disponíveis para as estações e variáveis pertinentes ao estudo.

Nome	Turbidez	TSS
Acará do Tapajós	24	-
Barra São Manuel	157	77
Bubure	68	1
Creporizão	10	-
Fortaleza	24	-
Foz Juruena	67	-
Itaituba	243	87
Jamanxim	65	-
Jardim do Ouro	58	-
Santa Rosa	19	-
Tres Marias	68	-
TOTAL	803	165

3.2 BANCO DE DADOS GLOBAL DE QUALIDADE HÍDRICA (GLORIA)

O conjunto de dados GLORIA (GLOBAL Reflectance community dataset for Imaging and optical sensing of Aquatic environments) inclui 7.572 medidas globais de reflectância de sensoriamento remoto hiperespectral curadas em intervalos de 1 nm no intervalo de comprimento de onda de 350 a 900 nm. Além disso, pelo menos uma medida de qualidade da água co-localizada de clorofila, sólidos suspensos totais (TSS), absorção por substâncias dissolvidas e profundidade de Secchi é fornecida. Os dados foram contribuídos por pesquisadores afiliados a 59 instituições em todo o mundo e vêm de 450 corpos d'água diferentes. Cada medida é documentada com detalhes metodológicos abrangentes, permitindo aos usuários avaliar a adequação para o propósito e fornecendo uma referência para profissionais que planejam medidas semelhantes. O GLORIA foi projetado para fornecer dados de alta precisão, com erros de medição tipicamente abaixo de 5% para clorofila e 10% para outros parâmetros.

O conjunto de dados GLORIA é de livre acesso e pode ser carregado no endereço: <https://download.pangaea.de/dataset/948492/files/GLORIA-2022.zip>

3.3 INFORMAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO

As variações no conteúdo de sedimentos dos corpos d'água provocam mudanças no comportamento espectral dos mesmos, isto é, na quantidade de luz que eles refletem em diferentes comprimentos d'onda. Desta forma, um rio de águas límpidas irá absorver boa parte

da radiação solar incidente, mostrando um perfil espectral característico em imagens de satélite. Já um corpo d'água mais barrento irá refletir determinados comprimentos d'onda, sendo possível estabelecer uma relação entre o teor em sedimentos e o perfil espectral do corpo d'água.

Para subsidiar o presente estudo, e especificamente determinar a evolução da qualidade d'água na bacia do rio Tapajós, foram extraídos valores de refletância ótica de superfície provenientes dos satélites Sentinel-2A e 2B, da agência espacial europeia, e Landsat, da NASA.

3.3.1 Informações dos satélites Sentinel-2

Os satélites Sentinel-2 pertencem ao programa de observação da terra *Copernicus*, fundado pela Comissão Europeia (CE) e operado pela Agência Espacial Europeia (ESA). A seguir resumimos às suas principais características:

- Lançamento: 23 de junho de 2015 (S2A) e 7 de março de 2017 (S2B).
- Frequência de revisita: 5 dias.
- Resolução espacial: 10 metros (visível e infravermelho próximo), 20 metros (Infravermelho médio e termal) e 60 (cirros/aerossol).
- Horário de passagem: 10:30AM

Os dados de maior qualidade disponíveis relativos aos satélites Sentinel 2 são os dados SR (*Surface Reflectance*). Esses dados, elaborados e disponibilizados pela ESA sob a denominação Sentinel-2 Level 2A, são processados para remover as distorções na refletância provocadas pela passagem da radiação solar pela atmosfera. Essa distorção, que afeta especialmente as bandas do visível, tem sido destacada como uma das principais fontes de erro na correlação de medidas de sensoriamento remoto e de qualidade d'água (Lobo; Costa; Novo, 2015). Os dados Sentinel-2 SR estão disponíveis na nossa área de estudo unicamente a partir do 1 de janeiro de 2019.

3.3.2 Satélites Landsat

A Constelação Landsat é composta por uma série de satélite de observação da Terra, desenvolvidos e operados pela NASA e pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Resumimos a seguir as suas principais características da constelação Landsat:

- Lançamento: os satélites da série Landsat foram lançados em diferentes momentos ao longo das décadas. Os satélites que foram usados neste estudo foram:
 - Landsat 5: Lançado em 1º de março de 1984.
 - Landsat 7: Lançado em 15 de abril de 1999.
 - Landsat 8: Lançado em 11 de fevereiro de 2013.
 - Landsat 8: Lançado em 27 de setembro de 2021.
- Frequência de revisita: 16 dias.

- Resolução especial: 30 metros.
- Horário de passagem: aproximadamente 10:30AM

Os dados provenientes dos satélites Landsat constituem uma valiosa fonte informação, apesar de possuir menor resolução espacial do que os Sentinel-2 (30 metros vs. 10 metros), devido principalmente a dois fatores:

- A continuidade da missão Landsat faz com que existam registros contínuos desde 1984, com características similares, o que possibilita a reconstrução de series temporais de mais de 30 anos de áreas de interesse.
- Existe um conjunto de pesquisas abrangente sobre a relação entre a propriedades espectrais e químicas dos corpos d'água continentais (ver referências bibliográficas no fim da presente nota). Notadamente, as pesquisas do Dr. Felipe Lobo têm estabelecido uma correlação de alta confiabilidade entre a refletância do canal vermelho dos satélites Landsat e o conteúdo de sedimentos em suspensão na bacia do rio Tapajós.

3.4 MINERAÇÃO ILEGAL

A determinação detalhada da ocorrência e evolução de áreas de mineração na bacia do Tapajós foi realizada com ajuda dos dados da coleção 7 do Mapbiomas em sua classe de mineração. Para além da consistência derivada do procedimento automatizado de mapeamento, uma das vantagens deste conjunto de dados em relação a outros possíveis candidatos (DETER mineração, principalmente) é a resolução de 30 metros. Essa resolução permite incluir no mapeamento pequenas frentes de trabalho e expansões de áreas de garimpo que poderiam passar despercebidas usando resoluções maiores, como a usada pelos projetos PRODES (6,25 ha) ou DETER (1 ha).

3.5 DESMATAMENTO (PRODES)

No presente estudo utilizamos os dados oficiais de desmatamento publicados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através da plataforma Terra Brasilis (<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>). Na data de finalização deste relatório, os últimos dados disponíveis eram os relativos ao ano agrícola 2022, isto, ao desmatamento produzido até agosto de 2022.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

4.1 DEFINIÇÃO DE ESTAÇÕES VIRTUAIS

A ausência de estações da ANA na região do baixo Tapajós (a jusante da cidade de Itaituba) impediria, a princípio, determinar a variação dos parâmetros de qualidade d'água investigados (TSS e Turbidez). Porém, e como foi exposto na seção anterior, a literatura científica permite afirmar que é possível inferir dados de qualidade d'água a partir de dados de sensoriamento remoto.

Como etapa inicial dessa inferência, foram fixadas quatro (4) estações virtuais, em localizações centrais nas regiões consideradas importantes para a presente análise. A Tabela 3 apresenta o nome e posição das estações virtuais. O mapa na Figura 2 mostra a posição das estações reais e virtuais utilizadas no estudo.

Tabela 3 - Nome e posição das estações virtuais criadas no contexto do presente estudo

Nome da estação	x	y
Santarém	-54.772	-2.417
Alter do Chão	-54.996	-2.5108
Belterra	-55.0149	-2.6217
Aveiro	-55.337	-3.6031

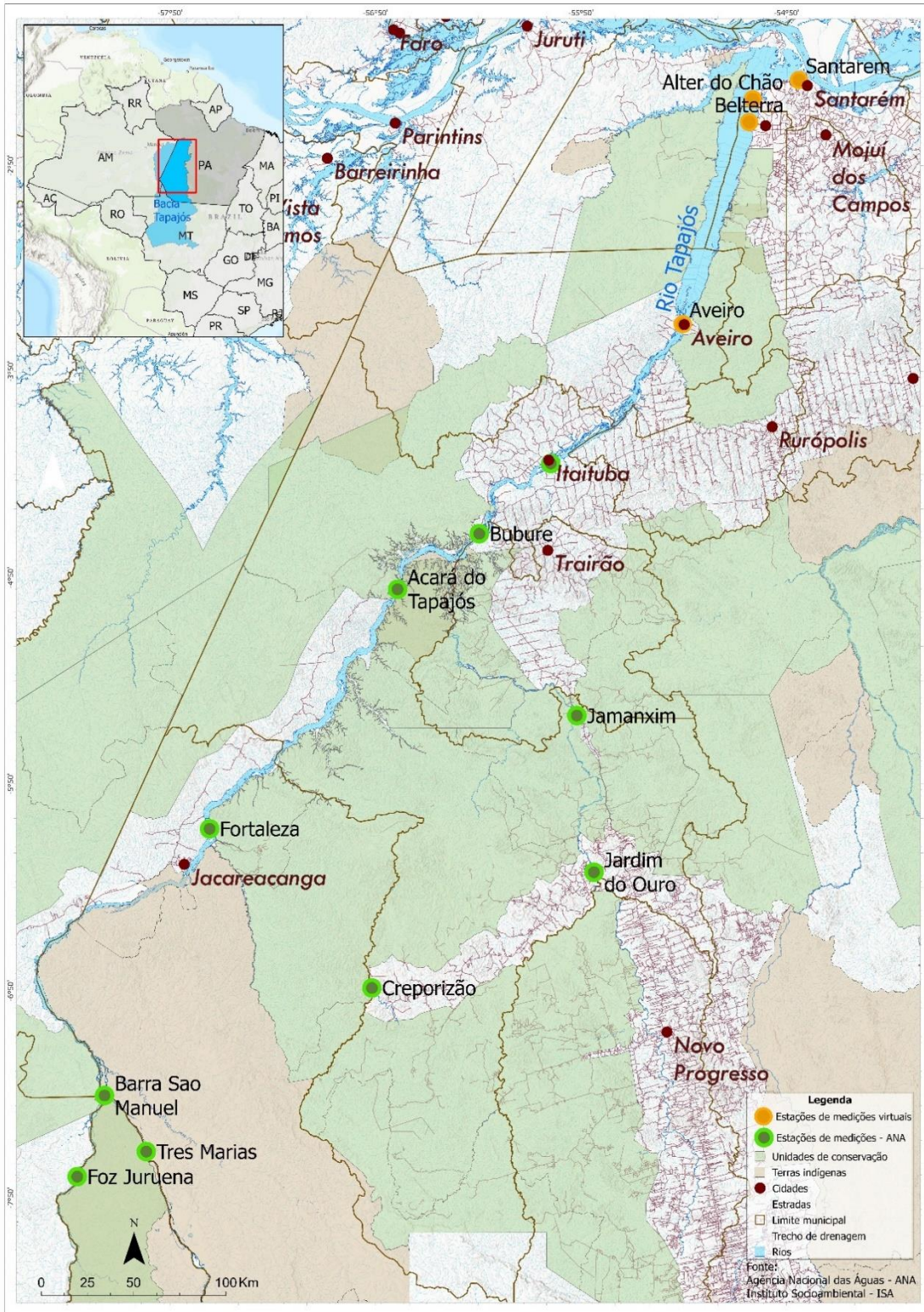


Figura 2 - Mapa base das estações reais e virtuais usadas no presente estudo.

4.2 EVOLUÇÃO DO DESMATAMENTO E DA MINERAÇÃO NA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES REAIS E VIRTUAIS

Com o intuito de determinar a influência do desmatamento e da mineração inicial na qualidade d'água em cada uma das estações utilizadas, foi inicialmente determinada a bacia de contribuição correspondente a cada estação. Para tal foram calculadas as direções de fluxo de cada localização na bacia a partir de dados de elevação SRTM, para depois determinar as localizações que convergem em cada estação. O resultado desse cálculo, realizado no pacote de processamento Grass (versão 8.2.1) é ilustrado na Figura 3.

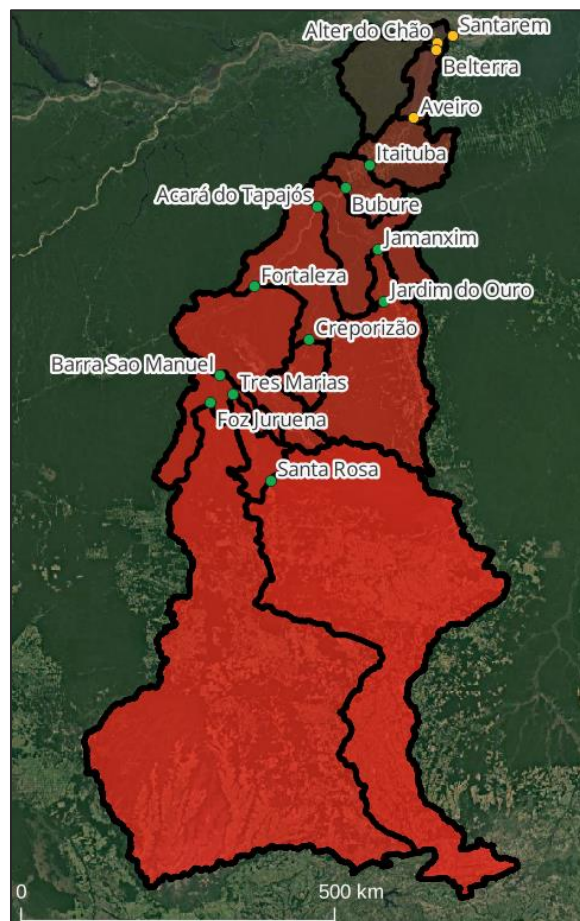


Figura 3 – Resultado do cálculo das bacias de contribuição correspondentes às estações reais e (laranja) e virtuais (verde).

Uma vez determinadas as bacias de contribuição, foram determinadas as áreas afetadas por desmatamento e por mineração em cada uma delas, para todos os anos em que essas informações estariam disponíveis (2008 a 2022 para desmatamento, e 1985 a 2021 para

mineração). Finalmente, calculamos o incremento de cada um desses fatores em cada ano, em termos de densidade (hectares afetados por quilometro quadrado).

O gráfico na Figura 4 permite analisar as tendências da mineração na área de estudo. Podemos estabelecer um momento inicial de forte incidência (1985-1990), uma época de declínio (1990-2006), uma época de aumento (2007-2019) e uma explosão nos últimos 2 anos (2020-2021).

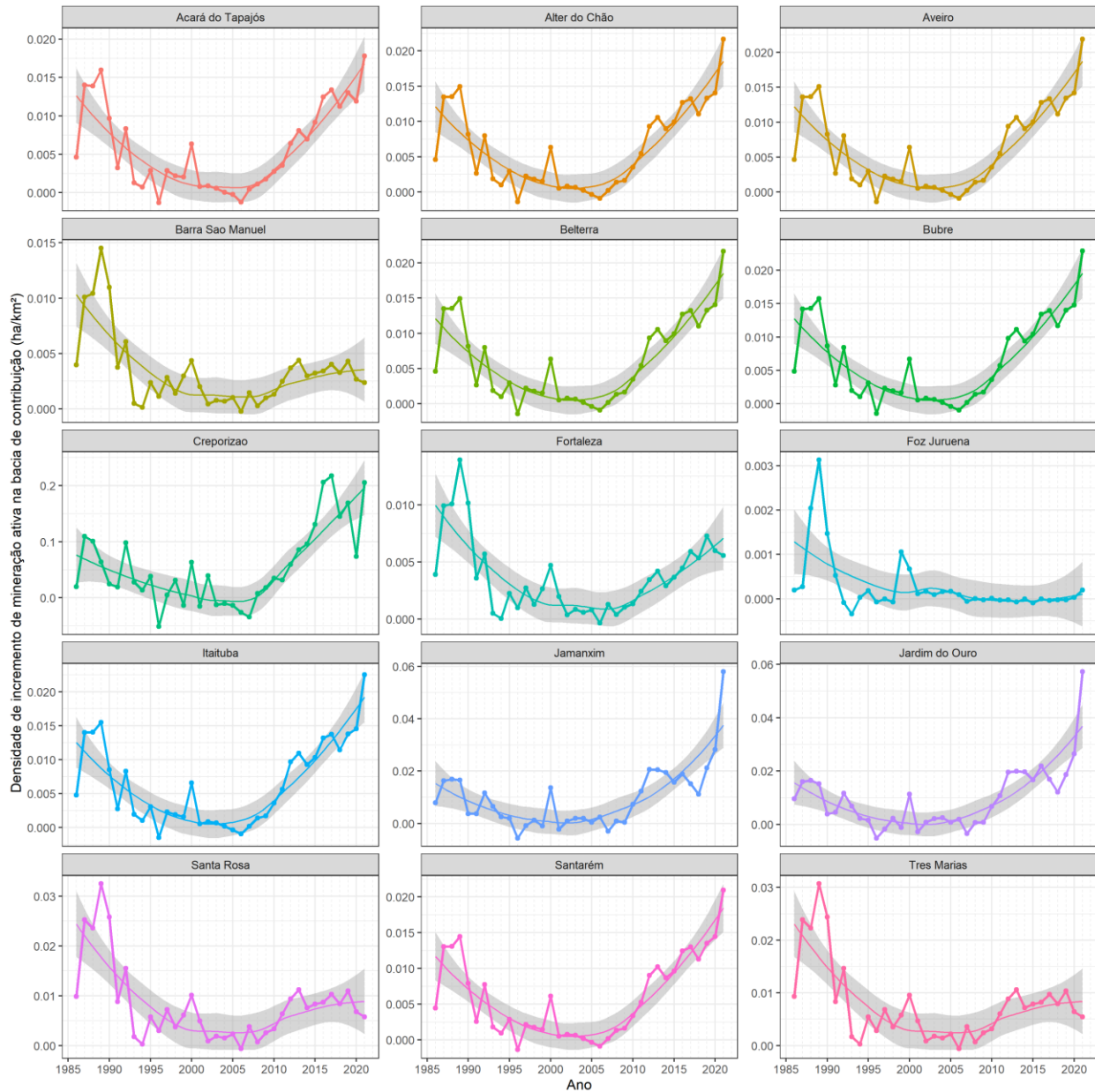


Figura 4 - Incremento anual na área de mineração ativa, em termos de densidade (ha/km²). Dados Mapbiomas, elaboração própria.

Em relação ao desmatamento total, conforme medido pelo programa PRODES do INPE, podemos observar (Figura 5) uma tendência que se reproduz na escala de toda a bacia amazônica: uma forte queda nas taxas até o ano de 2012, e a partir desse momento uma subida constante que aumenta a partir do ano de 2019.

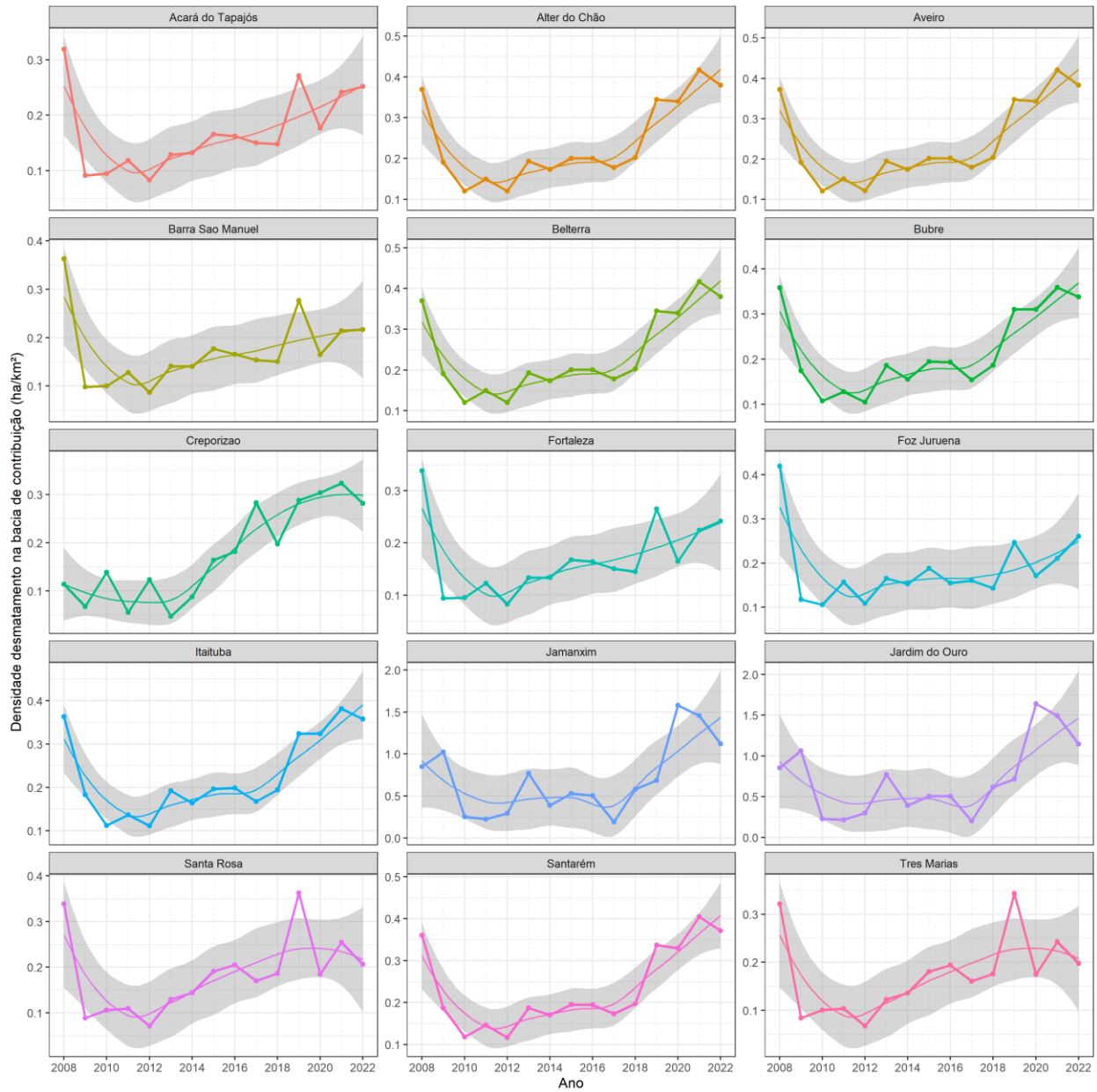


Figura 5 - Incremento anual na área de mineração ativa, em termos de densidade (ha/km²). Dados Mapbiomas, elaboração própria.

4.3 INFERÊNCIA DE DADOS DE QUALIDADE D'ÁGUA A PARTIR DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

A literatura consultada indica que dados de sensoriamento remoto podem auxiliar na inferência de dados relativos à qualidade de águas superficiais. Adicionalmente, estudos na região amazônica e na própria bacia do Tapajós confirmam a validade dessa abordagem (Lobo; Costa: Novo, 2015; Telmer et al., 2006).

4.3.1 Extração dos dados Sentinel-2 na localização das Estações ANA

A extração dos dados de refletância Sentinel-2 foi realizada usando a plataforma Google Earth Engine (GEE), para cada uma das 11 estações utilizadas e para cada uma das medidas de qualidade por elas realizada, seguindo as premissas a seguir:

- As imagens Sentinel-2 são inicialmente processadas para eliminar os pixels afetados pela presença de nuvens ou a sombra delas.
- Para cada medida de qualidade registrada na estação correspondente, é extraído o valor do pixel localizado na coordenada da estação mais próximo temporalmente do dia de realização da amostragem. Distancias temporais de mais de 10 dias foram desconsideradas.
- Para melhorar a qualidade da amostragem, e diminuir os ruídos associados às imagens S2, foi assumida uma resolução de 90 metros.
- Para evitar ruídos associados à amostragem ANA, foram eliminados os valores de turbidez iguais a zero, pois muitos deles correspondiam a amostragens nulas ou não realizadas.

O limite temporal imposto pela disponibilidade de dados Sentinel-2 fez com que unicamente 7 sete estações tivessem os seus dados utilizados no nosso estudo. A Figura 6 apresenta as estações e o número de amostras utilizadas.

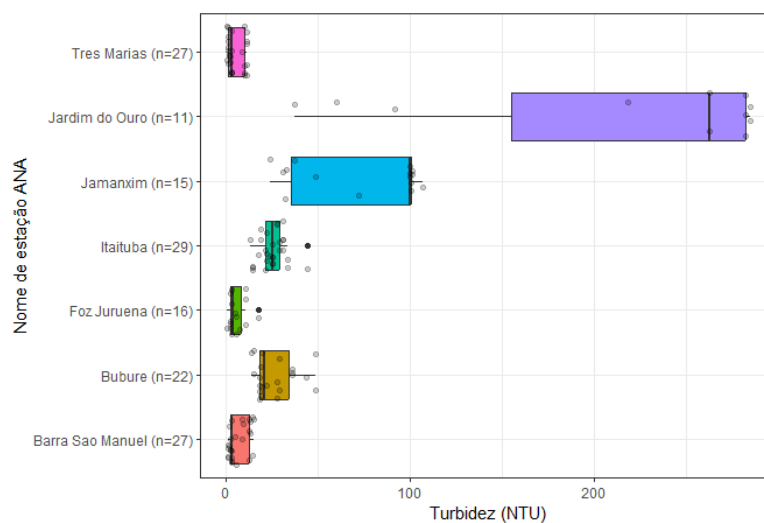


Figura 6 - Distribuição das amostras de turbidez associadas com medidas Sentinel-2 SR utilizadas neste estudo

A Figura 7 a seguir ilustra a distribuição dos valores de refletância no vermelho obtidos nesta fase do estudo.

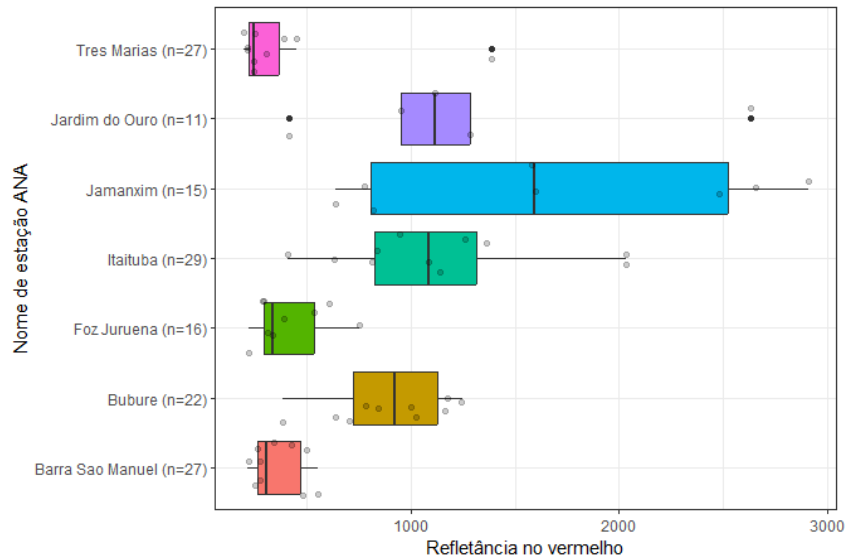


Figura 7 – Box-plot dos valores de refletância no vermelho extraídos das imagens Sentinel-2 SR associadas com medidas de qualidade d’água da ANA utilizadas neste estudo.

4.3.2 Correlação dos valores de refletância extraídos e as medidas de qualidade d’água da ANA
 Uma vez coletadas as amostras S2 pertinentes, foi realizada, com ajuda no pacote R, uma análise estatística da correlação entre os valores de turbidez e os valores de refletância em diferentes comprimentos de onda, e utilizando diferentes combinações de bandas. De forma consistente com a literatura, a melhor correlação foi a obtida combinando linearmente as medidas na banda vermelha (comprimento de onda de 665 nm) com os valores de turbidez. Igualmente, e em concordância com a literatura, foram desconsiderados os valores de turbidez maiores de 200 NTU, por apresentarem saturação no canal vermelho.

A Figura 8 ilustra o resultado deste estudo de correlação. O modelo final, com uma significância estatística $p < 0.001$ estabelece uma correlação muito confiável entre os valores de refletância Sentinel-2 SR, com correção atmosférica, e os valores de turbidez reportados nas estações gerenciadas pela ANA. A equação correspondente a este modelo segue abaixo (1):

$$\hat{T} = 276 \cdot \rho_{surf}(RED) \quad (1)$$

onde \hat{T} é o valor de turbidez inferido, medido em NFU, e $\rho_{surf}(RED)$ é a refletância de superfície no vermelho (comprimento de onda igual a 665 nm).

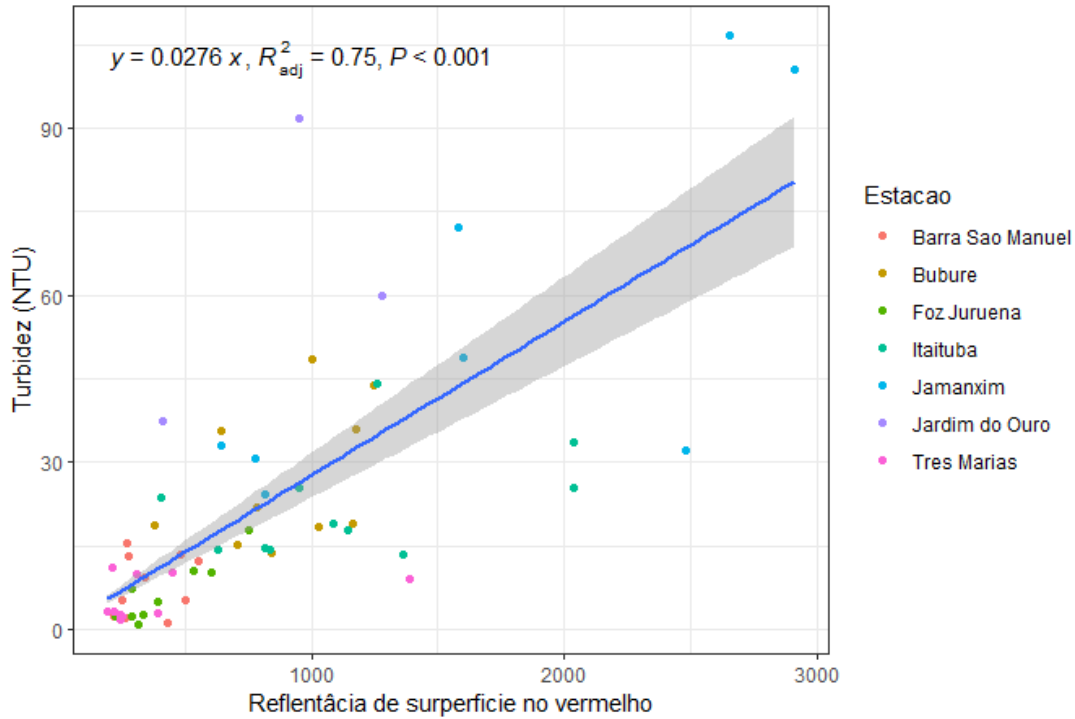


Figura 8 - Correlação estabelecida entre a Turbidez e a refletância no vermelho nas amostras coletadas no estudo.

4.3.3 Inferência de dados TSS a partir de dados dos satélites Landsat

Conforme exposto anteriormente, a literatura científica permite deduzir, mediante a utilização de expressões pré-estabelecidas, parâmetros de qualidade d'água a partir de dados de refletância obtidos de imagens dos satélites Landsat. Especificamente, em Lobo et al. (2015), encontramos a expressão:

$$\rho_{surf}(red) = 2.64 \cdot (TSS - 2.27)^{0.45} \quad (2)$$

onde: $\rho_{surf}(red)$ é a refletância (em %) do canal vermelho dos satélites Landsat, e TSS é o conteúdo de sedimentos sólidos em suspensão, em mg/l.

A qualidade do ajuste apresentado pelos autores ($R^2=0.94$) faz com que seja possível utilizar a expressão (2) para determinar o parâmetro TSS de um determinado corpo d'água na região do R o Tapajós a partir de dados Landsat. Já o uso de imagens Sentinel-2 precisaria de novo ajuste, devido às diferenças entre a calibração e comprimentos de onda usados nos dois sensores.

4.4 EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE D'ÁGUA NAS ESTAÇÕES ESTUDADAS

4.4.1 TSS a partir de dados Landsat

O cálculo das séries anuais de dados de sedimentos em suspensão seguiu os passos a seguir:

1. Extração do valor da banda vermelha Landsat na localização de cada estação, para todas as imagens disponíveis desde 1985 até 2022.
2. Eliminação dos dados contaminados por nuvens ou sombras pela técnica IQR (eliminação de valores superiores ou inferiores a 1.5 vezes a distância interquartil).
3. Conversão refletância-TSS seguindo a expressão (2)
4. Cálculo de médias anuais.

O total de amostras capturadas (etapa 1) foi de 6094, que após a filtragem seguida (etapa 2) foram reduzidas a 5671, isto é, aproximadamente 378 amostras por estação e 10 amostras por estação e ano. O gráfico da Figura 9 reflete os resultados do procedimento de cálculo das médias anuais de TSS para as estações (reais e virtuais) consideradas. Uma análise aprofundada do mesmo permite afirmar que:

- Existe um primeiro período de fortes valores de TSS, registrado em praticamente todas as estações do médio Tapajós e do Jamanxim, que vai até o ano de 1995. Esse período de altos valores coincide com o primeiro forte aumento do garimpo na região, que vai justamente de 1989 até 1995. Esse aumento de sedimentação é registrado em menor medida pelas estações de Aveiro e Belterra, e não aparece de forma significativa nas estações de Alter do Chão e Santarém.
- Após esse primeiro período, registramos claramente um segundo aumento nos valores de TSS nas estações do médio Tapajós e do rio Jamanxim, mais próximas aos focos de garimpo. Esse aumento começa a ser perceptível nas estações do Jamanxim a partir de 2015, mas é a partir de 2020 que o seu efeito é claro no resto de estações de médio Tapajós (Acará, Buburé, Itaituba). De forma análoga à tratada anteriormente, esta segunda 'onda' não produz efeitos significativos no Baixo Tapajós (Belterra, Alter do Chão, Santarém).

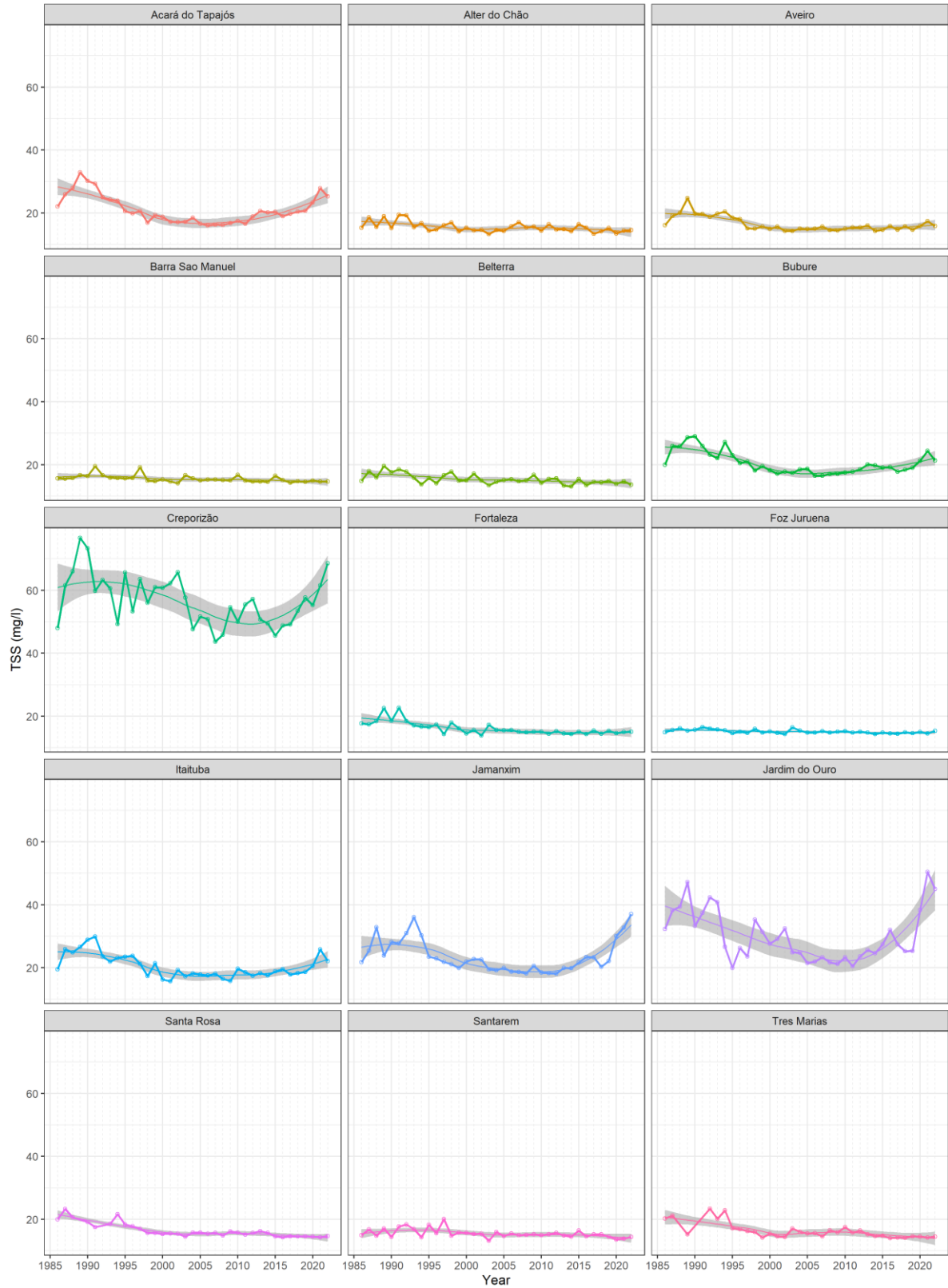


Figura 9 - Evolução dos valores de TSS inferidos a partir de dados Landsat nas estações reais e virtuais estudadas.

4.4.2 Turbidez a partir de dados Sentinel-2

O cálculo dos valores de Turbidez nas estações reais e virtuais se fez de forma similar à especificada anteriormente para os valores de TSS. Inicialmente, foram extraídos os valores de refletância no vermelho de todas as imagens disponíveis nas estações reais e virtuais. O conjunto de mostras inicial somou um total de 5682 amostras, que após tratamento de *outliers* provenientes de nuvens e sombras de nuvens foi reduzido a um conjunto final de 5326 amostras, isto é, 71 amostras por estação e ano.

Uma vez extraídos os valores de refletância, foram calculados os valores de turbidez mediante o uso da equação (1), obtida mediante correlação empírica dos dados de qualidade d'água disponíveis. Devido ao curto intervalo temporal dos dados de refletância Sentinel-2 (início de 2018), não foram calculadas as médias anuais, e sim ajustados modelos não-lineares às séries temporais correspondentes a cada estação, para determinar as tendências de mudança no médio e longo prazo, para além das variações estacionais.

A análise dos resultados das séries temporais de turbidez (Figura 10) permite confirmar as conclusões trazidas pela análise dos dados de TSS calculados a partir de dados Landsat. Isto é, a influência na intensificação do garimpo na região do médio e alto Tapajós é sentida nas regiões próximas às áreas de exploração, sem afetar sensivelmente a região do baixo Tapajós. Pode-se até inferir uma leve queda nos índices de poluição nas estações de Santarém e Alter do Chão.

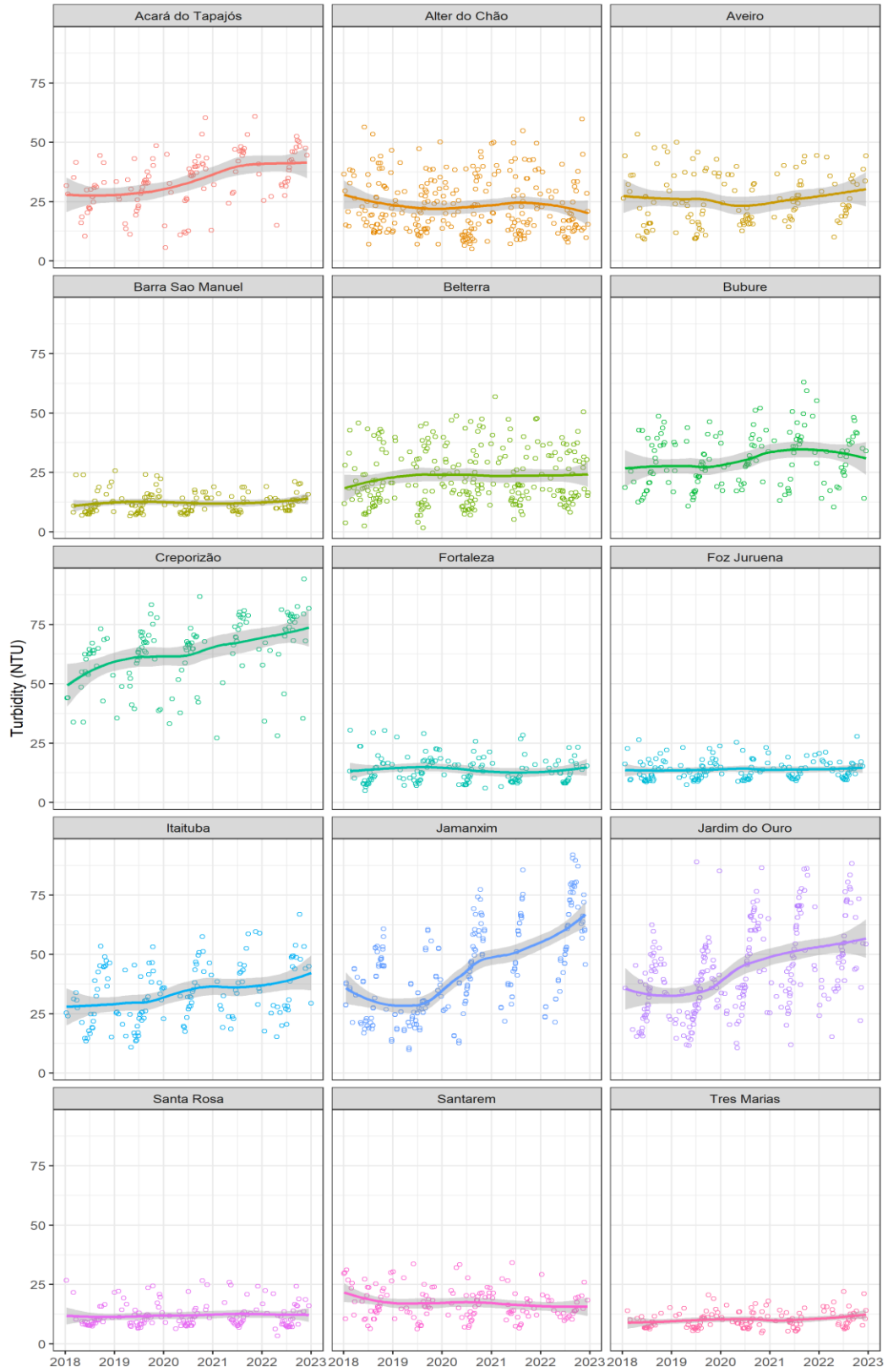


Figura 10 - Evolução dos valores de turbidez inferidos a partir de dados Sentinel-2 nas estações reais e virtuais estudadas.

4.5 RELAÇÃO TEMPORAL ENTRE VETORES DE DEGRADAÇÃO E QUALIDADE D'ÁGUA

Após a obtenção inferência de todos os valores pertinentes ao presente trabalho, foi iniciado um processo de exploração de dados, que objetiva determinar as relações estatisticamente significativas entre os dados de qualidade d'água e os dados de degradação das bacias de contribuição correspondentes.

O trabalho de exploração de dados, realizado com ajuda do pacote estatístico R, incluiu:

- Tentativas de correlação de todas as variáveis disponíveis, de forma global e regionalizada
- Exclusão de *outliers* e dados considerados anômalos no contexto de cada análise
- Análise de *lag* (correlação de uma variável com outras variáveis deslocadas em tempo)

Os resultados mais satisfatórios foram obtidos mediante a análise sistemática de correlação a nível regional, separando as diferentes regiões da bacia: Alto, Médio e Baixo Tapajós. Vale a pena destacar que a exploração de minério se concentra na região do médio Tapajós. A Figura 11 e a Figura 12 mostram os resultados mais significativos desse trabalho. A partir da análise aprofundada desses dados, podemos concluir que:

- Existe uma correlação positiva e significativa ($p < 0.05$, $R^2 > 0.7$ para a turbidez) entre a poluição d'água, expressada em termos de Turbidez e sedimentos em suspensão (TSS) e a ocorrência de mineração na região mais afetada pelo garimpo (médio Tapajós).
- A correlação entre mineração e poluição é menos evidente em outras regiões (Baixo e Alto Tapajós)
- A correlação entre desmatamento global e poluição d'água é significativa no Médio Tapajós, mas não parece tão forte quanto a correlação associada à mineração. No resto de regiões essa correlação não parece existir.

Esses resultados são consistentes com a análise qualitativa dos dados das séries históricas realizado na seção anterior.

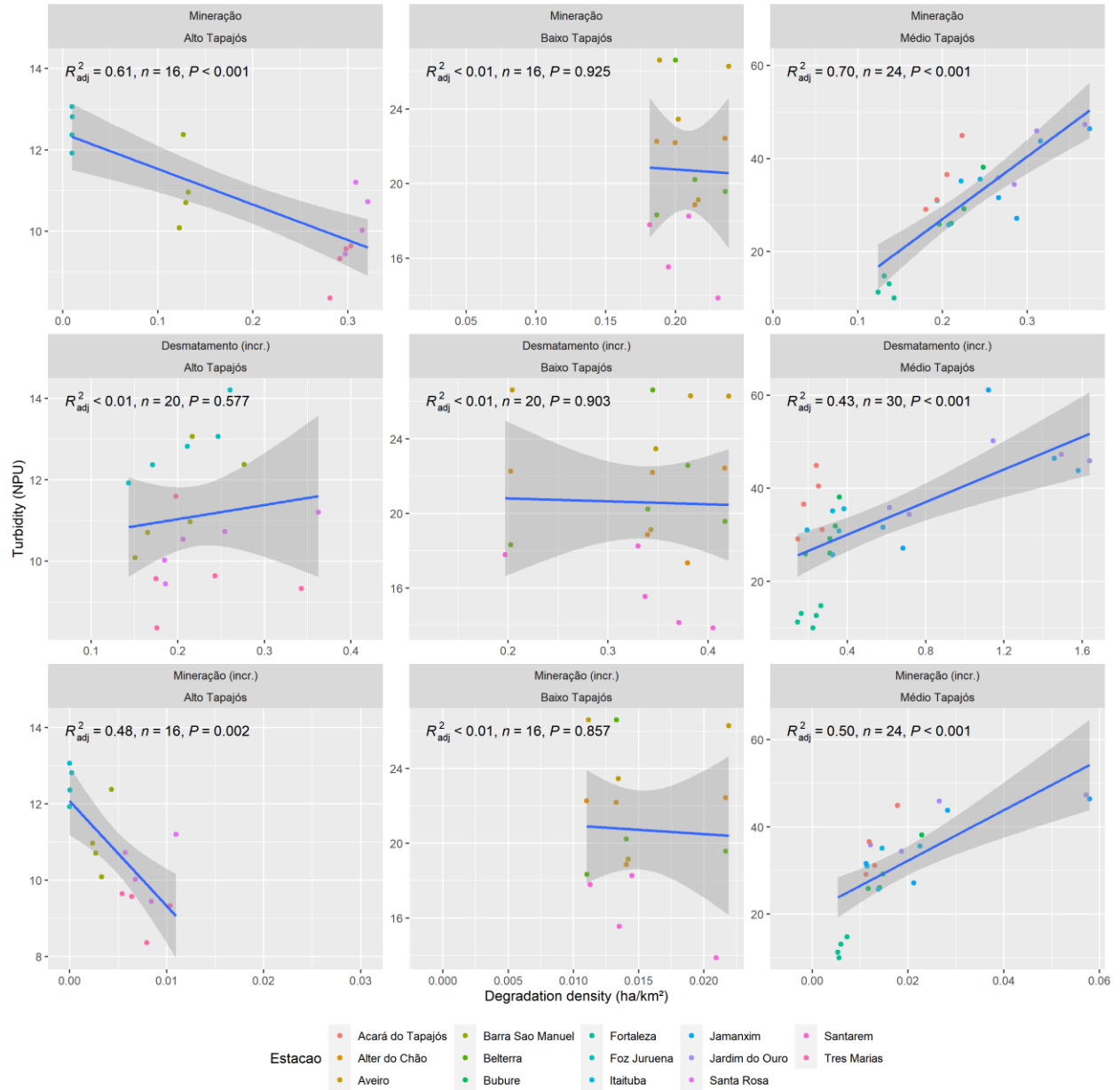


Figura 11 - Correlações regionais dos vetores de degradação com a Turbidez.

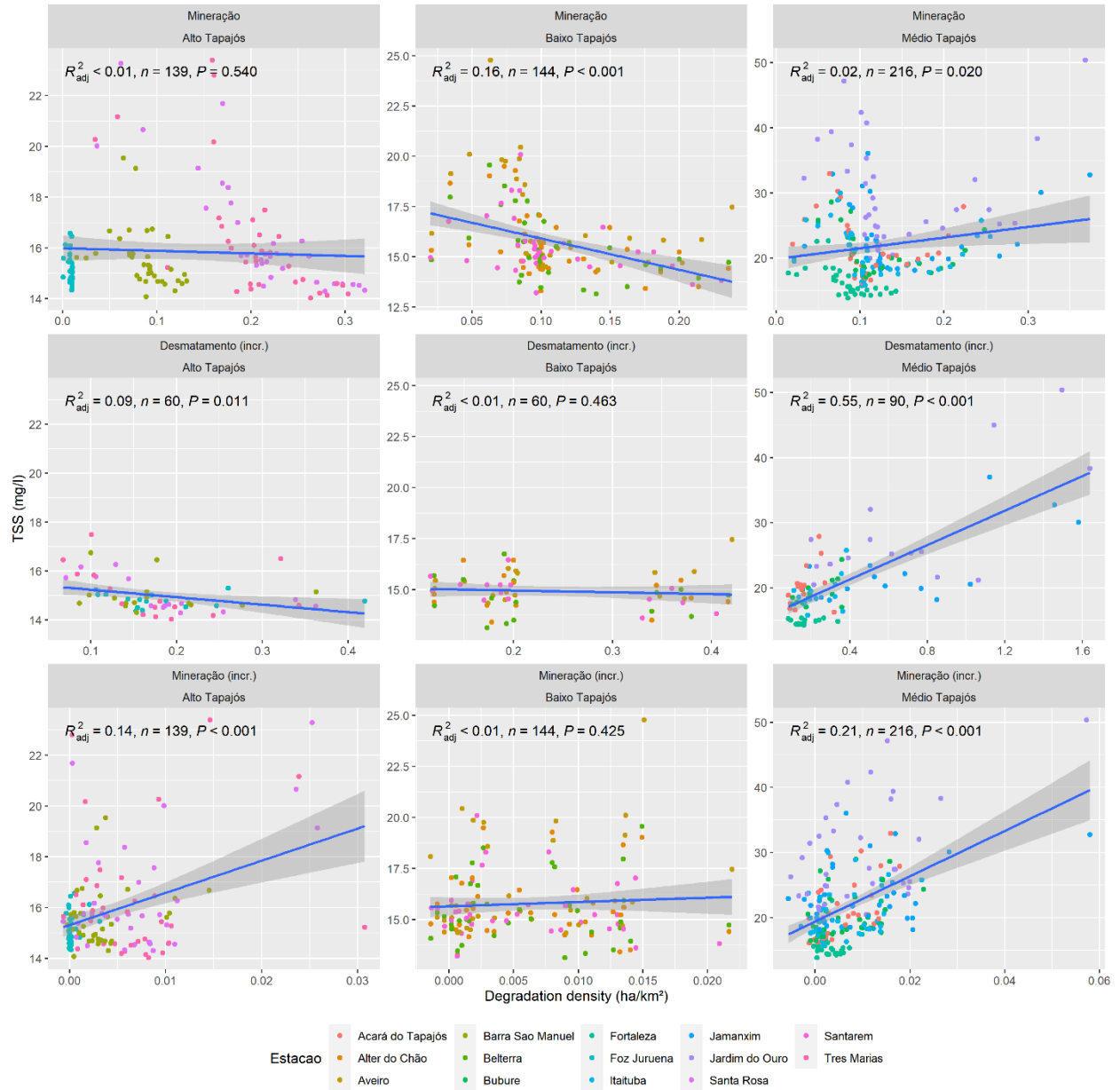


Figura 12 - Correlações regionais dos vetores de degradação com o conteúdo de sedimentos em suspensão (TSS).

5 CONCLUSÕES

O presente estudo objetivou determinar a possível correlação espacial e temporal entre a degradação da qualidade d'água da bacia do Rio Tapajós e a evolução das atividades de degradação ambiental na região. Para tal, foram extraídos e/ou inferidos valores de turbidez e de quantidade de sedimentos em suspensão (TSS) em 15 diferentes localizações da bacia, durante um intervalo de tempo abrangente (1985-2021 para TSS e 2008-2022 para a turbidez). Esses valores foram comparados com as séries temporais que refletem a evolução do desmatamento e da mineração na região.

A análise qualitativa dessas séries temporais permitiu inferir que a influência das atividades de mineração é mais importante, para a qualidade d'água, do que as atividades genéricas de desmatamento. Também foi possível visualizar a abrangência desta influência, que está limitada geograficamente.

A análise estatística dos dados coletados e inferidos permitiu afirmar com maior segurança que existe uma correlação forte e significativa entre a poluição por sedimentos das águas da bacia do rio Tapajós e as atividades de mineração. Porém, esta correlação está limitada à região de incidência da mineração, e não podemos afirmar que as áreas afastadas do foco da atividade sejam afetadas por ela.

Assim sendo, e perante as evidências recentes de contaminação por mercúrio das populações do baixo Tapajós, sugerimos a ampliação do escopo disciplinar do presente estudo. Com efeito, uma vez determinado que não existe um transporte de sedimentos significativo entre os focos de mineração e as áreas mais afastadas a jusante deles, é necessário determinar quais são os mecanismos de transporte dos contaminantes. Para tal, seria recomendável o uso de técnicas biofísica e bioquímicas, que poderiam auxiliar na determinação da prevalência dos contaminantes na cadeia trófica do ambiente fluvial e a sua interferência com o consumo humano.

6 REFERÊNCIAS

Dodds, W. K.; Whiles, M. R. 2010. Freshwater ecology: concepts and environmental applications. Academic Press.

Freitas, P. T. A.; Asp, N. E.; Souza-Filho, P. W. M.; Nittrouer, C. A.; Ogston, A. S.; da Silva, M. S. 2017. Tidal influence on the hydrodynamics and sediment entrapment in a major Amazon River tributary – Lower Tapajós River. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 189-201. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2017.08.005>

Fricke, A. T.; Nittrouer, C. A.; Ogston, A. S., Nowacki, D. J.; Asp, N. E.; Souza Filho, P. W. M.; da Silva, M. S.; Jalowska, A.M. 2017. River tributaries as sediment sinks: Processes operating where the Tapajós and Xingu rivers meet the Amazon tidal river. *Sedimentology*, 64: 1731-1753. <https://doi.org/10.1111/sed.12372>

Lobo, F. L.; Costa, M. P. F.; Novo, E. M. L. M. 2015. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sensing of Environment*, 157(0), 170-184. doi:10.1016/j.rse.2014.04.030.

Lobo, F. L.; Costa, M.; Novo, E. M.; Telmer, K. 2017. Effects of Small-Scale Gold Mining Tailings on the Underwater Light Field in the Tapajós River Basin, Brazilian Amazon. *Remote Sens*, 9, 861.

Marinho, R. R.; Harmel, T.; Martinez, J. M.; Filizola Junior, N. P. 2021. Spatiotemporal Dynamics of Suspended Sediments in the Negro River, Amazon Basin, from In Situ and Sentinel-2 Remote Sensing Data. *ISPRS, Int. J. Geo-Inf.* 10, 86. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020086>

Molina, L. (org.). 2023. Terra rasgada: como avança o garimpo na Amazônia brasileira. Conselho Político Aliança em Defesa dos Territórios, Brasília. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/o3d00050.pdf>

Telmer, K.; Costa, M.; Simões Angélica, R.; Araujo, E. S.; Maurice Y. 2006. The source and fate of sediment and mercury in the Tapajós River, Pará, Brazilian Amazon: Ground- and space-based evidence. *J Environ Manage.* 2006 Oct;81(2):101-13. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.09.027. Epub 2006 Jul 7. PMID: 16824670

Veiga, M. M.; Silva, A. R.; Hinton, J. J. 2002. O garimpo de ouro na Amazônia: aspectos tecnológicos, ambientais e sociais. In: Trindade, R. B. E.; Barbosa Filho, O. *Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: CETEM, p. 267-295.