



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



FILIPE DE ARAUJO OLIVEIRA

**ANÁLISE HIDROSEDIMENTAR DA REGIÃO DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS
JAPURÁ E SOLIMÕES – AM**

MANAUS-AM
2025

FILIPPE DE ARAUJO OLIVEIRA

**ANÁLISE HIDROSEDIMENTAR DA REGIÃO DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS
JAPURÁ E SOLIMÕES – AM**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal do Amazonas como requisito final para obtenção ao título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Domínios da Natureza da Amazônia

Rogério Ribeiro Marinho
Orientador

MANAUS-AM
2025

Ficha Catalográfica

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

O48a Oliveira, Filipe de Araujo
Análise hidrossedimentar da região de confluência dos rios
Japurá e Solimões – AM / Filipe de Araujo Oliveira. - 2025.
95 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Rogério Ribeiro Marinho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Manaus, 2025.

1. Sedimentos suspensos. 2. Mamirauá. 3. Paraná Aranapu. 4.
Anabranching. I. Marinho, Rogério Ribeiro. II. Universidade Federal
do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III.
Título

FILIPPE DE ARAUJO OLIVEIRA

ANÁLISE HIDROSEDIMENTAR DA REGIÃO DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS
JAPURÁ E SOLIMÕES – AM

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Filosofia, Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal do Amazonas como requisito final para obtenção ao título de Mestre em Geografia. Área de Concentração: Domínios da Natureza da Amazônia

Aprovado em 09 de junho de 2025

Banca Examinadora:

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

1º Avaliador: Prof. Dr. João Cândido André da Silva Neto
(Universidade Federal do Amazonas - UFAM)

2º Avaliador: Prof. Dr. Flávio Wachholz
(Universidade do Estado do Amazonas - UEA)

**MANAUS-AM
2025**

AGRADECIMENTOS

Ao concluir mais uma etapa tão significativa da minha vida acadêmica e pessoal, é impossível não voltar o olhar para todas as pessoas que, de alguma forma, caminharam ao meu lado nessa jornada. Expresso, antes de tudo, minha eterna gratidão à minha família, que sempre foi meu alicerce.

Agradeço à CAPES pela bolsa concedida, à FAPEAM (Edital N. 001/2023 - UNIVERSAL - FAPEAM 20 ANOS) e ao Grupo de Pesquisa em Geociências do Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (Ayan, Fabrício, André Zumak e Debora) pelo apoio as coletas de dados em campo. Ao Centro de Hidrografia e Navegação do Noroeste (CHN9) da Marinha do Brasil pelo apoio a coleta de dados em 2023.

A minha mãe, Maria Bezerra de Araujo, agradeço profundamente pelo amor incondicional, pelos ensinamentos diários e pela força silenciosa que sempre me inspirou a continuar, mesmo nos momentos mais difíceis. Às minhas irmãs, com carinho especial à Kátia de Araujo Oliveira e Cleone de Araujo Oliveira, minha sincera gratidão pelo apoio constante.

A minha namorada, que esteve presente em cada passo dessa reta final, meu amor e minha gratidão. Seu carinho e, principalmente, seu incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Obrigado por acreditar em mim.

Aos meus amigos, que trago desde a graduação e que se fortaleceram no mestrado, deixo meu agradecimento afetuoso por tantos momentos de parceria, troca e acolhimento. Gabriel Vinícius, Romário Henrique, Lucas Almeida, Larissa Kristyne, Kamyla Rosa, Ilma Farias e Maria Mayara: cada conversa, cada ajuda espontânea, cada risada e cada desabafo foi combustível para manter-me firme nessa caminhada. Nossos laços ultrapassam os muros da universidade e ocupam um lugar permanente no meu coração.

E ao meu professor orientador, agradeço a oportunidade de ter vivido momentos únicos ao longo desta formação, especialmente durante os campos, que abriram minha mente e ampliaram minha forma de ver o mundo e a pesquisa. Sou profundamente grato pelos momentos em que demonstrou compreensão e sensibilidade diante das minhas

dificuldades. Seu apoio, generosidade e paciência fizeram a diferença no meu percurso acadêmico e pessoal.

A todos vocês, minha mais sincera e emocionada gratidão. Este trabalho não é só meu é reflexo de cada gesto de amor, de cuidado, de presença. Ele carrega um pouco de cada um de vocês.

ANÁLISE HIDROSSEDIMENTAR DA REGIÃO DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS JAPURÁ E SOLIMÕES – AM

RESUMO

A complexidade geomorfológica da confluência entre os rios Solimões e Japurá, particularmente na região do Paraná do Aranapu, apresenta desafios para a delimitação precisa da foz do rio Japurá. Esta pesquisa investigou a dinâmica hidrossedimentar dessa confluência, testando a hipótese de que o canal a jusante do Paraná do Aranapu constitui, sob perspectiva hidrossedimentar, um canal secundário do rio Solimões. A metodologia integrou três abordagens complementares: (i) análise de imagens MODIS (2003-2024) para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS); (ii) caracterização espectral in situ das águas mediante espectrorradiometria de campo; e (iii) análise de séries históricas de dados hidrológicos (níveis fluviais e precipitação) fornecidos pela ANA e satélite TRMM. O processamento envolveu correlações estatísticas, análises espaciais e construção de séries temporais através de sistemas de informações geográficas. Os resultados demonstraram que o rio Solimões exerce controle dominante sobre o regime hidrossedimentar do baixo Japurá a jusante do Paraná do Aranapu, particularmente durante o período de cheia (dezembro a março). As assinaturas espectrais revelaram padrões distintos: enquanto o Japurá a montante do Aranapu mantém características próprias de águas pretas, o trecho a jusante apresenta assinatura espectral análoga à do Solimões, com elevada reflectância nas bandas de 550-700 nm correlacionada aos altos valores de CSS. A correlação entre os dados de CSS dos trechos Solimões Jusante e Japurá Jusante ($R^2 = 0,92$) corrobora esta influência hidrossedimentar. As evidências obtidas indicam que, do ponto de vista hidrossedimentar, a foz efetiva do rio Japurá localiza-se a montante do Paraná do Aranapu, configurando o canal a jusante como parte integrante do sistema Solimões. Esta constatação transcende a questão cartográfica, apontando para a necessidade de revisão conceitual sobre a definição de "foz" em sistemas fluviais multicanais de planícies aluviais amazônicas, onde as zonas de confluência constituem espaços dinâmicos de transição controlados pela sazonalidade hidrológica. A pesquisa demonstra o potencial do sensoriamento remoto integrado a dados de campo como ferramenta fundamental para a compreensão da complexa geomorfologia fluvial amazônica.

Palavras-Chaves: Sedimentos suspensos; Mamirauá; Paraná Aranapu; Anabranching.

HYDROSEDIMENTARY ANALYSIS OF THE CONFLUENCE OF THE JAPURÁ AND SOLIMÕES RIVERS - AM

ABSTRACT

The geomorphological complexity of the confluence between the Solimões and Japurá rivers, particularly in the Paraná do Aranapu region, presents significant challenges for accurately delineating the Japurá River mouth. This research investigated the hydrosedimentary dynamics of this confluence zone, testing the hypothesis that the channel downstream of Paraná do Aranapu constitutes, from a hydrosedimentary perspective, a secondary channel of the Solimões River system. The methodology integrated three complementary approaches: (i) analysis of MODIS imagery (2003-2024) to estimate suspended sediment concentration (SSC); (ii) in situ spectral characterization of water bodies using field spectroradiometry; and (iii) analysis of historical hydrological time series (river stages and precipitation) provided by the Brazilian National Water Agency (ANA) and TRMM satellite data. Data processing involved statistical correlations, spatial analyses, and time series construction through geographic information systems. Results demonstrated that the Solimões River exerts dominant control over the hydrosedimentary regime of the lower Japurá downstream of Paraná do Aranapu, particularly during the flood season (December to March). Spectral signatures revealed distinct patterns: while the Japurá upstream of Aranapu maintains its characteristic black water properties, the downstream reach exhibits spectral signatures analogous to those of the Solimões, with high reflectance in the 550-700 nm bands correlated with elevated SSC values. The correlation between SSC data from the Downstream Solimões and Downstream Japurá sections ($R^2 = 0.92$) corroborates this hydrosedimentary influence. The evidence obtained indicates that, from a hydrosedimentary standpoint, the effective mouth of the Japurá River is located upstream of Paraná do Aranapu, with the downstream channel functioning as an integral component of the Solimões system. This finding transcends mere cartographic considerations, highlighting the need for conceptual revision of how "river mouth" is defined in multichannel fluvial systems within Amazonian alluvial plains, where confluence zones constitute dynamic transitional spaces controlled by hydrological seasonality. This research demonstrates the potential of remote sensing integrated with field data as a fundamental tool for understanding the complex Amazonian fluvial geomorphology.

Keywords: fluvial geomorphology, suspended sediments; Mamirauá; Paraná Aranapu; Anabranching.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CDOM – Matéria Orgânica Dissolvida Colorida

CSS – Concentração de Sedimentos em Suspensão

IDSMM – Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá

LIS – Sensor de imagem de raios

MODIS – Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada

NASA – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço

NTU – Unidades Nefelométricas de Turbidez

OLI – Imageador terrestre operacional

OMM – Organização Meteorológica Mundial

PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa

POA – Propriedades Ópticas Aparentes

POI – Propriedades Ópticas Inerentes

PR – Radar de precipitação

RDSM – Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá

REM – Radiação Eletromagnética

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

Rrs – Reflectância de Sensoriamento Remoto

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

TMI – TRMM Gerador de imagens de micro-ondas

TRMM – Missão de Medição de Precipitação Tropical

TSS – Totais Sólidos Suspensos

UV – Ultravioleta

VIIRS – Conjunto de Radiômetros de Imagem no Infravermelho Visível

VIRS – Scanner visível e infravermelho

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização da Área de Estudo.....	19
Figura 2 - Resolução espaciais de sensores.....	33
Figura 3 - Reflectância de alvos pelo sensor MODIS, Landsat-8, Sentinel-2 e Planet....	34
Figura 4 - Configuração esquemática de sensores para medidas in situ	38
Figura 5 - Espectro da Radiação Eletromagnética – REM	39
Figura 6 - Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d'água) e sensor orbital	41
Figura 7 - Mapa de Localização das Seções de Coleta CSS, Cota e Precipitação.....	50
Figura 8 - Espectrorradiômetros TriOS.	51
Figura 9 - Espectrorradiômetros instalado para medição.....	52
Figura 10 – Operação do Espectrorradiômetro.	52
Figura 11 - Procedimentos tomados em campo.....	53
Figura 12 - Garrafa com amostra de água coletada.....	54
Figura 13 - Tipos de Color de água na área de estudo.	54
Figura 14 - Mapa de Localização das seções de coleta e medições da 2ª campanha. .	56
Figura 15 - Dificuldade e impossibilidade de acesso aos pontos de medição e coleta ..	57
Figura 16 - Precipitação de média mensal dos rios Japurá e Solimões entre 2003 e 2017.	59
Figura 17 - Gráfico de dispersão da precipitação de média mensal dos rios Japurá e Solimões entre 2003 a 2017.....	60
Figura 18 - Níveis dos rios normalizados da Estação Maraã (Rio Japurá); Estação Acanauí (Rio Japurá) e Fonte boa (Rio Solimões) entre 2003 a 2017.	61
Figura 19 – Correlação das Cotas dos rios (A) Estação Maraã (Rio Japurá) e Fonte Boa; (B) Estação Acanauí (Rio Japurá) e Estação Maraã (Rio Japurá); (C) Fonte boa (Rio Solimões) e Estação Acanauí (Rio Japurá).....	62
Figura 20 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de Combinação precipitação e nível do rio normalizado da Estação de Maraã (Rio Japurá) entre 2003 a 2017.	63
Figura 21 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre precipitação e nível do rio normalizado da Estação de Fonte Boa (Rio Solimões) entre 2003 a 2017.	64
Figura 22 - Variabilidade média mensal da Concentração de Sedimentos Suspenso – CSS de 2003 a 2017.	65
Figura 23 – Gráfico de dispersão da CSS A) Japurá Montante e Solimões Montante; B) Japurá Montante e Japurá Jusante; C) Japurá Montante e Solimões Jusante; D) Solimões Montante e Solimões Jusante; E) Japurá Jusante e Solimões Montante F) Japurá Jusante e Solimões Jusante.....	66
Figura 24 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre precipitação estação Fonte Boa e CSS Solimões montante entre 2003 a 2017.	68

Figura 25 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre precipitação estação Maraã e CSS Japurá Montante entre 2003 a 2017.	68
Figura 26 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre precipitação estação Fonte Boa e CSS Japurá Montante entre 2003 a 2017.	69
Figura 27 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre nível do rio normalizado da Estação de Maraã (Rio Japurá) e CSS Japurá Montante 2003 a 2017.....	70
Figura 28 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre nível do rio normalizado da Estação de Maraã (Rio Japurá) e CSS Japurá Jusante 2003 a 2017.	70
Figura 29 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre nível do rio normalizado da Estação de Acanauí (Rio Japurá) e CSS Japurá Montante 2003 a 2017.....	71
Figura 30 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre nível do rio normalizado da Estação de Acanauí (Rio Japurá) e CSS Japurá Jusante 2003 a 2017.	72
Figura 31 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de Combinação entre nível do rio normalizado da Estação Fonte Boa (Rio Solimões) e CSS Solimões Montante – CSS de 2003 a 2017.	73
Figura 32 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de Combinação entre nível médio d'água mensal normalizado da Estação Fonte Boa (Rio Solimões) e CSS Japurá Jusante de 2003 a 2017.....	73
Figura 33 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de Combinação entre nível médio d'água mensal normalizado na Estação Fonte Boa (Rio Solimões) e CSS Solimões Jusante de 2003 a 2017.	74
Figura 34 – Perfil longitudinal da CSS (média mensal) entre a entre os rios Japurá e Solimões.....	75
Figura 35 - Perfil longitudinal da CSS entre a entre os rios Japurá e Solimões nos meses de águas altas (vermelho) e baixas (azul).	76
Figura 36 - Perfil longitudinal da CSS da entre as seções Solimões Montante e Jusante.	77
Figura 37 - Perfil de CSS entre as seções do Paraná Aranapú a montante e jusante do Rio Japurá.	78
Figura 38 - Espacialização da Estimativa de Concentração de Sedimentos Suspenso – CSS. Fonte: Fassoni-Andrade e Paiva, 2019. Elaboração: autor.....	79
Figura 39 - Confluência do rio paraná do Aranapu e rio Japurá na região oeste da Amazônia: a) Dezembro de 2014 e b) Junho de 2015. A sazonalidade do nível d'água se reflete na composição da água e na mistura de água desses dois rios.	80
Figura 40 - Seções de CSS dezembro 2023 (águas baixas) e Julho 2024 (águas altas)	81

Figura 41 – Média das Assinaturas espectrais das águas nos rios Solimões e Japurá observadas entre 2023 e 2024.....	82
Figura 42 - Reflectância dos Rio Japurá e Solimões em dezembro de 2023 (águas baixas).....	83
Figura 43 - Reflectância dos Rio Japurá e Solimões em julho – 2024 (águas altas).....	84
Figura 44 - Relação entre CSS e a razão de bandas do infravermelho e vermelho (NIR/RED) .	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos Maiores Rios do Mundo em Descarga de Sedimentos	29
Tabela 2 - Faixa de Espectro da REM.	32
Tabela 3 - Resoluções Espectrais e Espaciais dos sensores MODIS e OLI.....	33
Tabela 4 - Informações dos de Cota do Rio Solimões e Japurá.	48
Tabela 5 – Seção da CSS com dados MODIS.....	50
Tabela 6 - Valores e interpretação do coeficiente da correlação de Pearson	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resoluções Sensor MODIS	37
Quadro 2 - Obtenção de dados e Processamento	47
Quadro 3 - Seções da campanha - 2023	55
Quadro 4 - Seções das campanhas - 2024	55

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
OBJETIVOS	21
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
1.1 Geomorfologia Fluvial	22
1.2 Erosão e Transporte de Sedimentos.....	23
1.3 Dinâmica Hidrossedimentar nos rios Amazônicos	25
1.3 Tipos de Rios Amazônicos.....	28
1.4 Sensoriamento Remoto	30
1.4.1 Resoluções	32
1.4.2 Sensores.....	35
1.5 Sensoriamento Remoto da Água	37
1.6 Estudos do transporte de sedimentos nos Rios da Amazônia com sensoriamento remoto.....	42
2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	44
2.1 Área de Estudo	44
2.2 Material e Métodos.....	46
2.2.1 Precipitação e Cota do Rio.....	48
2.2.2 Sensoriamento Remoto Orbital.....	49
2.2.3 Sensoriamento Remoto de Campo e Coleta de Amostras de água	51
2.2.3 Análise dos dados.....	57
3 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	59
3.1 Precipitação dos Rios Solimões e Japurá.....	59
3.2 Cotas dos rios Solimões e Japurá.....	60
3.2.1 Relação entre cotas dos rios e precipitação	63
3.3 Variabilidade da Concentração de Sedimentos Suspenso	64
3.3.1 Relação de CSS e Precipitação.....	67
3.3.2 Relação de CSS e Cota.....	69
3.3.3 Distribuição espacial da CSS.....	74
.....	80
Fonte: Barbosa et al. (2019)	80
Fonte: Barbosa et al., 2019.....	80

3.4 Concentração de Sedimentos Suspensos in situ	80
3.5 Assinatura Espectral da água dos rios Japurá e Solimões	81
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICE A – Stories Maps do Campo na Reserva Mamirauá	95

INTRODUÇÃO

A bacia do Rio Amazonas destaca-se por ser uma bacia transcontinental, com vazão média anual superior a 200.000 m³/s (Stevaux e Latrubesse, 2017). A vazão e a precipitação são importantes fatores que controlam o regime de transporte de sedimentos, processo geomorfológico que atua como modelador da bacia. O aumento da precipitação, por exemplo, pode resultar na intensificação de erosão, culminando no aumentando da carga sedimentar transportadas pelos canais fluviais devido a um maior escoamento superficial e a velocidade das águas. A média anual de precipitação na Bacia Amazônica é de cerca de 2300 mm por ano, segundo Figueroa e Nobre (1990) e as variações de precipitação e umidade ocorrem por influência dos sistemas atmosféricos atuantes na região.

A cordilheira dos Andes é a principal fonte de sedimentos para os rios da bacia Amazônica (Bicudo, 2017). No trajeto do rio Amazonas, desde as regiões montanhosas até a sua foz, ocorrem processos dinâmicos de transporte, deposição e erosão, conforme destacado por Filizola e Guyot (2011). Esses processos não apenas moldam a paisagem fluvial, mas também desempenham papel crítico na exportação de matéria em suspensão para os oceanos.

Estimativas indicam um alto volume de sedimentos transportado em suspensão nos rios da Amazônia brasileira. A quantidade de sedimentos que o rio Amazonas carrega (900×10^6 ton.ano⁻¹), é a segunda maior do mundo, ficando atrás apenas do rio Brahmaputra na Ásia (1.670×10^6 ton.ano⁻¹), conforme Stevaux e Latrubesse (2017).

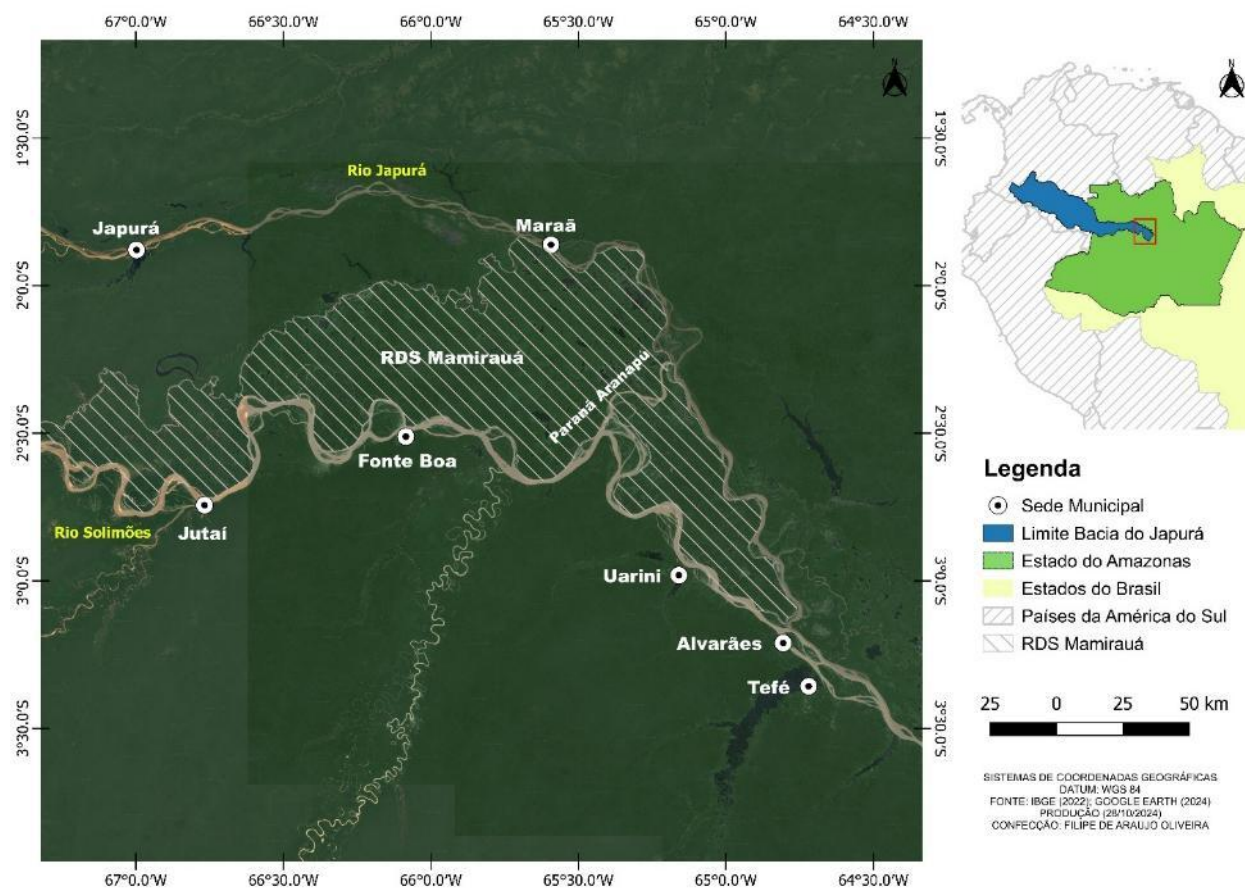
A vazão média anual do rio Japurá é de 18.600 m³/s (Latrubesse, 2008). Com esse volume, o Japurá pode ser classificado como um mega-rio, definição aplicada a rios com vazão média anual superior a 17.000 m³/s, conforme proposto por Latrubesse (2008). O rio apresenta um canal do tipo anabranching ou multicanal, caracterizado por sua complexa morfologia. Esse tipo de sistema fluvial é composto por diversos canais aluviais interligados, separados por grandes ilhas de sedimentos, que segmentam o fluxo e conferem ao rio uma dinâmica única (Gon, 2012).

Os rios de água branca, como o Solimões e o Japurá, apresentam uma coloração diretamente influenciada pela geologia das áreas que compõem suas bacias de drenagem. Nas serranias localizadas nos Andes existem o acúmulo de detritos não

consolidados de eras glaciais que são erodidos e transportados da cabeceira para a região de baixa amazônica (Sioli, 1985).

A região de confluência dos rios Solimões e Japurá (Figura 1), possui uma rede hidrográfica complexa, em que ambos são conectados pelo Paraná Aranapu, na região da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá - RDSM. O canal do Japurá a jusante desse paraná, a depender do período do ano, apresenta características hidrossedimentares do rio Japurá e em outro período do rio Solimões.

Figura 1 - Mapa de Localizao da área de Estudo.



Elaborao: Autor

A hipótese lançada  que o curso fluvial a jusante do Paraná Aranapu é um canal secundário do rio Solimões. Assim, por se tratar de uma região de hidrografia complexa,  necessário fazer uso de ferramentas de campo e das geotecnologias para delimitar a

zona de mistura das águas dos rios Solimões e Japurá, situando a atual foz do rio Japurá e a zona de mistura de águas entre estes grandes rios.

Para a análise de sedimentos suspensos e de precipitação na região Amazônica, especificamente a bacia hidrográfica dos rios Solimões e Japurá, é necessário dispor de dados. No entanto, a Amazônia é uma região que possui dados hidrológicos e climáticos de baixa densidade espacial e temporal, dificultando as pesquisas nessa região (Nobre et al., 2009).

Para obter dados que permitam os monitoramentos hidrológicos e climáticos são necessários instrumentos adequados de coleta. No caso da região Amazônica há uma rede de monitoramento de pluviômetros com uma densidade abaixo do que é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial - OMM (Oliveira e Andrade, 2010). Portanto, o uso de dados do sensoriamento remoto é indispensável para a pesquisa nos grandes rios da Amazônia. O uso imagem de satélites permite avanços nas pesquisas hidrológicas na região da Amazônica.

A justificativa do trabalho encontra-se necessidade da maior compreensão dos processos hidrossedimentares complexos no rio Japurá e região do Paraná Aranapu. Esta localidade atua como ponto de conexão entre as águas do rio Solimões e do rio Japurá. Durante o período de cheia do rio Solimões ocorre a exportação de suas águas para o rio Japurá por meio do Paraná do Aranapu e as várzeas de Mamirauá que resulta na mudança da cor da água do baixo curso do rio Japurá.

Na seca do rio Solimões, observa-se um comportamento distinto das águas do rio Japurá. Portanto, a pesquisa aborda o seguinte problema de pesquisa: a foz atual do rio Japurá situa-se na confluência com o Paraná Aranapu?

OBJETIVOS**Geral:**

- Analisar a dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Japurá e Solimões, por meio de dados de campo e de Sensoriamento Remoto.

Específicos:

- Caracterizar a assinatura espectral da água nos Rios Solimões e Japurá;
- Relacionar a dinâmica de transporte de sedimento, precipitação e nível dos rios;
- Determinar a foz do rio Japurá por meio da assinatura espectral da água com imagens de satélite (MODIS).

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Geomorfologia Fluvial

A geomorfologia fluvial estuda a origem, as formas do relevo e os processos relacionados aos rios e sistemas fluviais, que moldam o relevo terrestre, influenciam os ecossistemas e interagem, segundo Stevaux e Latrubesse (2017), com processos endógenos e exógenos, como fatores geológicos, climáticos, biológicos e humanos.

De acordo com Stevaux e Latrubesse (2017), a bacia hidrográfica é a unidade de estudo da geomorfologia fluvial. É uma área da superfície terrestre, que naturalmente coleta água da chuva e subterrânea, sendo delineada pela topografia e produz o escoamento das suas águas por um sistema conectado de rios, desde suas origens até o ponto de saída, conhecido como foz (Christofolletti, 1980).

Conforme Filizola e Guyot (2011), o rio e a bacia de drenagem formam uma unidade operacional essencial para o ciclo hidrológico. Além disso, representam um espaço significativo para realizar avaliações ou validar modelos relacionados as alterações ambientais, como a erosão. Dessa forma, os rios desempenham um papel central no ciclo dos elementos, conduzindo a matéria dos continentes para os oceanos.

Latrubesse, Stevaux e Sinha (2005); Alves (2013), destacam que apesar do avanço sobre estudos de Geomorfologia Fluvial em diferentes zonas climáticas, o conhecimento dos rios tropicais é bastante limitado devido as grandes extensões das regiões e rios. Filizola e Guyot (2011) destacam as magnitudes das bacias fluviais tropicais, ao apontarem que as grandes bacias fluviais tropicais são responsáveis por 50% dos aportes sólidos e 38% dos aportes em solução aos oceanos. Além de possuírem as maiores taxas de erosão, principalmente naquelas que drenam as cadeias de montanhas ativas.

Os maiores rios do mundo localizam-se entre áreas tropicais, como os Rio Amazonas e Japurá, conforme Latrubesse, Stevaux e Sinha (2005) e que estão entre os maiores rios do mundo em descarga média anual, 209.000 (m³/s) e 18.600 (m³/s), respectivamente, (Latrubesse, 2008; Stevaux e Latrubesse, 2017).

Os rios tropicais possuem variabilidade de estilos e processos sedimentares e geomorfológicos complexos e atuantes. De modo geral esses rios possuem um arcabouço geológico e geomorfológico, em que suas províncias são drenadas por

cinturões orogenéticos, platôs/plataformas sedimentares e basálticas, áreas cratônicas, planícies em bacias sedimentares e terrenos mistos (Alves, 2013).

Nas bacias hidrográficas acontecem os processos de remoção, transporte e a deposição das partículas de sedimentos. A dinâmica fluvial faz parte de um sistema que é constituído de rede de drenagem, vertentes, e planícies de inundação e outros processos (Charlton, 2007). O sistema dispõe de variáveis que atuam na morfologia do canal como a velocidade de fluxo, profundidade, largura, declividade, irregularidades do leito do canal, carga e tamanho do sedimento.

Os rios, segundo Guerra (2001), modelam a paisagem a sua volta, alterando o relevo de suas margens, atuando como agentes morfológicos, erodindo, transportando e depositando os sedimentos. Os rios que são alimentados por água precipitada e águas subterrâneas transportam carga sedimentares por arraste/rolamento, saltação-suspensão, suspensão e influenciados pelo tamanho, forma, fluxo turbulência e as forças hidrodinâmicas (Stevaux e Latrubesse, 2017).

A rede de drenagem de uma bacia, possui locais denominados de confluência, locais onde os rios se conectam nesse ponto segundo Santos e Stevaux (2017), ocorrem interações complexas entre matéria (água e sedimentos) e energia (potência do canal). Essas interações caracterizam mudanças contínuas na estrutura do fluxo de velocidade, direção e descarga do transporte de sedimentos suspensos e de carga de fundo, além da alteração na morfologia do canal. Desse modo, há o condicionamento de diversos tipos de mistura e modificações das características das águas após cada ponto de encontro (Silva; Rego e Santos, 2019).

1.2 Erosão e Transporte de Sedimentos

Os processos de erosão, que são responsáveis pela remoção e transporte do material da crosta, são divididos em erosão química e erosão física. Na erosão química esse material é dissolvido e transportado sob forma de solução iônica, dissolvida na água. Já na erosão física é retirado em forma de fragmentos do solo ou da rocha e são transportados pela água como carga sedimentar (Stevaux e Latrubesse, 2017). Alguns dos rios principais da bacia amazônica de água branca como o rio Solimões transportam aproximadamente $1,0 \times 10^9$ ton/ano⁻¹ de sedimentos ao longo de seu curso. Em se

tratando do rio Japurá, tem-se uma produção de sedimentos de $133 \text{ ton/km}^2/\text{ano}^{-1}$ e a carga de sedimentos em suspensão é de $3,3 \times 10^7 \text{ ton/ano}^{-1}$ enquanto o rio Madeira $4,5 \times 10^8 \text{ ton/ano}^{-1}$ respectivamente (Latrubesse, 2008).

A dinâmica da erosão é determinada por uma variedade de interações internas e externas do sistema fluvial, resultando em múltiplos mecanismos de entrada de sedimentos nos canais. Esses mecanismos incluem queda de rochas, movimentos de massa e voçorocas, frequentemente desencadeados por processos como tempestades, ambientes com altas declividades e atividades tectônicas (Montanher, 2013).

O clima atua como um dos principais agentes externos que influenciam significativamente os processos erosivos, por meio da chuva, vento, neve e degelo. A energia cinética contida nas gotas de chuva causa a desagregação de partículas através do impacto direto ou pela força das correntes da água, transportando-as a diferentes distâncias de acordo com seu tamanho e forma. À medida que a velocidade da água diminui, ocorre a deposição dos sedimentos transportados (Melo, 2012).

A erosão química da água desempenha um papel duplo nas reações químicas que envolvem rochas e solos. Primeiramente, no processo de dissolução, a água atua como solvente; em segundo, pode ocorrer a substituição direta de um íon por outro, levando à dissolução e corrosão da rocha. Por outro lado, a erosão física da superfície pela água corrente é determinada tanto pela erodibilidade do material quanto pela erosividade do fluxo. As propriedades físicas do material, como forma, densidade e arranjo estrutural, têm influência direta sobre sua remoção e transporte. Os materiais sujeitos à erosão podem ser coesivos, geralmente compostos por partículas finas como silte e argila, ou podem ser fragmentos rochosos cuja resistência à erosão depende da coesão entre as partículas (Stevaux e Latrubesse, 2017).

Segundo Stevaux e Latrubesse (2017), estima-se que um rio utilize um mínimo de energia para os processos de erosão e transporte de sedimentos, no entanto a maior parte dessa energia é transformada em calor devido ao atrito entre a água e as paredes do canal, além da turbulência do fluxo. As cargas de sedimentos presentes em uma bacia de drenagem possuem diferentes origens, como terraços, planícies de inundação e o fundo do canal. Após a erosão, os sedimentos seguem um percurso pela bacia, desde o

transporte até sua deposição, culminando em uma bacia deposicional lacustre ou marinha.

A carga de sedimentos dissolvidos em rios é composta por materiais em solução, incluindo substâncias orgânicas e inorgânicas como coloides húmicos, que contribuem significativamente para a carga total transportada. A definição de carga dissolvida refere-se ao material que passa por um filtro de 0,45 µm sem ser retido. Já a carga em suspensão de um rio é composta por materiais geralmente menores do que areia fina, sendo transportados pelo fluxo do rio a uma velocidade semelhante à do próprio canal.

Além de partículas minerais, a carga suspensa também inclui material orgânico derivado de fontes aquáticas, como algas e organismos microscópicos, como os plânctons, bem como de fontes terrestres, como fragmentos florestais. A suspensão é mantida por vórtices ascendentes, que predominam em fluxos turbulentos, mas pequenas variações na velocidade podem afetar a concentração da carga suspensa. Partículas muito finas, como silte e argila, tendem a permanecer em suspensão quase o tempo todo, depositando apenas em condições de fluxo muito lento (Stevaux e Latrubesse, 2017).

A hidrossedimentologia estuda a interação entre água e sedimentos nos processos hidrológicos. Esses processos como a manipulação, transporte e deposição de sedimentos, influenciam a formação de vertentes e canais, além de afetar o escoamento das águas (Zanandrea, Kobiyama, Michel, 2017). De acordo com Zanandrea (2017), os processos hidrossedimentológicos em uma bacia envolve desde a erosão de pequenas partículas de solo e rochas até grandes movimentos de massas.

1.3 Dinâmica Hidrossedimentar nos rios Amazônicos

A Bacia Amazônica, segundo Filizola e Guyot (2011), é a maior bacia hidrográfica do mundo em área de drenagem e volume de descarga hídrica, com aproximadamente 6,1 milhões de km² e uma descarga anual de cerca de 6.600 km³ de água doce para o Oceano Atlântico. Ela também é responsável por cerca de 50% dos sedimentos em suspensão que chegam aos oceanos a partir dos continentes. A principal fonte de sedimentos da bacia são os Andes, que contribuem com a maior parte da carga sedimentar transportada, enquanto os rios oriundos dos escudos cristalinos, como o

Negro, Tapajós e Xingu, têm papel secundário, respondendo por cerca de 7% da carga total.

Autores como, Filizola e Guyot (2011) utilizaram a equação de balanço de massa como base metodológica para analisar os ganhos e perdas de sedimentos em diferentes seções do rio Amazonas, levando em conta os processos de sedimentação e ressuspensão. Os autores observaram que a quantidade de sedimentos suspensos exportada anualmente pelo rio varia entre 600 e 800 milhões de toneladas, sendo o rio Solimões e o rio Madeira os principais contribuintes, com 54% e 45% da carga sólida, respectivamente. O rio Madeira também se destacou por sua influência significativa nas variações mensais e interanuais dos fluxos de água e sedimentos.

De acordo Filizola e Guyot, (2009) e Espinoza-Villar et al. (2017), há uma forte relação entre os regimes hidrológicos dos principais rios amazônicos e o comportamento dos sedimentos em suspensão ao longo do ano. A hidrologia, expressa pelas variações sazonais da vazão dos rios, influencia diretamente os processos de produção, transporte, deposição e ressuspensão dos sedimentos, resultando em um padrão dinâmico que varia entre os diferentes tributários e ao longo do tempo (Filizola e Guyot, 2011).

Segundo Park e Latrubresse (2014), a hidrologia anual dos grandes rios tropicais é marcada por variações sazonais de vazão, geralmente associadas às chuvas regionais. No caso do Rio Amazonas, o ciclo hidrológico anual é composto por quatro fases principais, enchente, cheia (ou pico), vazante e estiagem. Cada uma dessas fases influencia de forma distinta a concentração e a distribuição dos sedimentos suspensos, principalmente os finos, silte e argila.

Durante o período de enchente, segundo Filizola e Guyot (2011); Park e Latrubesse (2014), há um aumento gradativo na vazão, o que provoca o início do transporte de sedimentos erodidos das margens e das áreas de cabeceira, especialmente dos Andes. É nesse período que os valores de concentração de sedimentos suspensos (CSS) tendem a aumentar significativamente. Assim, os picos de concentração de sedimentos frequentemente ocorrem antes do pico de vazão, com um intervalo de três a cinco meses, evidenciando que a geração de sedimentos está mais associada ao início do aporte fluvial do que ao volume máximo de água.

Na fase de cheia, embora a vazão esteja no ápice, a concentração de sedimentos tende a diminuir. Isso ocorre por causa da diluição do material em suspensão e da retenção de sedimentos nas planícies de inundação, onde parte da carga é depositada temporariamente. Os autores observaram que a turbidez da água reduz durante esse período, mesmo com o aumento do nível da água, indicando um desacoplamento entre vazão e CSS (Filizola e Guyot, 2011; Park e Latrubesse, 2014).

Durante a descida das águas, entre junho e agosto, há uma redução progressiva das vazões. No entanto, o fluxo de sedimentos em Óbidos mostra um comportamento inverso, em vez de diminuir proporcionalmente, ele aumenta em alguns momentos. Isso se deve à ressuspensão de sedimentos anteriormente depositados no leito e nas várzeas (Filizola e Guyot, 2011).

No período de seca (setembro a novembro), os valores de vazão são mínimos e os fluxos de sedimentos suspensos também caem, mas continuam sendo modulados principalmente pelas contribuições do Solimões. Em novembro, por exemplo, esse rio é responsável por 97% do fluxo sedimentar total observado em Óbidos. Ainda assim, há forte sedimentação registrada nesse trecho, o que indica uma contínua retenção de material particulado (Filizola e Guyot, 2011).

No entanto, os diferentes rios da bacia possuem regimes hidrológicos desfasados. Por exemplo, o rio Madeira atinge seu pico de cheia antes do rio Solimões, e o rio Negro atinge seu máximo mais tardiamente, no segundo semestre do ano. Essa defasagem sazonal influencia a composição e quantidade de sedimentos suspensos no rio Amazonas, resultando em uma curva de transporte de sedimentos, que não pode ser explicada apenas pela vazão instantânea (Filizola e Guyot, 2009).

Outro ponto destacado pelos autores é que, nos períodos de águas altas, há também zonas de deposição, especialmente nas várzeas amazônicas. Entre os meses de março e novembro, identificou-se uma significativa retenção de sedimentos na planície central da bacia, com taxas de deposição de 3 a 6 mm por ano. Isso reforça a ideia de que o balanço hidrossedimentar da bacia não é apenas uma função da geração de sedimentos, mas também da capacidade de armazenamento temporário nas áreas alagáveis (Filizola e Guyot, 2009).

Portando, os estudos anteriormente levantados e discutidos evidenciam que a relação entre hidrologia e sedimentos em suspensão na Bacia Amazônica é não linear e sazonalmente complexa, refletindo tanto o regime climático quanto a geomorfologia e a origem geológica dos rios.

1.3 Tipos de Rios Amazônicos

Na Amazônia encontramos rios com diferentes transparências e cor de água. Eles podem ser classificados em águas brancas, pretas e claras, conforme suas características físicas e químicas. As diferenças resultam, em parte, de suas origens. Os rios de água branca, como o rio Solimões, Madeira e Japurá, têm suas próprias características pois possuem nascentes em regiões montanhosas dos Andes. Essas regiões sofrem intensa erosão de sedimentos devido à decomposição da crosta terrestre, e esses sedimentos são então transportados pelos rios até áreas mais baixas, contribuindo para a formação de extensos terrenos aluviais na várzea (Sioli, 1985; Peixoto, 2007).

A composição das águas dos rios na Amazônia é determinada por complexas interações físicas e químicas durante a infiltração do solo e o escoamento das águas. A química da água está estreitamente relacionada à geologia das áreas que atravessam, resultando em uma diversidade de tipos de rios, como os de água branca, preta e clara. As partículas finas são transportadas em suspensão ou como carga de fundo, depositando-se na planície e sendo posteriormente deslocadas pela erosão lateral dos rios em um contínuo processo de sedimentação e erosão (Sioli, 1985; Oliveira e Daly, 2001; Fassoni-Andrade et al., 2023).

Os rios de águas brancas apresentam elevados níveis de descarga de sedimentos (Q_s) anual, conforme podemos observar na tabela 1. Apesar dessa alta concentração de sólidos, o teor de matéria orgânica nesses rios é baixo, resultando em uma composição levemente alcalina ou neutra, com valores de pH que geralmente variam entre 6,2 e 7,2, e com temperaturas em média ao longo do ano do rio Solimões que variam de 28,6 a 30,4°C e Japurá entre 27,8 e 30,9 °C em ambos ocorrem pouca estratificação de temperatura (Oliveira e Daly, 2001; Latrubesse, 2008; IDSM, 2010).

Tabela 1 - Dados dos Maiores Rios do Mundo em Descarga de Sedimentos

Rio	País da Foz	Vazão Média Anual (m³/s)	Área de Drenagem (10³ km)	Descarga de Sedimentos (Mt/ano)
Amazonas	Brasil	209.000	6100	~1000
Congo	Rep. Democrática do Congo	40.900	3700	32.8
Orinoco	Venezuela	35.000	950	150
Yangtze	China	32.000	1943	970
Madeira	Brasil	32.000	1360	450
Negro	Brasil	28.400	696	8
Brahmaputra	Bangladesh	20.000	610	520
Japurá	Brasil	18.600	248	33
Paraná	Argentina	18.000	2600	112
Mississipi	EUA	17.000	3200	330

Fonte: Latrubesse (2008).

Essas águas originam-se em nascentes situadas nas encostas montanhosas dos Andes (Marinho, 2019; Fassoni-Andrade e Paiva, 2019). A região amazônica é caracterizada por rochas geologicamente jovens que se desagregam com facilidade, uma condição influenciada pelo relevo e pelo clima local. As partículas dessas rochas sofrem alterações e são dissolvidas e carregadas pelas chuvas em direção aos rios.

Entre os rios de águas brancas da Amazônia, encontram-se o Madeira, Japurá, Juruá, Purus e o próprio Solimões. Ao longo das margens desses rios, há grandes áreas férteis, chamadas de várzeas, que se formam a partir das inundações periódicas e da deposição de nutrientes e partículas transportadas pelas águas. Essas várzeas são amplamente utilizadas na agricultura pelos ribeirinhos. O rio Madeira e Solimões respondem por 98% da descarga de sedimentos do rio Amazonas para o oceano atlântico, sedimentos inorgânicos de origem predominante dos Andes (Oliveira e Daly, 2001, Alves, 2013).

Os rios de águas pretas são ricos em matéria orgânica dissolvida, proveniente de solos podzólicos. As águas pretas, como as do rio Negro, apresentam alto teor de ácidos húmicos, são pobres em sólidos em suspensão e possuem pH entre 3,8 e 4,9. A temperatura do rio Negro próximo à cidade de Manaus, em seu baixo curso, possui média anual de 29,8 °C, enquanto no alto curso, nas proximidades de São Gabriel da Cachoeira, essa média é de 27,85 °C. A turbidez e o oxigênio dissolvido são, respectivamente, em

média, 5,14 NTU e 4,36 mg/L no baixo curso, e 3,03 NTU e 4,40 mg/L no alto curso (Sioli, 1984; Silva et al., 2013; Fassoni-Andrade et al., 2023).

Esse conjunto de características das águas pretas não está restrito aos grandes rios amazônicos. Ambientes similares podem ser observados também em outras regiões, como na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. Embora a área seja banhada pelos rios Solimões e Japurá, de águas brancas, é possível encontrar lagos com características de águas pretas dentro da reserva. Isso ocorre, sobretudo, durante o período de cheia, quando a intensa precipitação provoca escoamento superficial que carrega material orgânico da floresta alagada. Esse processo resulta em sistemas com propriedades típicas de ambientes de águas pretas, como menor turbidez e maior concentração de matéria orgânica dissolvida (Affonso, 2012).

Já os rios de águas claras são caracterizados por apresentarem baixa concentração de nutrientes, sedimentos e matéria orgânica dissolvida, com pH variando entre 4,5 e 7,8 (Sioli, 1984; Fassoni-Andrade et al., 2023). Os rios de águas claras apresentam baixos índices de erosão, resultando em uma menor quantidade de material suspenso, além de conterem certa quantidade de matéria orgânica dissolvida. Essa combinação dá a essas águas uma aparência cristalina. Diferentemente dos rios de águas brancas, os rios de águas claras têm tonalidades esverdeadas, como é o caso dos rios Tapajós e Xingu. Os níveis de pH nesses rios podem variar, sendo ácidos, com valores ao redor de 4,5, até levemente alcalinos (Alves, 2015; Marinho, 2019).

1.4 Sensoriamento Remoto

As plataformas de observação, os chamados sistemas orbitais que são basicamente máquinas equipadas com sensores como câmeras especiais, que captam informações do planeta. Esses satélites enviam os dados para estações na Terra, que os organizam e distribuem para serem usados. Dependendo da missão do satélite, ele pode estar em diferentes posições e altitudes no espaço, sensores com diferentes capacidades de captar detalhes, e registrar informações em diferentes intervalos de tempo, resoluções espaciais, espectrais e radiométrica (Meneses e Almeida, 2012; Barbosa et al., 2019).

As órbitas polares, geralmente entre 650 e 900 km de altitude, completam uma órbita ao redor da Terra em cerca de 90 a 110 minutos. A escolha dessa órbita é

fundamental para definir a capacidade dos sensores ópticos a bordo, uma vez que a velocidade de deslocamento impacta o tempo de aquisição e a altitude influencia a extensão da área coberta pelo sensor. Por exemplo, o instrumento VIIRS no satélite Suomi-NPP tem um amplo ângulo de visada, alta altitude e uma faixa de imageamento de 3000 km, o que lhe permite cobrir o planeta diariamente. Os sensores ópticos em satélites registram a interação entre a radiação eletromagnética, no entanto, para aplicações relacionadas a águas interiores, apenas as faixas do visível e do infravermelho próximo tendem a ser úteis devido ao alto coeficiente de absorção da água em comprimentos de onda superiores a 750 nm (Barbosa, Novo, Martins, 2019).

A radiação Eletromagnética é gerada a partir dos objetos que possuem temperatura acima do zero absoluto, devido ao movimento das partículas dos átomos e moléculas. Quanto mais quente for o objeto, maior será a energia que ele emite. No sensoriamento remoto, não é apenas a qualidade dos sensores que importa, mas também a intensidade da radiação emitida. O Sol, com sua alta temperatura, é a maior fonte de radiação, seguida pela Terra. No entanto, nem o Sol nem a Terra emitem todos os tipos de radiação, então o ser humano criou fontes artificiais para suprir essa limitação, como na faixa das micro-ondas (Meneses e Almeida, 2012).

As faixas do espectro da REM possuem uma organização contínua das ondas eletromagnéticas, combinações conforme com seu comprimento de onda ou frequência. O espectro é dividido em regiões, de acordo com as características das ondas, os processos físicos que geram a radiação, a forma como interação com objetos e a atmosfera. O espectro vai desde os raios cósmicos, com comprimentos de onda muito curtos, até as ondas de rádio, que têm comprimentos de onda longos como podemos ver na tabela 2 (Moraes, 2002).

Tabela 2 - Faixa de Espectro da REM.

Faixa Espectral	Comprimento de Onda
Raios cósmicos	0,001 nm
Raios gama	0,001 – 0,01 nm
Raios X	0,01 – 1 nm
Ultravioleta	100 – 380 nm
Visível	380 – 760 nm
Infravermelho próximo	760 – 1200 nm
Infravermelho de ondas curtas	1200 – 3000 nm
Infravermelho médio	3000 – 5000 nm
Infravermelho termal	5000 – 1×10^6 nm
Micro-ondas	1×10^6 – 1×10^9 nm
Rádio	1×10^9 – 1×10^{13} nm

Fonte: Adaptado Meneses e Almeida (2012).

1.4.1 Resoluções

No sensoriamento remoto, a radiação eletromagnética refletida pelos objetos na superfície terrestre é captada por sensores instalados em plataformas como satélites, drones e aviões. A coleta de dados envolve diferentes tipos de resolução — espacial, espectral, radiométrica e temporal —, cada uma associada a aspectos específicos do processo. Essas resoluções atendem a distintas finalidades, como o monitoramento ambiental, a análise agrícola e o mapeamento urbano.

O conceito de resolução espacial refere-se ao tamanho do menor elemento de terreno que um sensor pode distinguir em uma imagem, determinando, assim, a capacidade de identificar pequenos objetos na cena. Para que um objeto seja claramente distinguido em uma imagem, seu tamanho deve ser, no mínimo, igual ao do elemento de resolução, ou seja, da resolução espacial. Um exemplo disso é a comparação entre o sensor MODIS, a bordo da plataforma Terra, e o sensor OLI, do satélite Landsat. As bandas 1 a 7 do OLI possuem resolução espacial de 30 metros, enquanto as bandas B3 a B7 do MODIS apresentam resolução de 500 metros, conforme ilustrado na Tabela 3. Essa diferença se deve, entre outros fatores, à altitude da plataforma e ao campo de visada instantâneo dos sensores (Meneses e Almeida, 2012; Barbosa, Novo, Martins, 2019).

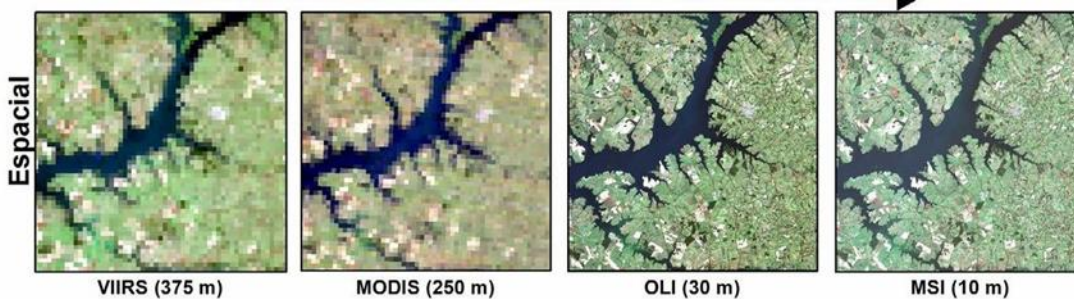
Tabela 3 - Resoluções Espectrais e Espaciais dos sensores MODIS e OLI.

Sensor	Bandas	Resolução espectral	Resolução Espacial
MODIS	B3	459 - 479 nm	500 m
	B4	545 - 565 nm	
	B5	1230 - 1250 nm	
	B6	1628 - 1652 nm	
	B7	2105 - 2155 nm	
OLI	B2	450 - 515 nm	30 m
	B3	525 - 600 nm	
	B4	630 - 680 nm	
	B5	845 - 885 nm	
	B6	1560 - 1660 nm	
	B7	2100 - 2300 nm	

Fonte: Embrapa (2024).

A Figura 2 apresenta exemplos de diferentes resoluções espaciais. O sensor MSI destaca-se por sua maior resolução, de 10 metros, em comparação aos sensores MODIS, com 250 metros, e OLI, com 30 metros.

Figura 2 - Resolução espaciais de sensores.



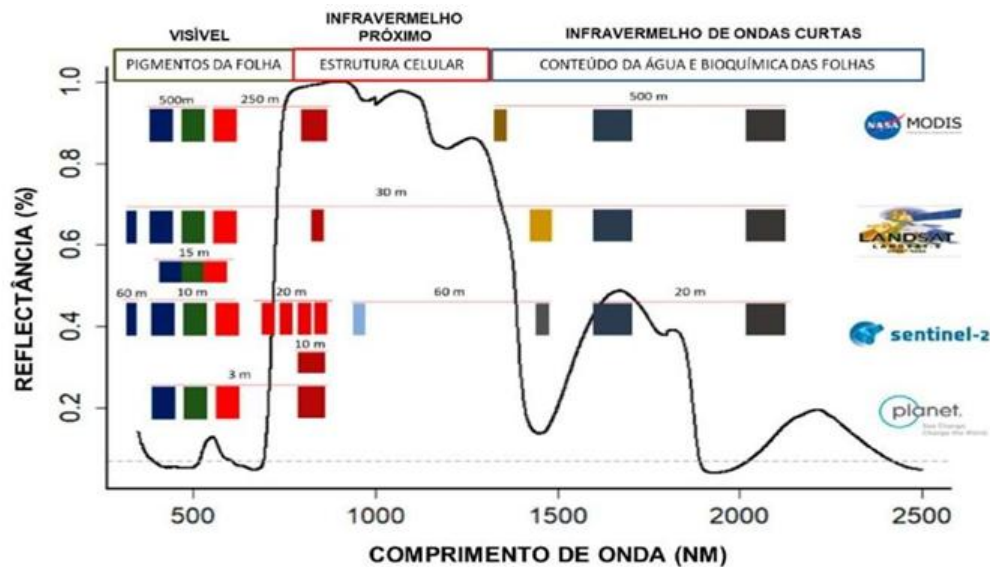
Fonte: Barbosa, Novo e Martins (2019).

A resolução temporal refere-se à frequência com que um sensor revisita uma determinada área para adquirir imagens durante sua operação. Satélites em órbita semipolar mantêm trajetória fixa e perpendicular à rotação da Terra, passando pelo mesmo ponto da superfície sempre no mesmo horário. Resoluções temporais baixas podem comprometer o monitoramento de ambientes aquáticos com alta dinâmica de constituintes (Barbosa, Novo, Martins, 2019).

A resolução espectral considera três parâmetros essenciais na escolha de sensores: o número de bandas disponíveis, a largura espectral de cada banda e sua

posição no espectro eletromagnético. Quanto maior o número de bandas distribuídas em diferentes regiões do espectro e quanto mais estreitas forem suas larguras, maior será a resolução espectral do sensor. Essa característica é fundamental, pois as variações na reflectância dos materiais da superfície terrestre em determinados comprimentos de onda permitem uma distinção mais eficaz entre eles (Meneses e Almeida, 2012; Barbosa, Novo, Martins, 2019). A Figura 3 ilustra que o satélite Planet apresenta menor resolução espectral em comparação aos demais, por dispor de apenas quatro bandas.

Figura 3 - Reflectância de alvos pelo sensor MODIS, Landsat-8, Sentinel-2 e Planet.



Fonte: Segarra et al., (2020).

A resolução radiométrica refere-se à capacidade de um sensor em detectar a intensidade de energia eletromagnética refletida ou emitida por um objeto. É fundamental para captar pequenas diferenças de reflectância, especialmente em ambientes aquáticos. Este parâmetro é medido pelo número de bits utilizados na quantização dos dados, uma vez que mais bits indicam uma resolução radiométrica mais alta e, conseqüentemente, uma capacidade aprimorada de distinguir variações sutis na intensidade do sinal refletido. Isso é crucial para identificar pequenas mudanças nas concentrações de substâncias na água, considerando que a reflectância nesse ambiente tende a ser baixa.

Exemplo: o Landsat-5 carregou a bordo o sensor TM (Thematic Mapper) possui resolução radiométrica de 8 bits ($2^8 = 256$ níveis de cinza), enquanto o sensor OLI a bordo Landsat-8 possui a resolução de 12 bits ($2^{12} = 4096$ níveis de cinza), ou seja, o sensor OLI uma melhor resolução radiométrica que o sensor TM (Meneses e Almeida, 2012; Barbosa, Novo, Martins, 2019).

1.4.2 Sensores

O projeto Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), uma missão da NASA, em parceria com a Agência Japonesa (JAXA) para monitoramento e compreensão da distribuição espacial da precipitação, tempestades e processos climáticos nos trópicos por meio de sensores infravermelho e radares.

O TRMM foi lançado em 27 de outubro de 1997 e operou até 2019, tendo continuação da missão por meio do monitoramento de outros satélites e demais fontes (NASA, 1999; Kummerow, 2000; Bernardi, 2016). O satélite possui uma órbita não-heliocêntrica, com inclinação de 35° em relação ao equador, de uma órbita de baixa latitude de 350 quilômetros, com uma translação de 91 minutos, circundando o globo 16 vezes por dia, o que significa uma alta resolução temporal e espacial.

Na plataforma TRMM existem sensores que atuam em diversas faixas do espectro eletromagnético, entre eles o TRMM Microwave Imager (TMI), Precipitation Radar (PR), Visible and InfraRed Scanner (VIRS), Lightning Imaging Sensor (LIS) e Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES). (Kummerow, 2000; Passow, 2010; Bernardi, 2016).

A missão TRMM disponibiliza alguns algoritmos que foram projetados para combinar os dados observados pelos satélites com os dados obtidos no solo, com o intuito de disponibilizar os dados com melhores estimativas. Existem algoritmos de acordo com seus sensores e níveis de processamento, entre eles o 1B21 que é um nível de processamento, por exemplo, que tem um produto de Energia Recebida Calibrada do sensor (PR). Além desse algoritmo o sensor possui mais seis níveis de processamento. O 1B11 é o nível de processamento de Temperatura de Brilho do sensor (TMI), além desse algoritmo o sensor possui mais dois níveis de processamento.

O 1B01 é um algoritmo de nível de processamento de Radiância do sensor (VIRS). E o 3B43 é o algoritmo do nível de processamento de combinação entre o satélite TRMM,

outros satélites e a combinação de fonte de observação no solo, além desse algoritmo para esse nível de processamento, existem mais três níveis. (Bernardi, 2016). Disponibilizado no formato GeoTiff e apresentando uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, aproximadamente 25 km.

Diversos estudos demonstram que os dados de precipitação do satélite TRMM apresentam boa correspondência com medições de estações pluviométricas na Amazônia, sendo considerados adequados para uso em análises climatológicas e hidrológicas. De acordo com Almeida (2015) avaliou o produto TRMM-3B43 no estado do Amazonas entre 2004 e 2008, comparando os dados mensais com sete estações meteorológicas. Os resultados indicaram uma correlação média de $r = 0,83$, índice de concordância de $d = 0,85$ e um RMSE de 66,6 mm/mês, concluindo que o TRMM reproduz bem a variabilidade sazonal da chuva e pode ser utilizado sem comprometer a qualidade das análises climáticas. Outro estudo, de Nóbrega, Souza e Sousa (2008), analisou o uso do TRMM na modelagem hidrológica da bacia do rio Jamari, em Rondônia, e observou que os dados satelitais apresentaram bom desempenho, com forte correlação com os dados observados, captando adequadamente a sazonalidade das chuvas. Já Massagli, Victoria e Andrade (2011), em pesquisa realizada na bacia do rio Ji-Paraná, também em Rondônia, compararam estimativas de precipitação do TRMM com dados de 52 estações pluviométricas. A correlação variou de $r^2 = 0,13$ em escala diária até $r^2 = 0,73$ em escala mensal, sugerindo que os dados TRMM são mais confiáveis quando utilizados em períodos agregados (decêndios ou mensais). Em conjunto, esses estudos indicam que, apesar de algumas limitações em escala diária, os dados do TRMM são suficientemente robustos para serem utilizados em estudos científicos na região amazônica, especialmente quando analisados em médias mensais ou maiores.

O Sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), desenvolvido pela Goddard Space Flight Center (NASA), é um dos 5 sensores que pertencem ao satélite TERRA, lançado em 1999 e que também está presente no Satélite AQUA, lançado em 2002. Juntos, esses dois sensores foram criados para três campos de estudos, atmosfera, oceano e terra com uma cobertura global quase diária (1-2 dias). O MODIS possui 36 bandas de resolução espectral que variam de 620 nm a 14085 nm, com uma resolução radiométrica para essas bandas de 12 bits. A sua resolução espacial entre as bandas 1

e 2 são de 250 metros, entre as bandas 3 e 7 são de 500 m e entre as bandas 8 e 36 são de 1000 m (Embrapa, 2024; Latorre et al., 2003).

Quadro 1 - Resoluções Sensor MODIS

Orbita	705 Km, síncrona com o Sol, polar. 10:30 a.m descendente; 1:30 p.m ascendente.
Resolução Espacial	250 m (1-2 bandas), 500 m (3-7 bandas), 1000 m (8-36 bandas) em nadir
Resolução Espectral	36 bandas
Resolução Radiométrica	12 bits
Resolução Temporal	1 a 2 dias
Área Imageada	2330 x 5000 km

Fonte: Embrapa (2024).

1.5 Sensoriamento Remoto da Água

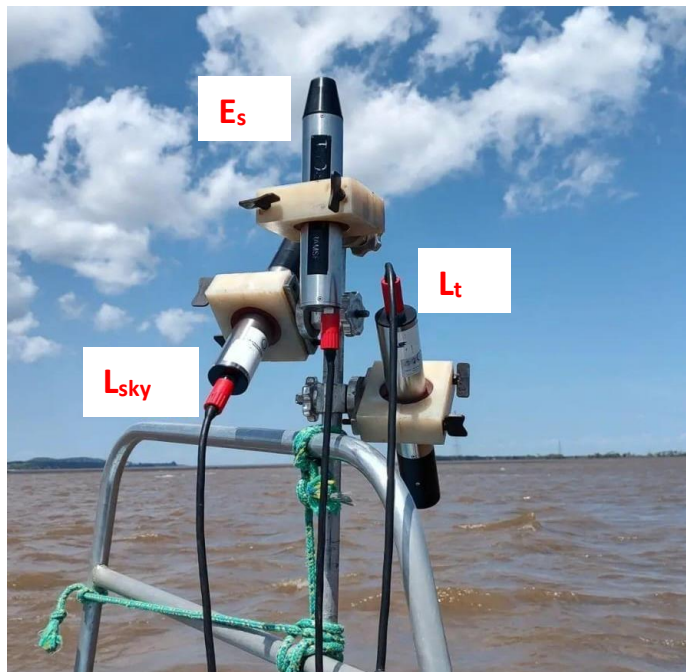
As Propriedades Ópticas Aparentes (POAS) de um corpo d'água variam com as condições ambientais, como luz solar e vento. Diferentemente das Propriedades Ópticas Inerentes (POI), que são medidas em condições controladas, as POA refletem tanto a composição da água quanto as condições externas. Embora as POA sejam influenciadas por diversos fatores, algumas medidas radiométricas, como a reflectância, apresentam estabilidade suficiente para caracterizar um corpo d'água (Barbosa, Novo, Martins, 2019).

Barbosa, Novo, Martins (2019) descrevem que as principais POAs quantificam e descrevem as mudanças as quais um corpo d'água submete a luz incidente, e dependem das condições do corpo d'água, como a forma de superfície da água, vento, luz natural, passagem de nuvem, estação do ano para que possam ser realizadas as medições radiométricas.

Na radiometria, várias técnicas são usadas para medir a radiação eletromagnética, fornecendo uma descrição quantitativa da transferência radiativa em águas naturais. As grandezas medidas incluem energia radiante, fluxo radiante, irradiância e radiância, importantes para a óptica hidrológica. Para parametrizar, calibrar e validar algoritmos de estimativas dos constituintes da água e de correção atmosférica de imagens de satélite, são usados protocolos e medições in situ, como descrito por Barbosa, Novo, Martins (2019).

As medições realizadas acima da superfície da água, conforme ilustrado na Figura 4, incluem a irradiância incidente na superfície, $E_s(\lambda)$, que representa a irradiância planar composta pela radiação solar direta e difusa. A radiância ascendente da superfície da água, $L_T(\theta, \phi, \lambda)$, corresponde à radiância total, resultante da combinação da radiância emergente da coluna d'água e da radiância especular refletida. Por sua vez, a radiância do céu, $L_{sky}(\theta', \phi', \lambda)$, refere-se à radiação solar dispersa pelos constituintes atmosféricos em direção à superfície da água. Parte dessa radiação penetra na coluna d'água, enquanto outra parte é refletida, contribuindo para a radiância refletida pela superfície. A medição de L_{sky} é usada para a correção dos efeitos de reflexão especular (como sunglint e skyglint).

Figura 4 - Configuração esquemática de sensores para medidas radiométricas da água.

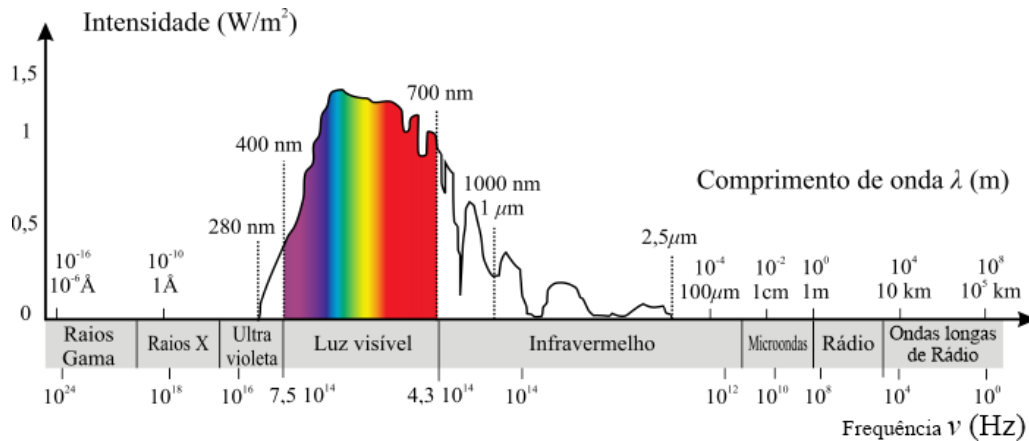


Fonte: Ednaldo Severo (2023).

O sensoriamento remoto, seja orbital, aéreo ou de campo, é uma ferramenta valiosa nos estudos de ambientes aquáticos, sendo empregado para identificar e mapear parâmetros de qualidade da água, como clorofila, sólidos em suspensão e matéria orgânica dissolvida. Essa técnica utiliza, predominantemente, a radiação solar como fonte de energia. As investigações em ambientes aquáticos concentram-se, em geral, na

faixa do espectro eletromagnético entre 400 e 900 nm (Figura 5), considerada a mais adequada para essas aplicações (Barbosa, Novo, Martins, 2019; Florenzano, 2007).

Figura 5 - Espectro da Radiação Eletromagnética – REM



Fonte: Pereira, 2019.

O sensoriamento remoto, por meio de sistemas orbitais e medições espectrais de campo, pode ser utilizado para monitorar e estimar propriedades biogeoquímicas em sistemas aquáticos, como os constituintes opticamente ativos (COAs), entre eles os sólidos suspensos totais (TSS), a clorofila-a (Chl-a), a ficocianina e a matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM). Esses constituintes influenciam diretamente o comportamento radiométrico da água, afetando suas respostas espectrais (Barbosa et al., 2023).

O Sólidos em Suspensão Totais é composto por matéria orgânica viva ou morta e matéria inorgânica de minerais ricos em óxidos de ferro, silício e alumínio que são retidos em filtros com abertura de 45 microns. A reflectância da água é correlacionada com a concentração de TSS, afetando a medida de 450 a 900 nm e evidenciando o impacto na reflectância no visível e infravermelho próximo (Toniolo, 2016; Barbosa, 2005).

Os pigmentos fitoplanctônicos como as Bactérias clorofiladas, algas e macrófitas aquáticas contêm pigmentos como clorofilas, carotenóides e xantofilas, que são eficazes na absorção de radiação. O fitoplâncton, composto por algas fotossintetizantes, reduz a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) com a profundidade. As concentrações de pigmentos variam com fatores como luz, temperatura e nutrientes, sendo a clorofila a

mais abundante e usada para estimar a biomassa de algas (Toniolo, 2016; Barbosa; 2005).

A matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) é a fração da matéria orgânica dissolvida que absorve radiação ultravioleta e apresenta fluorescência, sendo composta, por exemplo, por substâncias húmicas. Suas propriedades ópticas influenciam a produtividade primária aquática e podem limitar a penetração da radiação na coluna d'água. Técnicas como espectroscopia no UV-visível e fluorescência molecular são empregadas para caracterizar a CDOM, permitindo a análise de sua estrutura, origem e processos de degradação em ambientes aquáticos naturais (Costa, 2011).

A cor das águas em corpos d'água como rios, oceanos e lagos é influenciada pela quantidade de sedimentos e substâncias dissolvidas que absorvem e refletem a luz solar. Segundo Barbosa, Novo, Martins (2019) a maneira como a radiação refletida se comporta é mais complexa em ambientes aquáticos do que em ambientes terrestres. Isso ocorre porque a radiação que incide sobre a água penetra e se propaga em várias direções, criando um efeito de espalhamento em diferentes graus ao longo da coluna d'água, retornando à superfície e conseqüentemente propagando-se na direção das camadas da atmosfera.

Entre os sensores que capturam as respostas de interação entre a radiação solar e a coluna d'água estão os sensores orbitais. A radiação eletromagnética que chega a esses sensores sofre diversas atenuações desde sua origem até sua captura pelo sensor, passando por interação dos fótons com a atmosfera, com a superfície da água, com a coluna d'água e novamente com a atmosfera.

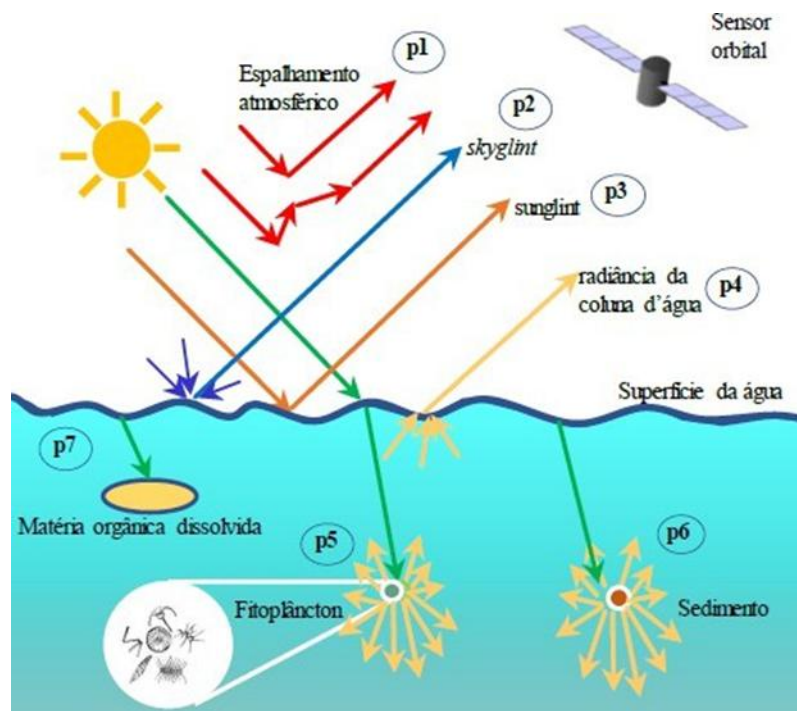
A luz é composta de partículas chamadas fótons, que carregam energia. Quando esses fótons atravessam a água, eles podem ser absorvidos ou espalhados pelas moléculas da água. Se a luz for absorvida, significa que a energia do fóton é transferida para a molécula. Quando isso acontece, a molécula ganha energia, e isso pode causar uma mudança na sua estrutura. Podendo mudar de posição, indo para um nível de energia mais alto.

O espalhamento é um processo no qual os fótons têm sua trajetória desviada ao interagirem com o meio de propagação. No estudo das propriedades ópticas das águas naturais, o espalhamento pode ser abordado por dois métodos: o espalhamento devido

a flutuações aleatórias de densidade e o espalhamento causado por partículas em suspensão na água. O espalhamento decorrente de flutuações de densidade é causado por movimentos moleculares aleatórios contínuos, gerando variações no número de moléculas em um determinado volume de água. A luz, ao interagir com essas variações no índice de refração, tem sua direção levemente alterada (Barbosa, Novo, Martins, 2019; Fassoni-Andrade et al., 2023).

Quando a luz entra na água (Figura 6) ela encontra pequenas partículas, como areia, argila ou até mesmo organismos microscópicos. Como a maioria das partículas tem um diâmetro superior a $2\ \mu\text{m}$, ao interagir com partículas maiores do que o comprimento de onda dos fótons, a direção dos fótons tende a desviar em ângulos pequenos em relação à propagação original da luz, esse desvio é chamado de espalhamento. A intensidade e o padrão de espalhamento na água são afetados por vários fatores: concentração de partículas, diâmetro das partículas, índice de refração das partículas em relação a água, forma das partículas e absorção de radiação pelas partículas (Barbosa, Novo, Martins, 2019).

Figura 6 - Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d'água) e sensor orbital.



Fonte: Barbosa et al., 2019.

1.6 Estudos do transporte de sedimentos nos Rios da Amazônia com sensoriamento remoto

Na região Amazônica, diversos estudos investigam a concentração de sedimentos suspensos nos rios por meio de sensoriamento remoto e medições de campo. Espinoza-Villar et al. (2017), por exemplo, estimaram a descarga de sedimentos do rio Amazonas entre 600 e 1200 Mt/ano, sendo mais de 50% provenientes do rio Solimões. Utilizando imagens do sensor MODIS, os autores analisaram a distribuição de sedimentos em suspensão no rio Solimões, desde o Peru até o Brasil. Para isso, foram utilizadas seis estações virtuais ao longo de 2.050 km, abrangendo o período de 2007 a 2014. As estimativas indicaram uma descarga anual de $5,21 \times 10^8$ ton/ano em Tamshiyacu (Peru) e $8,25 \times 10^8$ ton/ano em Manacapuru (Brasil).

Espinoza-Villar et al. (2013) utilizaram dados dos sensores MODIS para investigar o transporte de sedimentos suspensos no rio Madeira. O estudo combinou medições de campo da concentração de sedimentos suspensos (CSS), radiometria espectral e análise granulométrica, a fim de estabelecer correlações entre a reflectância espectral e a CSS. Os resultados indicaram uma forte correlação entre a reflectância e a concentração de sedimentos, ainda que sujeita a variações sazonais. Com base nesses dados, foi desenvolvido um modelo de estimativa de CSS, aplicado para identificar padrões de sedimentação e ressuspensão ao longo do rio. O estudo também previu acúmulo de sedimentos próximo à foz do rio, atribuído ao efeito de barramento hidráulico

Park e Latrubesse (2014) modelaram os padrões de distribuição de sedimentos suspensos no rio Amazonas utilizando dados do sensor MODIS. A concentração de sedimentos foi estimada com base em informações obtidas em três estações de medição ao longo do rio, no período de 2000 a 2010. Os autores desenvolveram modelos empíricos que correlacionam dados de reflectância espectral com medições de campo da concentração de sedimentos. Esses modelos foram aplicados a composições de imagens de oito dias, permitindo a geração de mapas de distribuição espacial de sedimentos ao longo do rio Amazonas desde o ano 2000.

O estudo de Maciel et al., (2019) avaliou a eficácia das características espectrais dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2 para estimar Totais Sólidos Suspensos (TSS) e inorgânicos (TSI) em lagos de várzea na bacia do médio-baixo Amazonas. Usando

medições in situ de Reflectância de Sensoriamento Remoto, os pesquisadores calibraram e validaram algoritmos empíricos de TSS e TSI, aplicando-os a imagens de satélite. Os resultados mostraram que ambos os sensores forneceram estimativas confiáveis, especialmente nas bandas verde do OLI e de borda vermelha do MSI. Concluiu-se que os sensores OLI e MSI podem ser usados como uma constelação virtual para estimar TSS e TSI em planícies de inundação da Amazônia.

Marinho et al., (2018) analisaram a confluência dos rios Solimões (águas brancas) e o rio Negro (águas pretas), usando amostras de sedimentos suspensos na superfície (CSS) e radiometria de campo ao longo de perfis transversais de 10 km e imagens de satélite (MODIS) ao longo do ano hidrológico. Os autores constatarem que a reflectância por espectrômetro e imagens MODIS são eficazes para determinar sedimentos suspensos na superfície em zonas de contraste.

O estudo de Marinho et al. (2022) analisou a variação espaço-temporal do transporte de sedimentos em suspensão no baixo rio Negro, utilizando imagens do satélite Sentinel-2. Os resultados indicam que a concentração de sedimentos é fortemente influenciada pelo regime hidrológico, sendo mais elevada durante o período de águas baixas e reduzida nas cheias, com média de $5,28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ entre 2015 e 2019. As imagens revelaram uma zona ativa de deposição de sedimentos a jusante das ilhas do Arquipélago de Anavilhanas. A baixa produção de sedimentos na região é atribuída à geologia local, à densa cobertura florestal e à variabilidade hidrológica, resultando em um fluxo anual estimado de $5,61 \times 10^6 \text{ ton./ano}$.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo engloba a região de confluência entre os rios Solimões e Japurá. Nessa região está localizada a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM) situada no médio rio Solimões, próximas aos municípios de Japurá, Jutaí, Uarini, Fonte Boa, Maraã, Alvarães e Tefé, sendo este último o principal centro urbano da região, situado a aproximadamente 600 km de Manaus (Mamirauá, 1996; Moura 2016).

A RDSM possui uma área aproximada de 11.240 km², é a maior unidade de conservação de florestas alagáveis no Brasil e a única criada para proteger a várzea amazônica. Reconhecida pela "Convenção Ramsar" como uma área úmida de importância mundial, ela recentemente foi incluída em uma lista de unidades de conservação relevantes para a biosfera amazônica. Sua singularidade reside na combinação de conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável das comunidades locais (Mamirauá, 1996; Ferreira-Ferreira et al., 2015).

A RDSM possui um ecossistema de várzea que representa cerca de 5% da Amazônia, com variação do nível d'água entre 10 e 12 metros, com o período de cheia ocorrendo entre os meses de maio até meados de julho, seguida da vazante que se estende até setembro. A seca ocorre entre setembro e novembro. Já a enchente de dezembro a maio. A dinâmica do regime de águas influencia fortemente a flora e fauna, criando e destruindo terrenos rapidamente. A vegetação recoloniza rapidamente, adaptando-se às alternâncias sazonais de cheia e seca que definem a várzea (Mamirauá, 1996; Ferreira-Ferreira et al., 2015).

De acordo com o plano de manejo da RDSM os terrenos são de origem quaternária, especificamente holocênica, formados por sedimentos recentes dos Andes. Estes terrenos são atravessados por vários paranás, pequenos canais e lagos, que se conectam durante as enchentes. Na época seca, muitos lagos ficam isolados (RDSM, 2010). A RDSM possui mais de 4215 lagos, 88 ressacas e 37 Paranás (Mamirauá, 2024).

Os solos da RDSM são hidromórficos, com camadas de cores distintas devido à gleização e oxidação. As estações do ano são definidas pelo regime de cheias e secas. O regime hidrológico da região apresenta um padrão sazonal bem definido, com períodos de cheia e seca alternados. As maiores enchentes ocorrem geralmente em junho,

enquanto os níveis mínimos são registrados entre setembro e novembro, com pico em outubro. Tal variação, influenciada pelo regime de chuvas local e pelas condições climáticas dos Andes, molda a paisagem e os processos ecológicos da região (IDSM, 2010).

Os principais tipos de vegetações observados na reserva são de chavascal, várzea baixa, várzea alta e vegetação herbácea. O chavascal são formações geológicas mal drenadas que se desenvolvem em antigas depressões, canais abandonas e lagos rasos ocupados por uma vegetação densa e pobre de arvores e arbustos de pequeno porte. Já as várzeas baixas e altas tem características florísticas e estruturais induzida pelos pulsos de inundações. A várzea baixa comparada a várzea alta tem uma menor diversidade de espécies, de menor porte e copas esparsas (Ferreira-Ferreira et al., 2015; Streher, et al., 2015).

Segundo Ferreira-Ferreira et al., 2015, as regiões de chavascal na RDSM apresentam uma inundação variando entre 5 e 7 metros entre 180 e 240 dias por ano. As áreas de vegetação de várzea baixa ficam predominantemente inundadas entre 120 e 180 dias por ano, em uma inundação variando entre 2,5 a 5 metros. Enquanto, várzea alta tem suas regiões inundadas entre 60 e 120 dias com nível da água que chegam entre 1,2 e 5 metros.

A Região de estudo recebe entre 2200 e 2400 mm de chuva anualmente, com registros de até 2890 mm. A maior parte da precipitação ocorre entre janeiro e abril, sem meses com menos de 60 mm ou mais de 450 mm. As temperaturas do ar variam, com máximas de 30 a 33 °C nos meses secos (outubro e novembro) e mínimas entre 21 e 23°C. A amplitude térmica mensal média na RDSM é de 8 a 10 °C (Salati & Marques, 1984; Mamirauá, 1996).

O nome Mamirauá vem do lago localizado na parte da central da reserva. A economia local é tipicamente de subsistência. As atividades são compostas de agricultura familiar, pesca artesanal e comercial, extração de madeira e de produtos florestais não-madeireiros além do turismo de base comunitária (IDSM, 2010).

O rio Japurá, que define parte do limite da RDSM, possui vazão média anual de 18.600 m³/s (Latrubesse, 2008). Ele tem sua origem na Colômbia, onde é conhecido como Caquetá, antes de desaguar na margem esquerda do rio Solimões, próximo a

cidade de Tefé, no Brasil. A extensão do rio é de aproximadamente 2100 km. O rio é classificado como de águas brancas, exibindo uma tonalidade turva, e contém quantidades significativas de cálcio e magnésio em comparação com o sódio e o potássio (Conchy, et al., 2011).

O rio Solimões drena uma extensa área no Peru, com muitos de seus afluentes originando-se na Cordilheira dos Andes e seguindo em direção ao território brasileiro. Juntamente com o rio Madeira, o rio Solimões é responsável por cerca de 97% do transporte de material em suspensão da bacia Amazônica para o oceano, segundo Filizola e Guyot (2007). A concentração de sedimentos do rio Solimões na estação de Fonte Boa tem uma média anual de 192 mg.L^{-1} , com uma descarga de sedimentos de $6,43 \times 10^8 \text{ t/ano}^{-1}$ (Espinoza-Villar et al., 2017).

2.2 Material e Métodos

Este estudo realizou uma análise hidrossedimentar com dados de concentração de sedimentos suspensos por meio de dados de campo e estimados com imagens de satélites, reflectância da água, níveis dos rios Japurá e Solimões e dados de precipitação, como pode ser visto no quadro 2.

A pesquisa dispôs de dados de concentração de sedimentos suspensos por meio das amostras de coletas de água da superfície e da assinatura espectral da água para obtenção da Refletância de Sensoriamento Remoto, que foram coletados em campo por meio de espectralímetro, em diferentes períodos no ano de 2024. A análise hidrossedimentar também foi realizada com imagens do Sensor MODIS no período de 2003 a 2024 (Fassoni-Andrade e Paiva, 2019). Os autores desenvolveram um modelo bio-óptico para estimar a CSS a partir de imagens das bandas do vermelho e infravermelho do sensor MODIS.

As estimativas de Precipitação foram obtidas do Satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) da plataforma Giovanni da National Aeronautics and Space Administration - NASA, com intervalo de dados de 2003 a 2017. Dados de nível do rio que serão utilizados são provenientes da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) HIDROWEB – SNIRH, gerenciada pela Agência Nacional de Águas – ANA no período de 2003 a 2024.

Quadro 2 - Obtenção de dados e Processamento

LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO			
artigos, dissertações, teses, livros e blogs		Fichamento	Redação
OBTENÇÃO DOS DADOS			
DADOS	FONTE	INTERVALO TEMPORAL	SITES
Precipitação estimada	NASA	Período 2003 a 2017; TRMM (3B43)	https://giovanni.gsfc.nasa.gov/
Cota do Rio	ANA/ RHN	Período 2003 a 2017; Estação 12351000; Estação 12872000; Estação 12850000;	www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao
CSS Estimado	Fassioni-Andrade e Paiva, 2019/ MODIS	Período 2003 a 2017; banda do RED e NIR;	FASSONI-ANDRADE, Alice César; DE PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. Remote sensing of environment, v. 221, p. 94-107, 2019.
Refletância de Sensoriamento Remoto (Rrs)	Trabalho de campo	Equipamento: Espectroradiômetro	-
Concentração de Sedimentos Suspensos – CSS	Trabalho de campo	Amostras de água	
PROCESSAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS			
DADOS		SOFTWARE	
Coeficientes de R ² e Pearson		Excel	
Precipitação Estimada		QGIS, Giovanni e Excel	
Cota		Excel	
CSS (MODIS) e Campo		QGIS e Excel	
Refletância Sensoriamento Remoto (Rrs)		MSDA_XE e Excel	

2.2.1 Precipitação e Cota do Rio

Os dados de Precipitação utilizados nessa pesquisa são oriundos do projeto Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), uma missão da NASA, em parceria com a Agência Japonesa (JAXA) para monitoramento e compreensão da distribuição espacial da precipitação, tempestades e processos climáticos nos trópicos por meio de sensores infravermelho e radares.

O satélite meteorológico TRMM possibilitou o período de observação de 15 anos, entre 2003-2017 dos dados de precipitação, coletando esses dados próximo ao município de Fonte Boa e Marañ, próximo as estações Fluviométrica da ANA, como podemos ver na tabela 4. Os dados de precipitação foram adquiridos do produto 3B43-V7, disponibilizado no formato GeoTiff e apresentando uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, aproximadamente 25 km.

Para os valores de nível (cota) do rio Solimões e rio Japurá foram utilizados dados do Portal HidroWeb, que é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), gerenciada pela Agência Nacional de Águas – ANA, com os seguintes códigos de estações, 12351000, 12872000 e 12850000. Os dados de cota foram normalizados, onde a cota média mensal normalizada pela média anual ($H_{\text{mensal}}/H_{\text{anual}}$). A normalização tem o objetivo de ajustar variáveis ou dados para uma escala comum, eliminando a unidade de medida para facilitar combinação, correlações e dispersão de dados por exemplo.

Tabela 4 - Informações dos de Cota do Rio Solimões e Japurá.

Nome da Estação	Código da Estação	Rio	Período dos dados
Fonte Boa	12351000	Solimões	2003-2017
Marañ	12872000	Japurá	2003-2017
Acanauí	12850000	Japurá	2003-2017

Fonte: RHN-ANA (2024).

2.2.2 Sensoriamento Remoto Orbital

Nesta pesquisa, foram utilizados os produtos do sensor MODIS MOD09Q1 v6, do satélite Terra, e o MYD09Q1 v6, do satélite Aqua. Esses produtos fornecem, em escala diária, imagens de reflectância da superfície nas bandas espectrais 1 (vermelho: 620–670 nm) e 2 (infravermelho próximo – NIR: 841–876 nm), com resolução espacial de 250 metros.

As imagens do sensor MODIS utilizadas nesta pesquisa foram obtidas a partir do banco de dados compilado por Fassoni-Andrade e Paiva (2019). Os autores processaram mais de 2.750 imagens, que foram filtradas e ajustadas por meio de um modelo matemático, com o objetivo de analisar a variabilidade temporal da reflectância nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo sobre a planície do rio Amazonas. Para isso, utilizaram dados de Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) provenientes de 10 estações fluviométricas, com os quais avaliaram a relação entre as bandas espectrais mencionadas. O estudo resultou no ajuste de um modelo empírico (Equação 3) que correlaciona os valores de CSS com a reflectância obtida pelo sensor.

$$CSS (mg.L^{-1}) = \exp^{20 \cdot R_{red} + 7.68 \cdot R_{nir} + 0.31 \cdot \frac{R_{red}}{R_{nir}}} \quad (\text{Equação 3})$$

onde, CSS é a Concentração de Sedimentos Suspensos; exp é a função exponencial; 7.68 e 0.31 são constantes do modelo; Rred é a reflectância da banda do vermelho; Rnir é a reflectância da banda Infravermelho Próximo.

O modelo empírico da equação 3 possui de erro da ordem de 98 mg.L^{-1} , que limita as análises com valores de CSS absolutos, mas é um importante dado que permite analisar áreas sem amostragens de campo com grandes escalas para observar padrões da distribuição do CSS no espaço e tempo.

A Figura 7 apresenta a localização das seções utilizadas para a análise da Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) nas imagens MODIS, com base em análises pontuais representadas por gráficos e tabelas. A seção denominada Japurá Montante corresponde ao ponto de coleta destinado à estimativa da CSS antes da confluência com o rio Solimões, visando compreender a dinâmica sedimentar isolada do rio Japurá. A seção Solimões Montante refere-se ao ponto anterior à junção com o rio Japurá, onde foi analisada a água do rio Solimões sem influência da confluência. Já a

seção Japurá Jusante localiza-se após a entrada do rio Japurá no Solimões, pela via do paraná Aranapu, onde foi observada a interação entre as águas dos dois rios. Por fim, a seção Solimões Jusante corresponde ao trecho posterior à confluência, onde se avaliou o comportamento da CSS do rio Solimões após a entrada das águas do Japurá, conforme apresentado na Tabela 5.

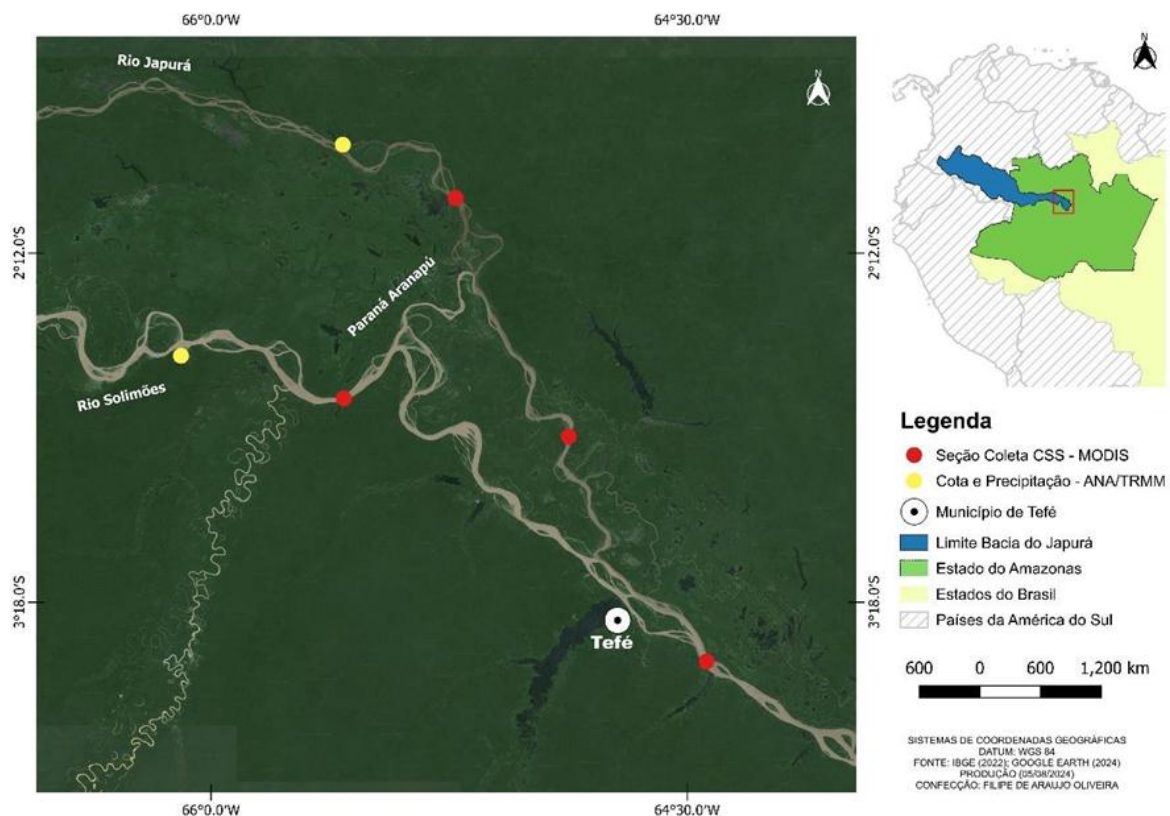
Com os dados obtidos em cada seção foram realizados gráficos de dispersão, cálculos de Correlação de Pearson, e gráficos de combinação de variáveis, como concentração de sedimentos suspensos, nível do rio e precipitação, e mapas da concentração de sedimentos suspensos.

Tabela 5 – Seção da CSS com dados MODIS.

Seção	Coordenadas
Japurá Montante	X: -65,2293078081, Y: -2,0263416987
Solimões Montante	X: -65,5817636404, Y: -2,6580289794
Japurá Jusante	X: -64,8725717901, Y: -2,7783968578
Solimões Jusante	X: -64,4389130568, Y: -3,4860807379

Fonte: RHN-ANA (2024).

Figura 7 - Localização das Seções de análise da CSS, Cota e Precipitação.



2.2.3 Sensoriamento Remoto de Campo e Coleta de Amostras de água

As medições radiométricas foram realizadas por um conjunto de Radiômetros modelo RAMSES da marca TriOS que operam no intervalo espectral de 350 a 950 nm, figura 8. As medições foram realizadas em diferentes períodos hidrológicos e em vários pontos das seções amostrais para aquisição da reflectância de sensoriamento remoto.

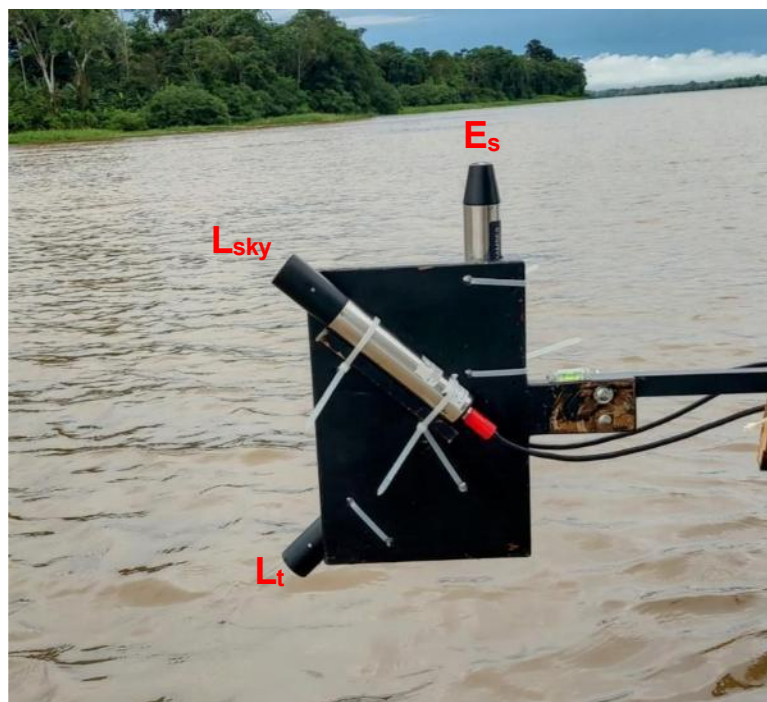
Figura 8 - Espectrorradiômetros TriOS.



Fonte: <https://www.trios.de/en/radiometers.html>

As medições realizadas acima da superfície do corpo d'água incluíram a irradiância incidente na superfície da água $E_s(\lambda)$, a radiância ascendente da superfície da água, $LT(\lambda)$ e radiância do céu $L_{sky}(\theta', \phi', \lambda)$ conforme descrito por Barbosa, Novo Martins (2019). Essas medições foram efetuadas entre 9h e 15h, no horário local, utilizando-se um suporte projetado para minimizar eventuais efeitos de sombreamento durante o processo de aquisição dos dados, conforme ilustrado na Figura 9. Durante as medições (figura 10), foram tomadas anotações sobre as condições do céu, vento, agitação do rio (figura 11).

Figura 9 - Espectrorradiômetros instalado para medição.



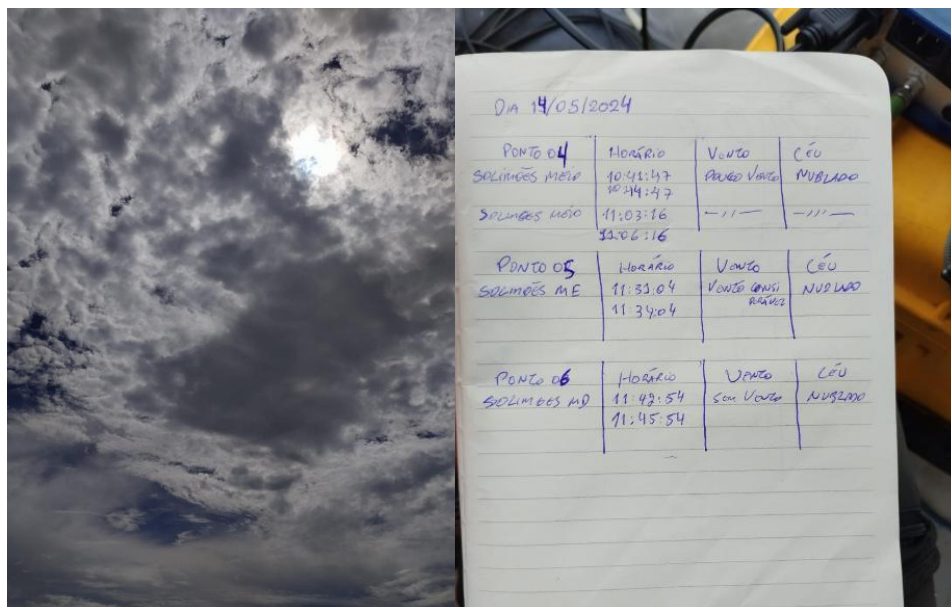
Fonte: Autor

Figura 10 – Operação do Espectrorradiômetro.



Fonte: Autor

Figura 11 – Coleta de dados sobre as condições de campo.



Fonte: Autor

A refletância de Sensoriamento Remoto (R_{rs}) foi obtida conforme equação 4:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_u(\lambda) - \rho \cdot L_d(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde E_d representa a irradiância que incide perpendicularmente (a 90°) sobre a superfície da água; L_u é a radiância ascendente da superfície da água medida a um ângulo de 45° em relação ao nadir (off-nadir); L_d corresponde à radiância proveniente do céu, também medida a 45° , utilizada para corrigir os efeitos da reflexão especular na interface ar-água. O parâmetro ρ é um fator de correção que leva em consideração as condições ambientais, como a velocidade do vento, o ângulo de elevação solar e a geometria de visada dos sensores utilizados nas medições.

As coletas de água na superfície para obter a concentração de sedimentos suspensos (Figura 12) foram realizadas em conjunto com medições radiométricas (Figura 13). O processamento das amostras para determinar a CSS foi realizado conforme o protocolo do Observatório HYBAM (2024). Amostras de 500 ml de água, coletadas na superfície, foram filtradas em membranas de acetato de celulose com $0,45 \mu\text{m}$ de porosidade, previamente pesadas. Após a filtração, os filtros foram secos em estufa a 105°C por duas horas, esfriados e pesados novamente. A concentração de sedimentos

suspensos (CSS), expressa em mg.L^{-1} , foi determinada pela diferença entre os pesos e dívida pelo volume de água da amostra.



Figura 12 - Amostra de água coletada para determinar a CSS.

Fonte: Autor



Figura 13 - Tipos de Color de água na área de estudo.

Fonte: Autor

Com apoio do CHN-9 da Marinha do Brasil, foi realizada uma campanha de campo em dezembro de 2023 para coleta de amostras de água e medições radiométricas em quatro seções. No ano de 2024, foram realizadas três campanhas. A primeira ocorreu entre os dias 14 e 18 de maio, abrangendo 13 seções com coleta de amostras de água

e medições de reflectância de sensoriamento remoto. Detalhes dessa campanha está disponível no StoryMap acessível pelo link: <https://arcg.is/1WSqz80>.

A segunda campanha foi realizada de 8 a 12 de julho de 2024, em 16 seções amostrais. As novas seções incluíram um ponto no rio Japurá (S3), antes da confluência com o Paraná do Aranapu, e outro no Paraná do Aranapu, conforme ilustrado na Figura 14. A terceira campanha ocorreu entre os dias 8 e 10 de setembro de 2024. Neste período, foi realizada a coleta de amostras de água e medições de reflectância em sete seções. O número reduzido de pontos deveu-se a dificuldades de acesso aos lagos durante o período seca. Durante a cheia o acesso a alguns lagos é bloqueado pela extensa área de macrófitas, como mostrado na Figura 15. Os nomes das seções, suas respectivas campanhas (1ª, 2ª ou 3ª), bem como as coordenadas geográficas, estão detalhados nos Quadros 3 e 4.

Quadro 3 - Seções da campanha - 2023

Seção	Nome	Campanha	Coordenadas
S1	Solimões Montante	1º	X: -65.4339, Y: -2.5066
S2	Solimões Jusante	1º	X: -64.4419, Y: -3.4639
S3	Aranapu	1º	X: -65.3774, Y: -2.3747
S4	Japurá Jusante	1º	X: -64.7578, Y: -3.0784

Elaboração: Autor

Quadro 4 - Seções das campanhas - 2024

Seção	Nome	Campanha	Coordenadas
S1	Rio Solimões Jusante	1º, 2º e 3º	X: -64.813655, Y: -3.175261
S2	Rio Japurá Jusante	1º, 2º e 3º	X: -64.899793, Y: -2.861463
S3	Lago Sumaúma	1º e 2º	X: -65.091764, Y: -2.743555
S4	Boca do Lago Cedrinho	1º e 2º	X: -65.0645834, Y: -2.8172512
S5	Lago Sumaumerinha	2º e 3º	X: -65.029185, Y: -2.819091
S6	Lago BuáBuá	1º e 2º	X: -64.97569, Y: -2.88215
S7	Paraná do Jarauá	1º, 2º e 3º	X: -64.996634, Y: -2.838443
S8	Lago Juruá Grande	1º e 2º	X: -64.852943, Y: -3.030616
S9	Paraná Apara	1º e 2º	X: -64.853969, Y: -3.03859
S10	Lago Mamirauá	1º e 2º	X: -64.913684, Y: -2.985902
S11	Cano Mamirauá	1º e 2º	X: -64.846915, Y: -3.061427

S12	Lago Tefé	1º, 2º e 3º	X: -64.709358, Y: -3.33957
S13	Canal Lago Tefé	1º, 2º e 3º	X: -64.70936, Y: -3.33957
S14	Paraná Porto Vale.	1º e 2º	X: -64.666872, Y: -3.355362
S15	Rio Japurá Montante	2º e 3º	X: -65.195617, Y: -2.101467
S16	Paraná Aranapu	2º	X: -65.2175, Y: -2.33405
S17	Rio Solimões Montante	3º	X: -65.4339, Y: -2.5066

Elaboração: Autor

Figura 14 - Mapa de Localização das seções de coleta e medições da 2ª campanha.

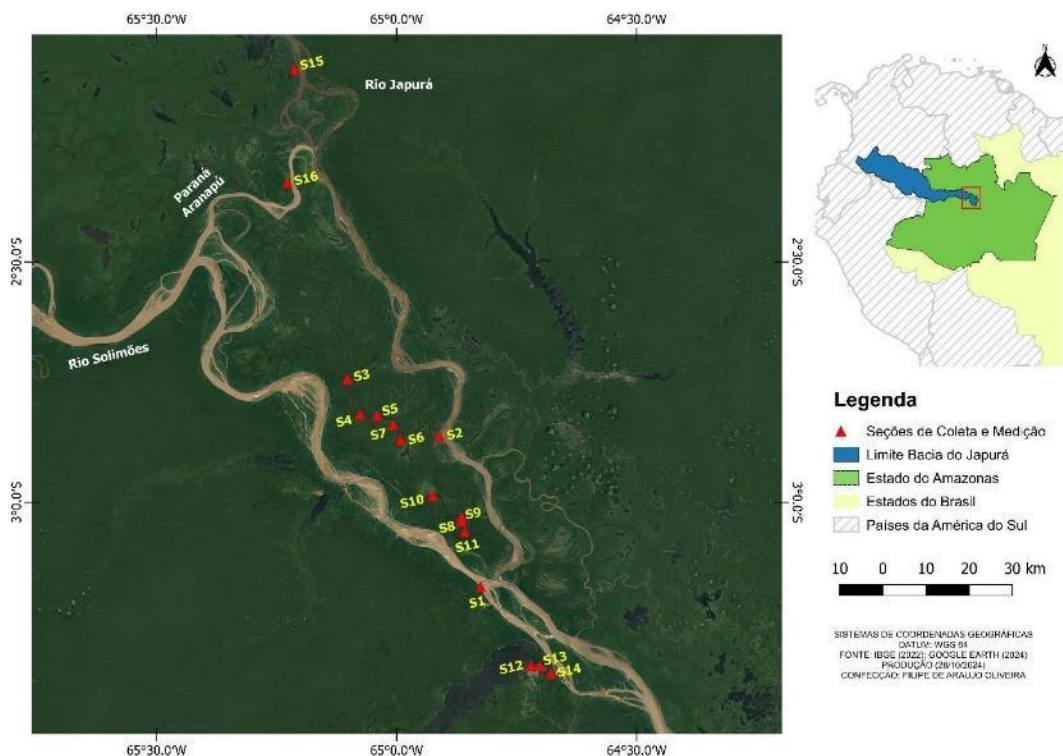


Figura 15 - Condições de acesso aos pontos de coleta de dados.



Fonte: Autor

2.2.3 Análise dos dados

Para analisar a correlação entre Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) e cota, CSS e precipitação, e entre cota e precipitação, foram construídos gráficos de dispersão que possibilitou a obtenção da equação de regressão linear e do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Conforme Tiboni (2010), a correlação pode ser positiva ou negativa. A correlação é positiva quando ambas as variáveis apresentam comportamento conjunto, isto é, o aumento dos valores da variável X implica no aumento dos valores da variável Y , caracterizando uma relação diretamente proporcional e resultando em um coeficiente angular positivo (reta ascendente). Por outro lado, a correlação é negativa quando as variáveis apresentam comportamentos inversos, ou seja, o aumento dos valores da variável X implica na diminuição dos valores da variável Y , indicando uma relação inversamente proporcional e um coeficiente angular negativo (reta descendente).

O coeficiente de correlação linear (r) avalia o grau de aproximação dos pontos aos valores previstos pela reta de regressão, permitindo estimar a intensidade da correlação

entre as variáveis analisadas (Tiboni, 2010), e possuem valores de referência para determinar o comportamento de intensidade conforme descritos na tabela 6.

Tabela 6 - Valores e interpretação do coeficiente da correlação de Pearson

Valor de r	Interpretação
$0 < r < 0,19$	Um correlação bem fraca
$0,20 \leq r < 0,39$	Uma correlação Fraca
$0,40 \leq r \leq 0,69$	Uma correlação Moderada
$0,70 \leq r \leq 0,89$	Uma correlação Forte
$0,90 \leq r \leq 1,00$	Uma correlação muito Forte

Fonte: Shimakura, 2006.

O coeficiente de determinação R^2 (R-quadrado) é uma medida estatística utilizada para avaliar o grau de ajustamento do modelo aos dados observados. O R^2 indica a proporção da variância da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes. Seu valor varia entre 0 e 1, onde 0 significa que o modelo não explica nenhuma variação de Y (variável dependente), enquanto 1 indica que o modelo explica perfeitamente toda a variação observada (Chein, 2019).

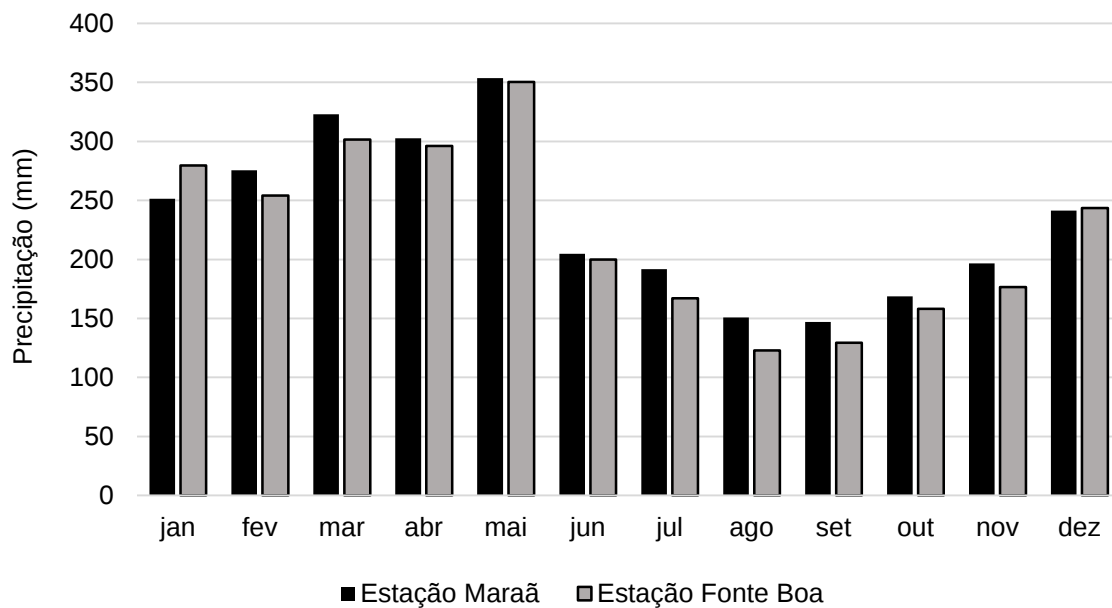
3 RESULTADO E DISCUSSÕES

3.1 Precipitação dos Rios Solimões e Japurá

Para a compreensão da dinâmica hidrossedimentar na área de estudo, é fundamental entender o comportamento das chuvas na região. De acordo com Marengo (2008), a precipitação representa a principal fonte de entrada de água no ciclo hidrológico, desempenhando papel importante na determinação dos períodos de cheia e de seca.

A Figura 16, que apresenta os dados de precipitação estimados pelo TRMM para o rio Japurá, revela um padrão sazonal bem definido, com maiores volumes de chuva entre os meses de dezembro e maio (pico de chuva). O período de junho a novembro é caracterizado por menores índices pluviométricos, sendo setembro o mês mais seco, com 147 mm de precipitação.

Figura 16 - Precipitação de média mensal dos rios Japurá e Solimões entre 2003 e 2017.



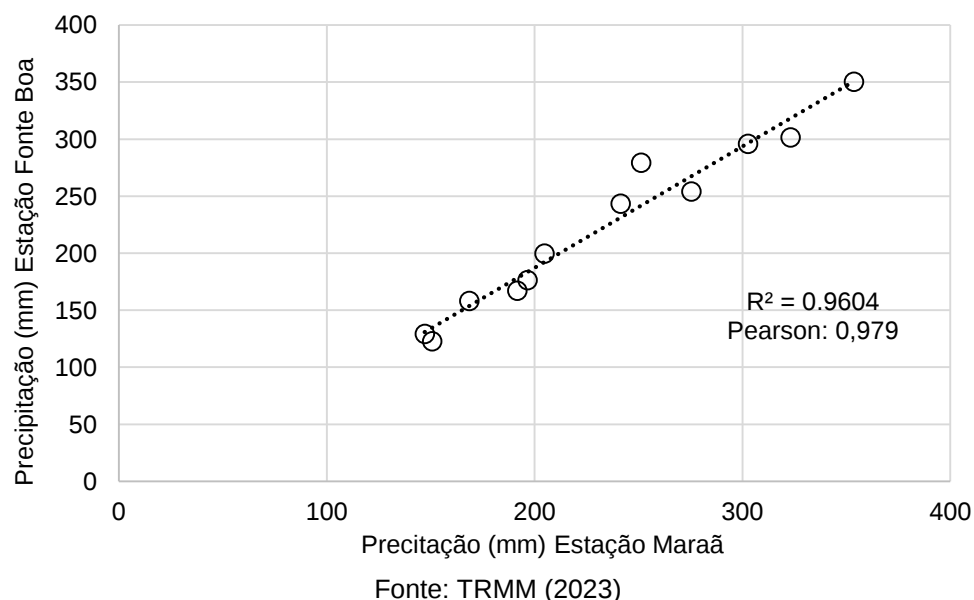
Fonte: TRMM (2023)

A precipitação na região do rio Solimões apresenta características semelhantes às observadas ao do rio Japurá, tanto em relação ao comportamento sazonal, com a distinção entre os meses mais chuvosos e os mais secos, quanto aos valores médios mensais absolutos de precipitação. De acordo com Marengo (2009) a climatologia da

Amazônia Central é marcada por um regime sazonal bem definido. O trimestre março-abril-maio (MAM) é o período de maior volume de chuvas na região, caracterizando a estação chuvosa, impulsionada principalmente pela atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Em contraste, os meses de junho, julho e agosto (JJA) correspondem ao trimestre de estiagem, quando a precipitação atinge seus níveis mais baixos devido ao deslocamento da ZCIT para latitudes mais ao norte. Essa sazonalidade define o regime hidrológico da Amazônia Central.

O gráfico de dispersão apresentado, na figura 17, mostra a relação entre os valores de precipitação estimada por satélite nas proximidades das estações de Fonte Boa e Maraã. Os dados indicam uma forte correlação positiva entre os níveis de precipitação média mensal nas duas localidades. Os pontos estão bastante próximos da linha de tendência, o que sugere uma relação linear bem definida entre as variáveis. Isso reforça a ideia de que os padrões de chuva nas duas regiões são semelhantes, uma vez que ambas estão inseridas na mesma região climática.

Figura 17 - Gráfico de dispersão da precipitação de média mensal dos rios Japurá e Solimões entre 2003 e 2017.

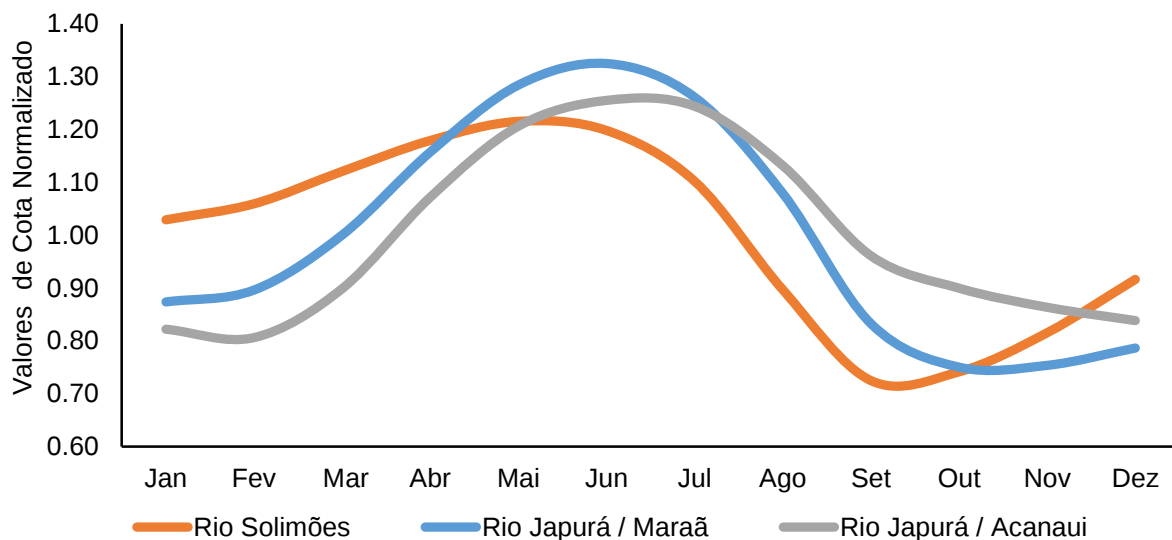


3.2 Cotas dos rios Solimões e Japurá

Com os dados de nível do rio fornecidos pela Agência Nacional de Água (ANA) das estações Acanauí (Rio Japurá), Maraã (Rio Japurá), e Fonte Boa (Rio Solimões), é

possível observar na figura 18 que, ao longo do ano, os rios Solimões e Japurá (na estação Maraã) apresentam comportamentos semelhantes nos níveis de água nessa região. Em média, o período de cheia no Rio Japurá (Maraã) inicia entre os meses de novembro a dezembro, com máximo da cheia em junho. Assim como o Rio Solimões que também seu início de cheia entre o fim de outubro e início de novembro com pico da cheia no mês de maio. Por outro lado, a vazante inicia entre os meses de agosto a setembro com cotas mínimas do rio ocorrendo em outubro no Rio Japurá, e no Rio Solimões a vazante inicia entre julho e agosto com mínimos em setembro. A amplitude entre cheia e seca do Rio Japurá (estação de Maraã) é em média 641 cm, enquanto no Rio Solimões é de 856 cm.

Figura 18 - Níveis dos rios normalizados da Estação Maraã (Rio Japurá); Estação Acanauí (Rio Japurá) e Fonte boa (Rio Solimões) entre 2003 e 2017.



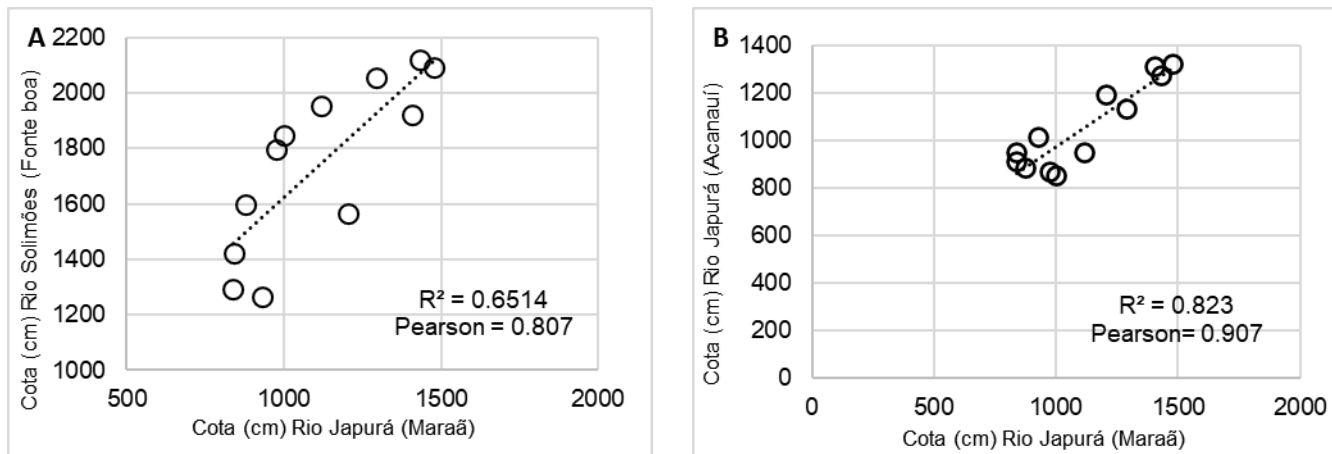
Fonte: ANA (2024).

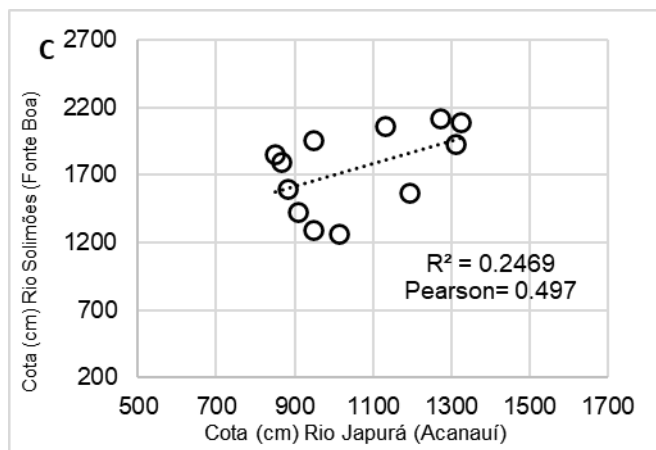
Nota-se diferenças nos regimes hidrológicos dos rios. Na estação Maraã a subida do rio Japurá inicia em novembro, e na estação Acanauí inicia entre os meses de março e abril. A vazante do rio Japurá em Maraã ocorre em outubro, e na estação Acanauí ocorre no mês de fevereiro. Nas estações Maraã e Acanauí, embora haja diferença no início da cheia e no pico da vazante, o início das vazantes ocorre em períodos semelhantes, por volta de setembro e outubro, respectivamente e ambas as estações

apresentam o pico da cheia no mês de junho. A amplitude entre cheia e seca do Rio Japurá (na estação Acanauí) é de 473 cm, menor comparada a estação Maraã.

Observa-se que os níveis de água ao longo dos meses entre o rio Japurá (estação Acanauí) e o rio Japurá (estação Maraã), conforme apresentado na figura 19b, apresentam uma forte correlação (Pearson= 0,90 e $R^2 = 0,82$). Por outro lado, a relação entre as cotas do rio Solimões (estação Fonte Boa) e do rio Japurá (estação Maraã), ilustrada na Figura 19a, também demonstra forte correlação (Pearson= 0.807 e $R^2 = 0,65$). Isso se deve ao efeito de barramento hidráulico do Rio Solimões sobre o Rio Japurá. A correlação entre os dados do rio Solimões (estação Fonte Boa) e do rio Japurá (estação Acanauí) é menor (Pearson= 0,497 e $R^2 = 0,2469$), resultado, principalmente, da distância entre as estações dos rios que possuem diferenças nas suas características hidrográficas, figura 19c.

Figura 19 – Correlação das Cotas dos rios (A) Estação Maraã (Rio Japurá) e Fonte Boa; (B) Estação Acanauí (Rio Japurá) e Estação Maraã (Rio Japurá); (C) Fonte boa (Rio Solimões) e Estação Acanauí (Rio Japurá).



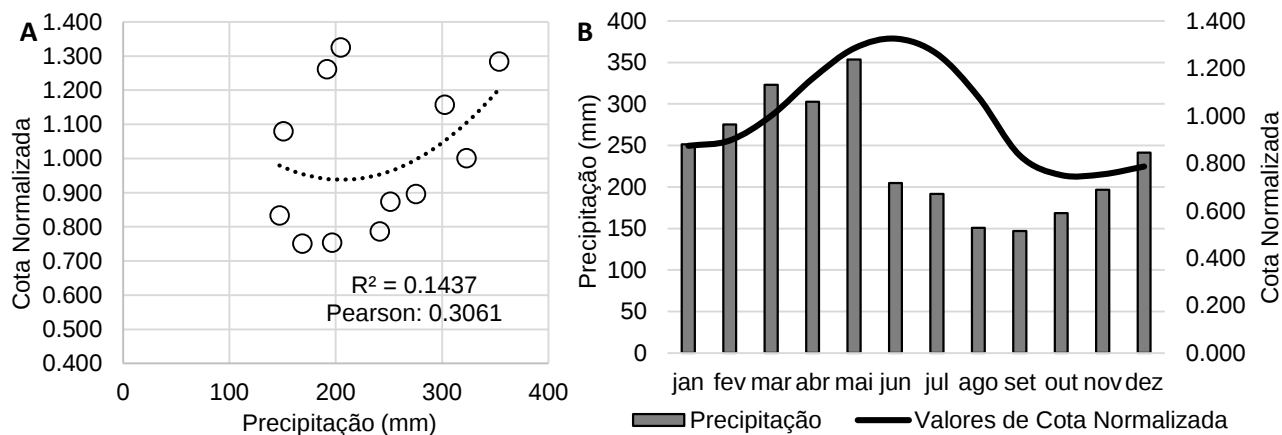


Fonte: ANA (2024).

3.2.1 Relação entre cotas dos rios e precipitação

O regime de precipitação do Rio Japurá, conforme ilustrado na Figura 20a, apresenta correlação fraca com o nível das águas do rio, evidenciada pelo coeficiente de Pearson de 0,3061 e $R^2 = 0,143$. A Figura 20b mostra que o aumento do nível do rio ocorre no primeiro semestre do ano, coincidindo com os meses mais chuvosos, de dezembro a maio. No entanto, o início do período de estiagem, a partir de junho, só impacta significativamente o nível do rio cerca de três meses depois, resultando em sua diminuição a partir de setembro.

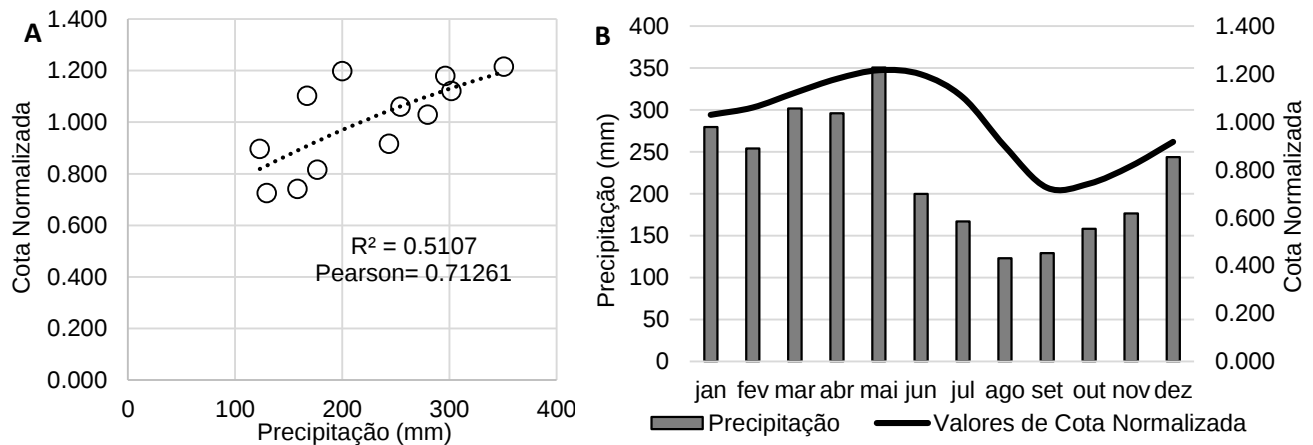
Figura 20 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de Combinação precipitação e nível do rio normalizado da Estação de Maraã (Rio Japurá) entre 2003 a 2017.



Fonte: ANA, 2024.

A correlação de Pearson entre a precipitação e o nível normalizado do rio Solimões é forte, com um coeficiente de 0,7126 e $R^2 = 0.712$, conforme mostrado na Figura 21a. Portanto, os meses mais chuvosos correspondem aos meses com os maiores níveis do rio Solimões, com exceção de junho e julho, que também apresentam altos níveis do rio, mas com precipitação média abaixo de 200 mm. Isso resulta em um desfasamento de dois meses entre o início do período de estiagem em junho e o início da descida do nível do rio em agosto.

Figura 21 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de combinação entre precipitação e nível do rio normalizado da Estação de Fonte Boa (Rio Solimões) entre 2003 a 2017.



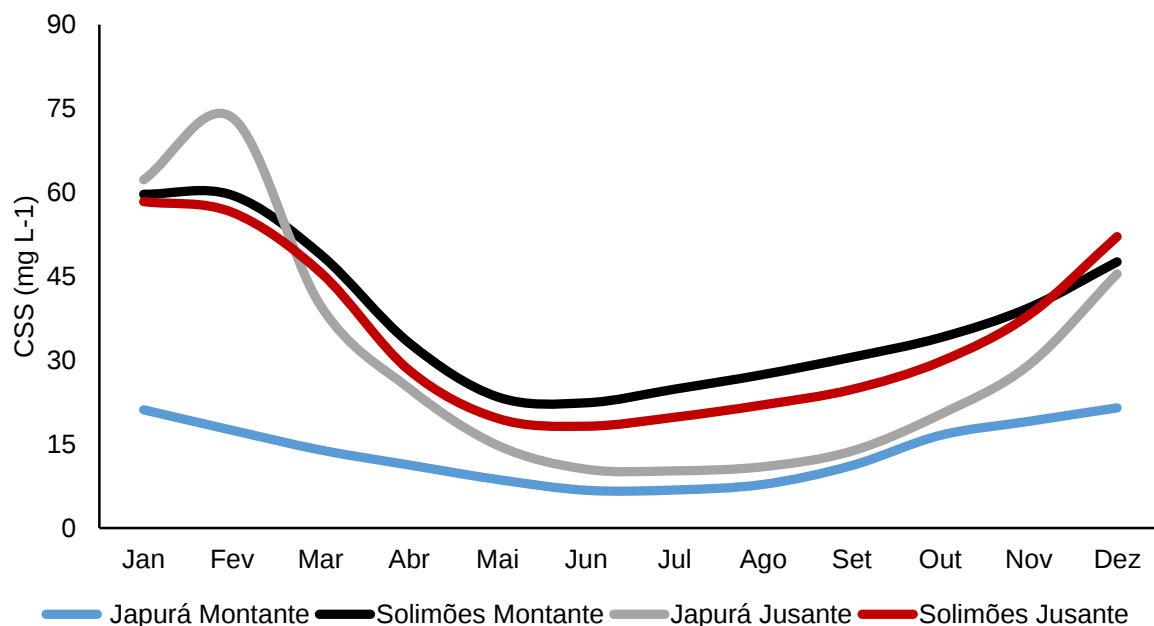
Fonte: ANA, 2024

3.3 Variabilidade da Concentração de Sedimentos Suspenso

Entre as quatro estações de observação da CSS, podemos notar na figura 22 que o Japurá montante é o ponto com as menores médias mensais de concentração de sedimentos. Já o Solimões montante na maioria dos meses apresenta maiores médias. Entre os picos de sedimentos de cada estação, o maior está localizado no Japurá Jusante, no mês de fevereiro com $73,42 \text{ mg.L}^{-1}$ e o menor nível de sedimentos no Japurá montante com $6,8 \text{ mg.L}^{-1}$ no mês de julho. De modo geral, existe um padrão de maiores níveis de CSS de outubro a março e as menores médias entre os meses de maio a agosto.

Dados da estação Japurá jusante apresenta elevação significativa da concentração de sedimentos suspensos após a confluência com as águas do rio Solimões que chegam tanto pelo Paraná do Aranapu quanto pelas várzeas de Mamirauá, esse aumento na CSS é observado na figura 22, entre os meses de novembro a abril. Os demais meses referente ao Japurá a jusante tem as CCS próxima as águas do Japurá a montante.

Figura 22 - Variabilidade média mensal da Concentração de Sedimentos Suspenso – CSS de 2003 a 2017.



Fonte: Fassoni-Andrade e Paiva, 2019

A seção Japurá Montante (figura 23b) apresenta uma correlação moderada com a seção Japurá Jusante (Pearson= 0.7778 e $R^2 = 0,6051$), que indica que a concentração de sedimentos suspensos no Japurá Jusante não é determinada exclusivamente pela CSS observada na seção montante.

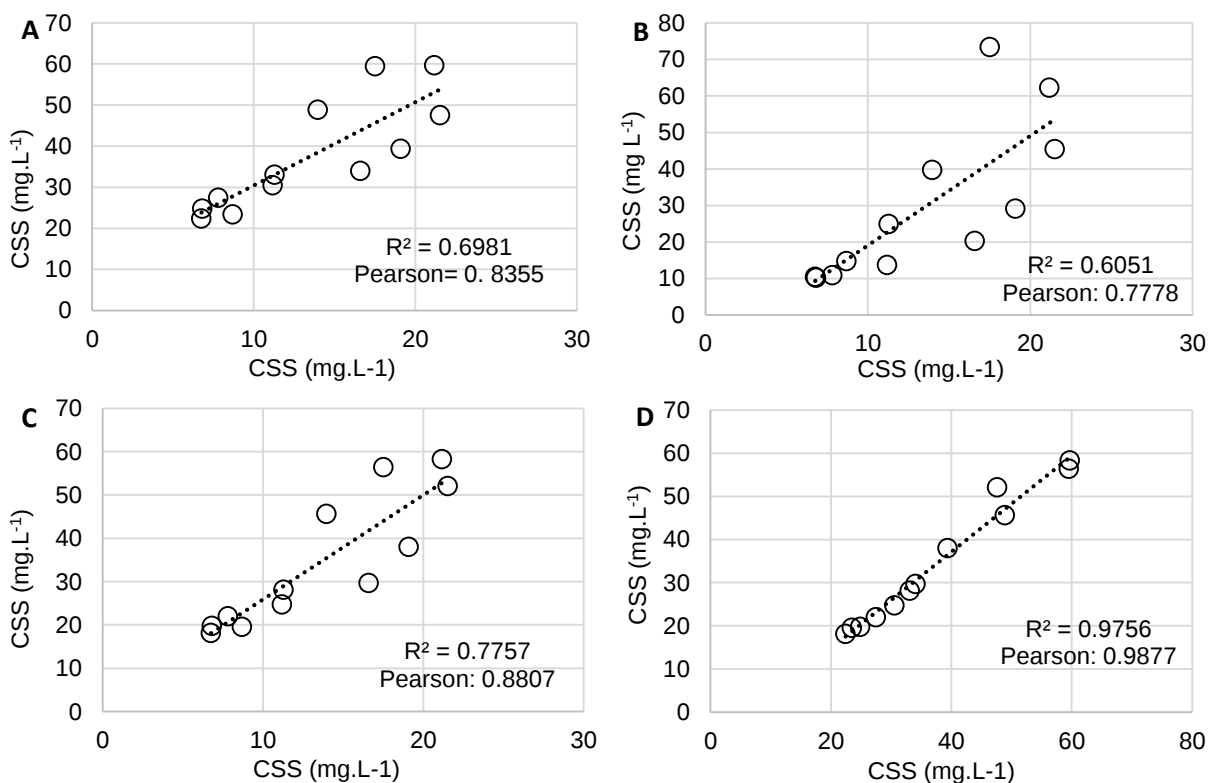
Nas seções do rio Solimões as correlações são mais elevadas. Como podemos observar na figura 23a (Pearson= 0.8355 e $R^2 = 0,94$) e a figura 23f (Pearson= 0,9606 e $R^2 = 0,92$) evidenciam fortes relações entre a CSS da seção Japurá Jusante e as seções Solimões Montante e Solimões Jusante, respectivamente. Esses resultados sugerem que o Solimões exerce uma influência sobre a concentração de sedimentos no Japurá

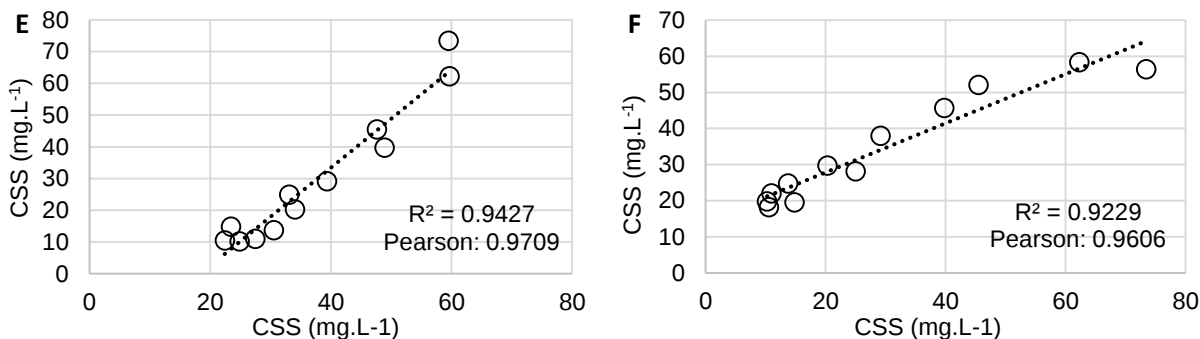
Jusante, o que pode ser atribuído a processos de confluência e mistura hidrossedimentológica entre os dois rios.

A forte correlação entre as seções Solimões Montante e Solimões Jusante, figura 23d (Pearson = 0,9877 e $R^2 = 0,97$), confirma a manutenção dos valores no transporte de sedimentos no trecho analisado. As correlações entre Japurá Montante e Solimões Montante, figura 23a (Pearson= 0,8355 e $R^2 = 0,69$), e entre Japurá Montante e Solimões Jusante Figura, 23c (Pearson= 0,8807 e $R^2 = 0,77$) reforçam a existência de uma conexão entre os sistemas fluviais, embora com menor intensidade comparada à forte influência do Solimões sobre o Japurá Jusante.

Estes resultados corroboram com estudo de Dunne et al. (1998), que destacam a importância dos grandes tributários na redistribuição dos sedimentos suspensos, principalmente nas confluências. Esses autores apontam que em sistemas de grande escala, a influência hidrodinâmica e sedimentar dos rios principais pode superar a contribuição local de rios menores ou montantes, como observado no presente estudo.

Figura 23 – Gráfico de dispersão da CSS A) Japurá Montante e Solimões Montante; B) Japurá Montante e Japurá Jusante; C) Japurá Montante e Solimões Jusante; D) Solimões Montante e Solimões Jusante; E) Japurá Jusante e Solimões Montante F) Japurá Jusante e Solimões Jusante.





Fonte: dados da pesquisa.

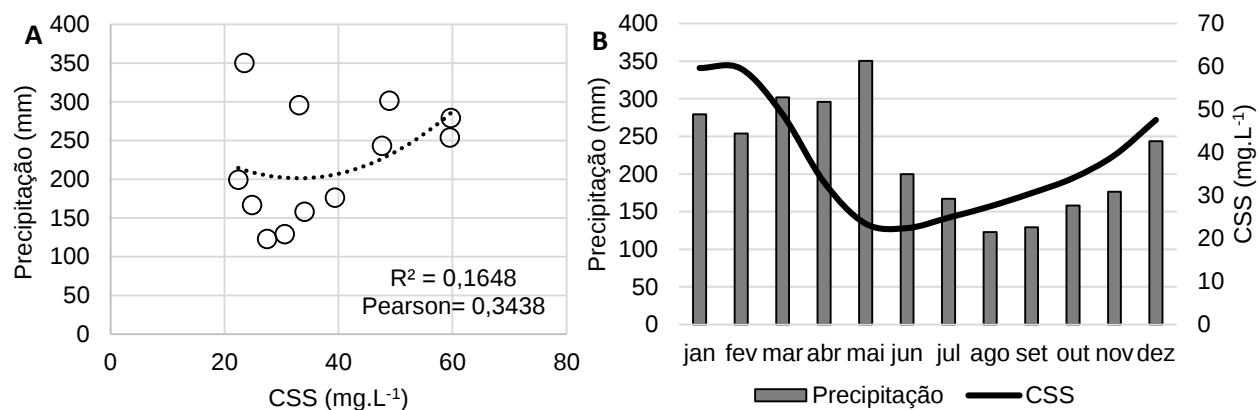
3.3.1 Relação de CSS e Precipitação

A precipitação é reconhecida como uma das principais variáveis que influenciam o regime hidrológico de um rio, e o nível do rio, logo, afetando diretamente a concentração de sedimentos suspensos. Estudo de Silva et al. (2008) mostrou os impactos da precipitação na qualidade da água do rio Purus, no estado do Amazonas, e encontraram correlações positivas entre a precipitação e os sólidos suspensos totais, indicando que o regime de chuvas influencia significativamente a qualidade da água.

A análise da relação entre a precipitação e a concentração de sedimentos suspensos (CSS) no rio Solimões e rio Japurá, com base nos dados de Precipitação por Satélite, próximos a estação de Fonte Boa e Marañ entre 2003 e 2017, indica correlação fraca (figuras 24a, 25a e 26a), com R^2 variando entre 0,044 e 0,164. Isso sugere que, de forma geral, à medida que a precipitação aumenta, a CSS tende a diminuir, embora essa relação não seja forte.

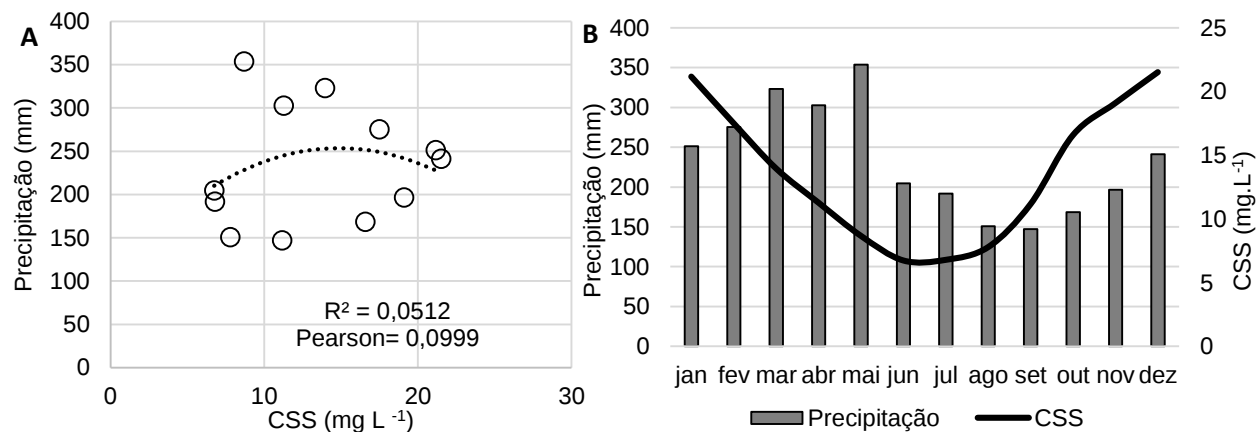
Durante o período de enchente, que tem início geralmente entre os meses de dezembro e janeiro, inicia o transporte de sedimentos erodidos das margens e das áreas de cabeceira. Segundo Filizola e Guyot (2011) e Park e Latrubesse (2014), é nesse intervalo que os valores de concentração de sedimentos suspensos (CSS) tendem a se elevar de forma significativa. Os picos de concentração de sedimentos frequentemente ocorrem antes do pico de vazão e durante os maiores níveis mensais de chuva, evidenciando que a produção de sedimentos está mais associada ao início do aporte fluvial do que ao volume máximo de água.

Figura 24 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico de precipitação estação Fonte Boa e CSS na estação Solimões montante entre 2003 e 2017.



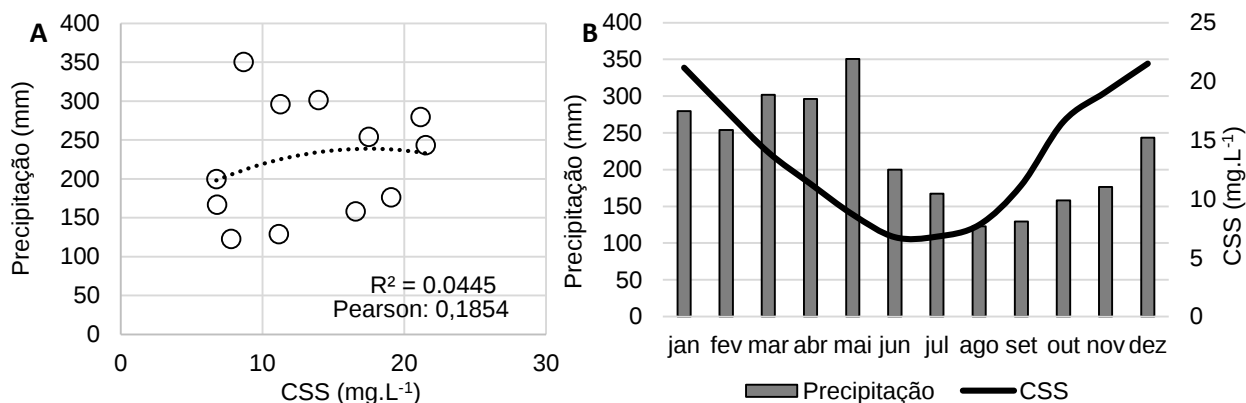
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 25 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre precipitação na estação Maraã e CSS na estação Japurá Montante entre 2003 e 2017.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 26 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre precipitação na estação Fonte Boa e CSS na estação Japurá Montante entre 2003 e 2017.



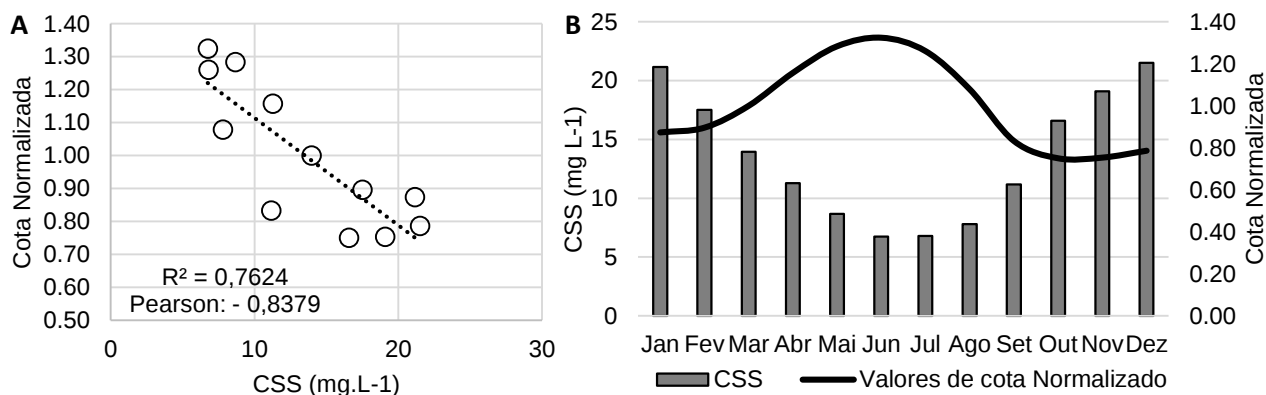
Fonte: dados da pesquisa.

3.3.2 Relação de CSS e Cota

Para compreender a dinâmica da Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) no Rio Japurá, Rio Solimões e no ponto de confluência próximos ao Paraná do Aranapu, conhecido pelo ribeirinhos como rio Aranapu, foram confeccionados gráficos de dispersão e analisadas as correlações de Pearson entre a CSS e os valores de nível da água normalizados nas seguintes estações: estação de Maraã (cota do rio Japurá) x CSS Japurá Montante, estação de Fonte Boa (cota do rio Solimões) x CSS do Solimões Montante, Japurá Jusante e Solimões Jusante.

A correlação entre valores médio mensal do nível em Maraã e a CSS do Japurá a montante do Paraná Aranapu foi inversa e forte (Pearson = -0,8379 e $R^2 = 0,7624$), indicando que os maiores níveis de CSS ocorrem entre outubro e fevereiro, período de águas baixas (Figura 27a).

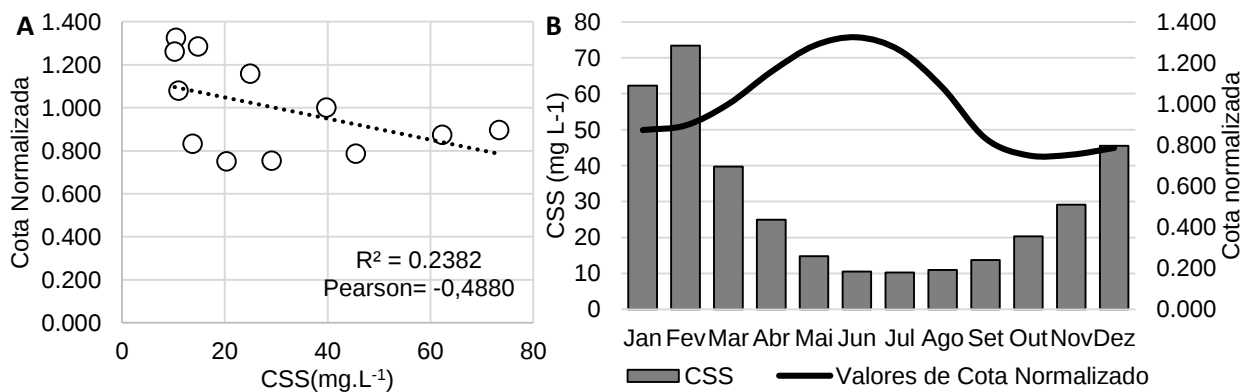
Figura 27 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre nível do rio normalizado da Estação de Maraã (Rio Japurá) e CSS na estação Japurá Montante 2003 e 2017.



Fonte: dados da pesquisa.

O pico de CSS nesse trecho ocorre entre dezembro e janeiro, aproximadamente cinco meses antes da cheia do rio Japurá observada em Maraã, no mês de junho. Esse padrão é semelhante ao verificado no rio Purus (Santos, 2015) e no rio Negro (Marinho et al., 2022). Após a confluência com o Paraná Aranapu, a CSS do rio Japurá a jusante (Figura 28A) apresenta uma correlação reduzida com os valores de nível registrados na estação de Maraã (Pearson = $-0,4880$ e $R^2 = 0.2382$), indicando que a concentração de sedimentos em suspensão nesse trecho tem pouca relação com as variações do nível do rio Japurá.

Figura 28 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre nível do rio normalizado da Estação de Maraã (Rio Japurá) e CSS na estação Japurá Jusante 2003 e 2017.

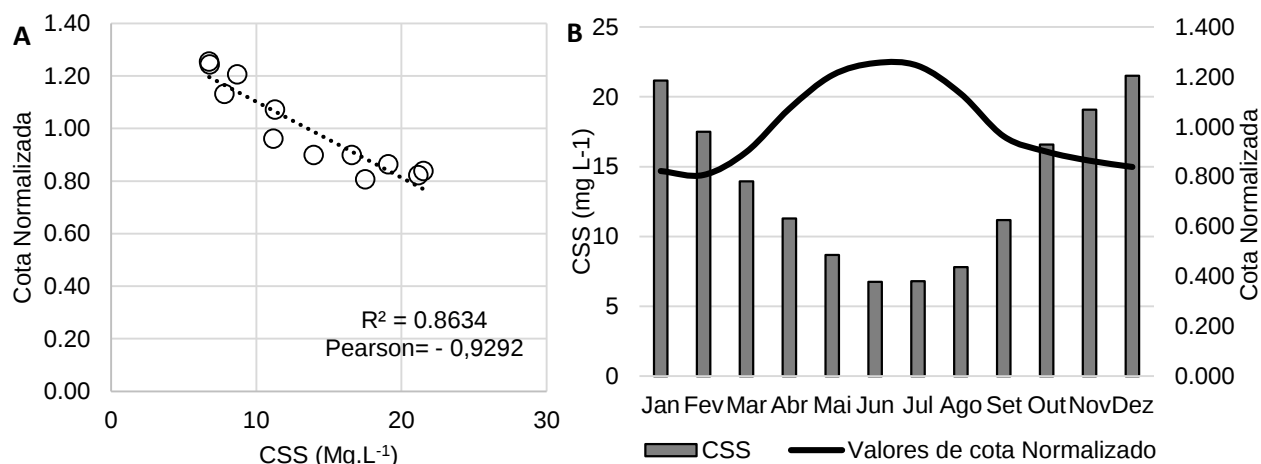


Fonte: dados da pesquisa.

O rio Japurá, na estação Acanauí localizada a montante da estação Maraã também apresenta uma forte correlação inversa (Pearson = -0,9292 e $R^2 = 0,8634$), conforme ilustrado na Figura 29a. Esse resultado permite inferir que, mesmo com algumas diferenças no regime hidrológico das estações Acanauí e Maraã, a correlação entre as cotas das estações e o CSS na seção montante do Japurá permanece fortemente inversa.

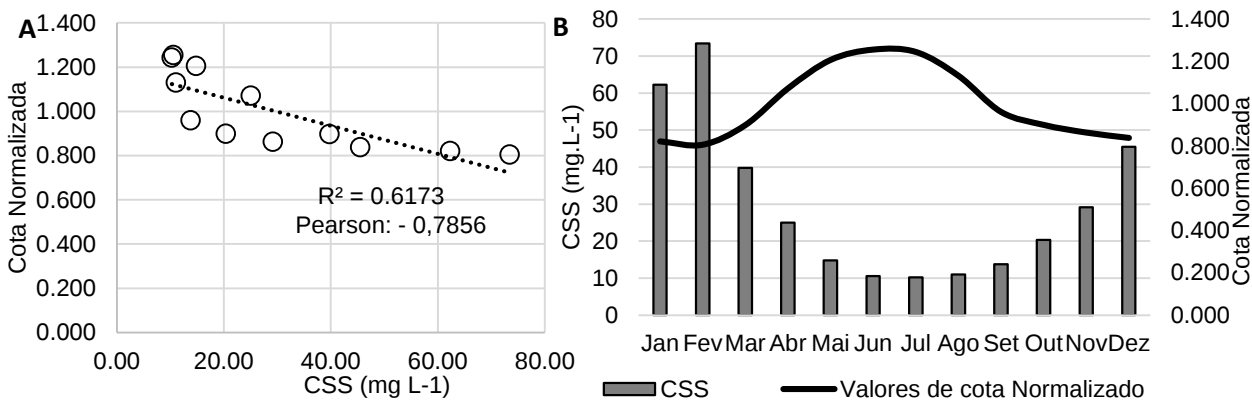
Na Figura 30a observa-se redução na correlação entre dados da estação Acanauí e a seção jusante do Japurá, em comparação à correlação entre Acanauí e a seção montante, indicando uma menor influência da variação de cota de Acanauí sobre o CSS na região jusante.

Figura 29 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre nível do rio normalizado da Estação de Acanauí (Rio Japurá) e CSS na estação Japurá Montante 2003 e 2017.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 30 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre nível do rio normalizado da Estação de Acanauí (Rio Japurá) e CSS na estação Japurá Jusante 2003 e 2017.

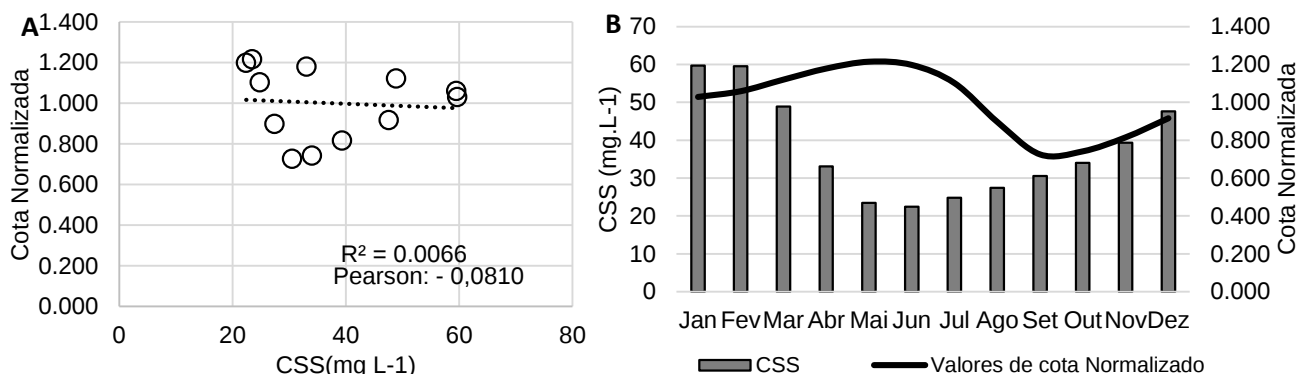


Fonte: dados da pesquisa.

Nas seções Solimões Montante (figura 31a) e Solimões Jusante (Figura 33a), a correlação de Pearson entre a CSS e os níveis de água da estação de Fonte Boa é fraca. Nessas seções, as maiores concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) ocorrem entre outubro e março, enquanto os menores níveis do rio são registrados entre agosto e dezembro. Assim, o período de maior CSS inicia-se cerca de dois meses após o início da descida do nível do rio Solimões, e o período de menor CSS tem início aproximadamente três meses após a elevação do nível do rio.

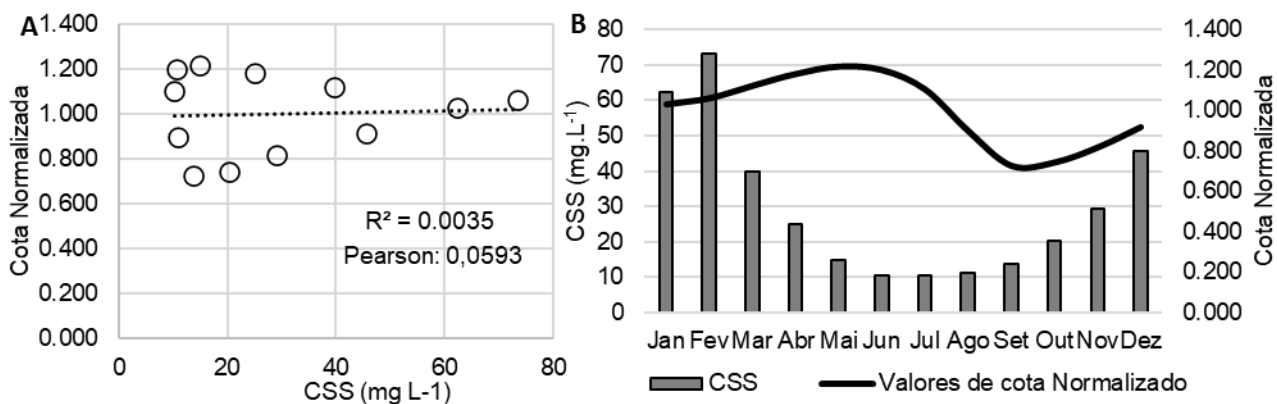
Na seção Japurá Jusante (figura 32a), observa-se que para diferentes níveis do rio Solimões, que variam de 1291 a 2091 cm na estação Fonte Boa, há pouca variação do CSS do rio Japurá, oscilando entre 10,25 e 13,77 mg.L⁻¹.

Figura 31 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre nível do rio normalizado da Estação Fonte Boa (Rio Solimões) e CSS na estação Solimões Montante – CSS de 2003 a 2017.



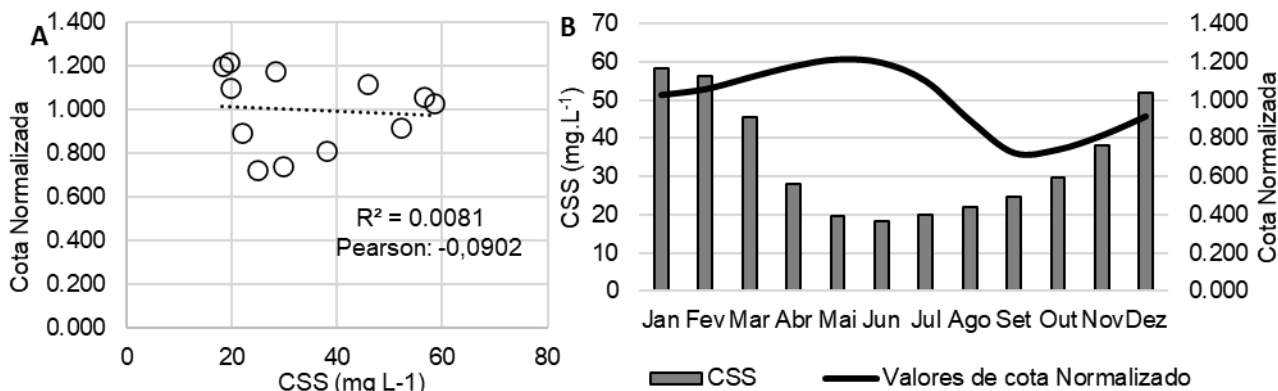
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 32 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre nível médio d'água mensal normalizado da Estação Fonte Boa (Rio Solimões) e CSS na estação Japurá Jusante de 2003 a 2017.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 33 - A) Gráfico de dispersão e correlação de Pearson e B) Gráfico entre nível médio d'água mensal normalizado na Estação Fonte Boa (Rio Solimões) e CSS Solimões Jusante de 2003 a 2017.



Fonte: dados da pesquisa.

3.3.3 Distribuição espacial da CSS

A análise espacial das concentrações médias mensais de sedimentos suspensos (CSS) ao longo do sistema fluvial revela um comportamento distintos entre os trechos do rio Japurá e do rio Solimões. Nas seções Acanauí e Japurá Montante os valores de CSS mantêm-se abaixo de 40 mg.L⁻¹ durante a maior parte do ano. Essa constância indica uma menor variabilidade na carga sedimentar.

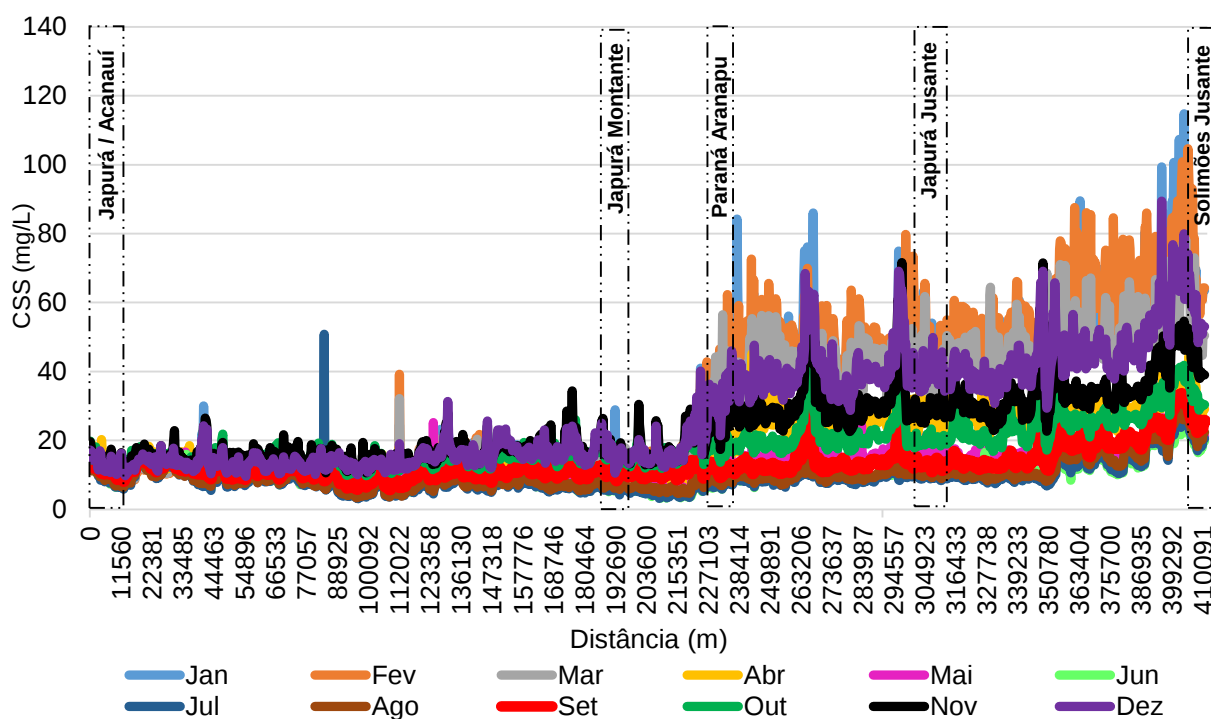
Essa dinâmica muda significativamente a partir da confluência com o rio Solimões, especialmente na região do Paraná do Aranapu e nas seções posteriores a essa confluência. O perfil longitudinal da figura 34 ilustra aumento considerável nas concentrações de sedimentos suspensos a partir de Aranapu, com valores variando entre 42,3 mg.L⁻¹ e ultrapassando os 81 mg.L⁻¹. Tal aumento é particularmente notável nos meses de dezembro a março período geralmente associado a maiores volumes de precipitação e aumento do fluxo fluvial.

Segundo Espinoza-Villar et al. (2017), à medida que o rio avança para jusante, a concentração de sedimentos diminui gradativamente, em parte pela diluição com as águas mais pobres em sedimentos dos tributários da margem norte, como os rios Napo e Japurá, mas também devido a processos de sedimentação na planície de inundação. Essa redução pode chegar a 40% entre estação de Tamshiyacu (Peru) e Manacapuru

(Brasil), sendo mais acentuada nos períodos de seca setembro-outubro, quando os afluentes contribuem com menor volume de água.

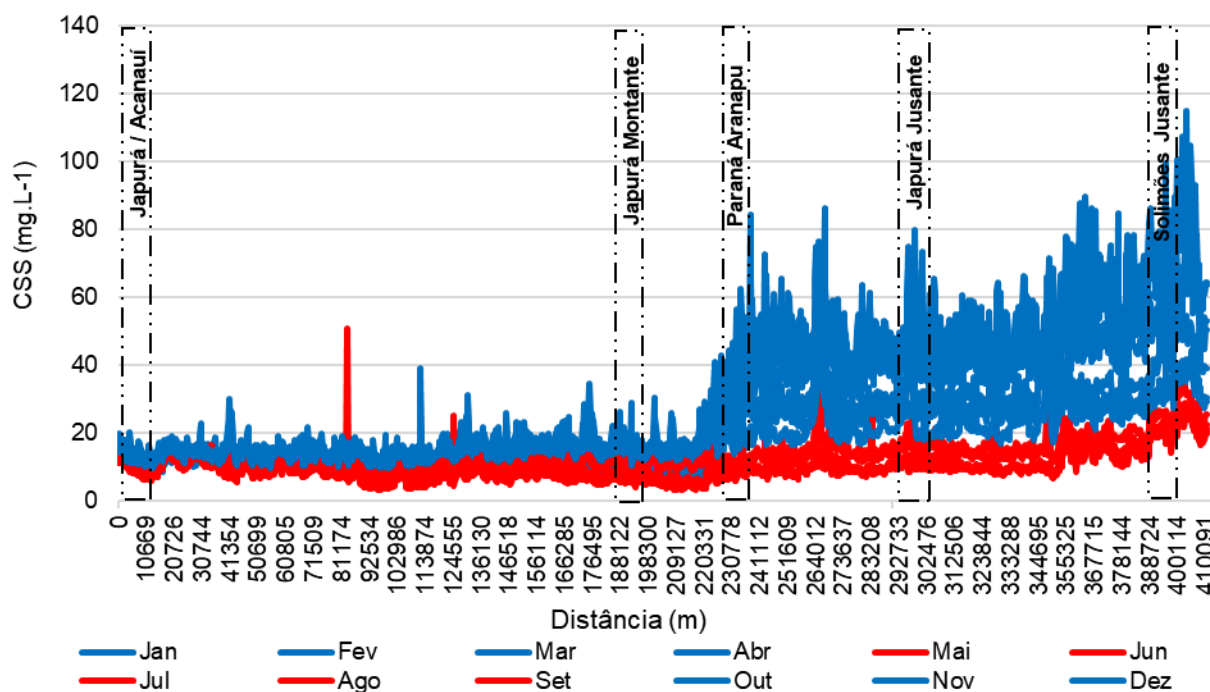
Conforme evidenciado na figura 35, o aumento das concentrações de CSS no rio Japurá, em azul, a partir do trecho do Paraná do Aranapu, ocorre predominantemente entre os meses de outubro e abril, período que abrange as menores cota. Entre maio e setembro não se observa aumento significativo nas concentrações de CSS nesse trecho, correspondendo ao intervalo em que os rios Japurá e Solimões apresentam maiores cotas.

Figura 34 – Perfil longitudinal da CSS (média mensal) entre os rios Japurá e Solimões.



Fonte: dados da pesquisa

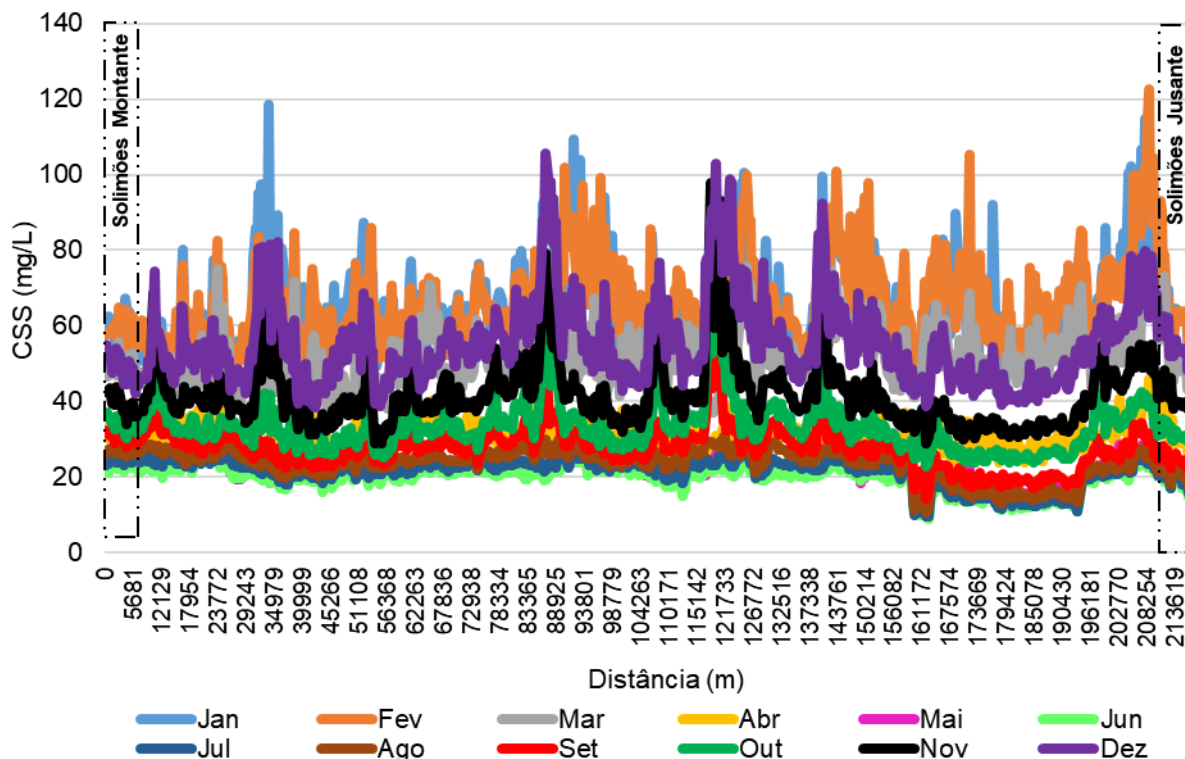
Figura 35 - Perfil longitudinal da CSS entre os rios Japurá e Solimões nos meses de águas altas (vermelho) e baixas (azul).



Fonte: dados da pesquisa.

A Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) no trecho do rio Solimões, da figura 36, compreendido entre as seções Solimões Montante e Solimões Jusante, evidencia uma dinâmica hidrossedimentar intensa e altamente sazonal, com flutuações significativas ao longo do ano. Os valores de CSS estimados neste trecho mantêm-se em patamares elevados durante grande parte do ciclo anual, com médias variando entre 40 e 90 mg.L⁻¹, com picos acima de 100 mg.L⁻¹.

Figura 36 - Perfil longitudinal da CSS da entre as seções Solimões Montante e Jusante.



Fonte: dados da pesquisa

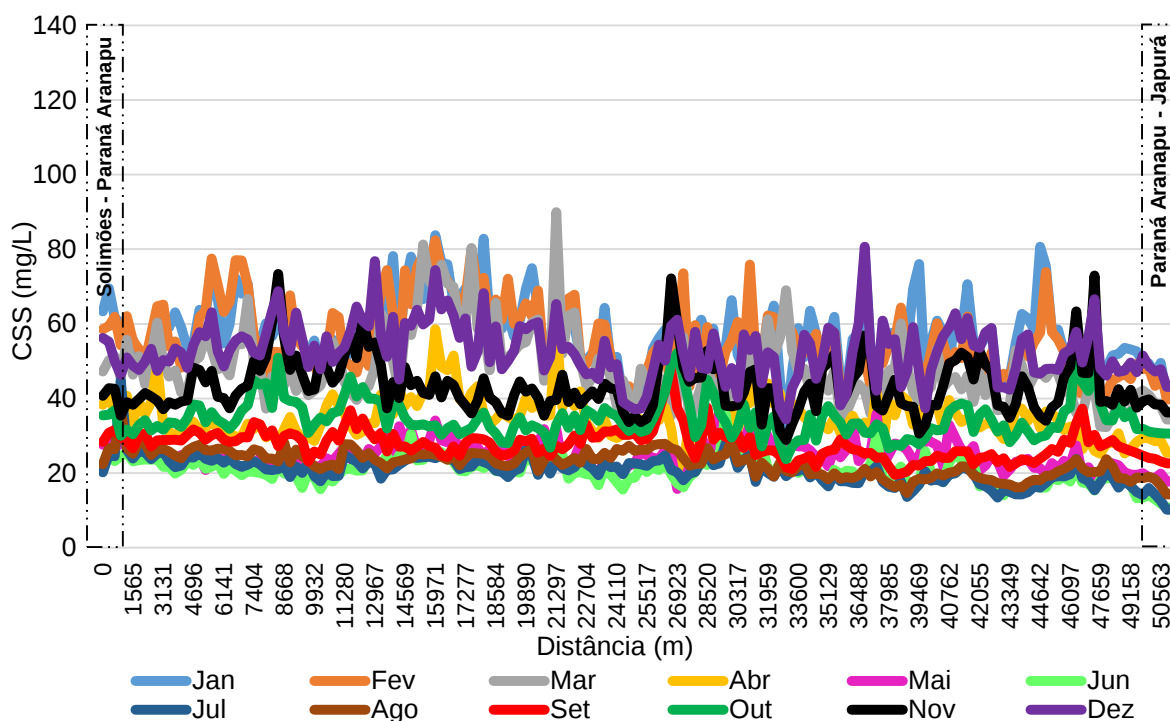
Observa-se que, de outubro a março, ocorrem as maiores concentrações de CSS no rio Solimões, sendo os meses de dezembro, janeiro e fevereiro os que apresentam os valores mais elevados, que frequentemente ultrapassam 80 mg.L^{-1} e, em alguns casos, superam 120 mg.L^{-1} com mínima de 34.5 mg.L^{-1} . Estes meses correspondem ao período início de cheia, quando o aumento das chuvas sobre a bacia amazônica eleva o escoamento superficial e, conseqüentemente, o aumento de CSS.

Entre maio e agosto registram-se as menores concentrações, com CSS na ordem de 30 mg.L^{-1} . Esse período abrange os meses de pico da cheia, de maio a julho, quando ocorre, segundo Filizola e Guyot (2011); Park e Latrubesse (2014), a diluição dos sedimentos em suspensão e a retenção de sedimentos nas planícies de inundação, onde parte da carga sedimentar é depositada temporariamente.

A variação sazonal da Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) no canal do Paraná do Aranapu, conforme ilustrado na figura 35, mostra esse trecho do rio como canal de conexão entre o rio Solimões e o rio Japurá. A série temporal na figura 37 aponta

que as concentrações de CSS neste canal oscilam entre valores mínimos de 10 mg.L⁻¹ e máximos de 45 mg.L⁻¹ entre os meses de maio a agosto e picos que frequentemente ultrapassam 80 mg.L⁻¹ entre os meses de dezembro a março, com valores mínimos de 32 mg.L⁻¹. Na figura 38, as águas do Rio Solimões alteram significativamente a dinâmica hidrossedimentar do baixo curso do rio Japurá ao longo do ano, com os maiores intervalos de CSS de 42 a 81 mg.L⁻¹ entre os meses de dezembro a março, predominando os canais do Rio Solimões e do Japurá após confluência com o Paraná do Aranapu. Na figura 39 também podemos visualizar detalhe a distribuição espacial da CSS entre águas baixas e altas.

Figura 37 - Perfil de CSS entre as seções do Paraná Aranapú a montante e jusante do Rio Japurá.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 38 – Distribuição espacial da CSS na área de estudo. Fonte: dados da pesquisa.

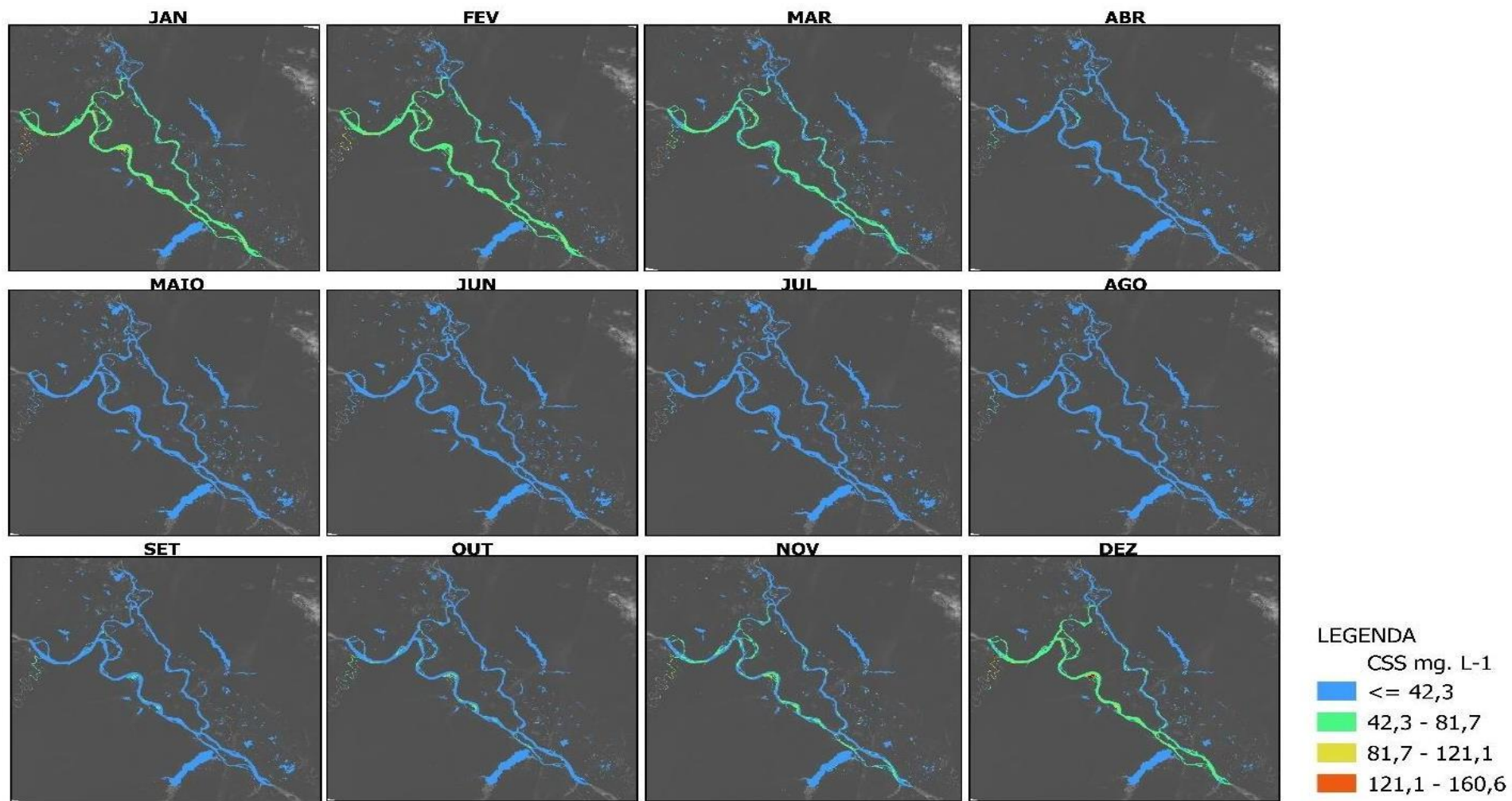


Figura 39 - Confluência do rio paraná do Aranapu e rio Japurá na região oeste da Amazônia: a) Dezembro de 2014 e b) Junho de 2015. A sazonalidade do nível d'água se reflete na composição da água e na mistura de água desses dois rios.



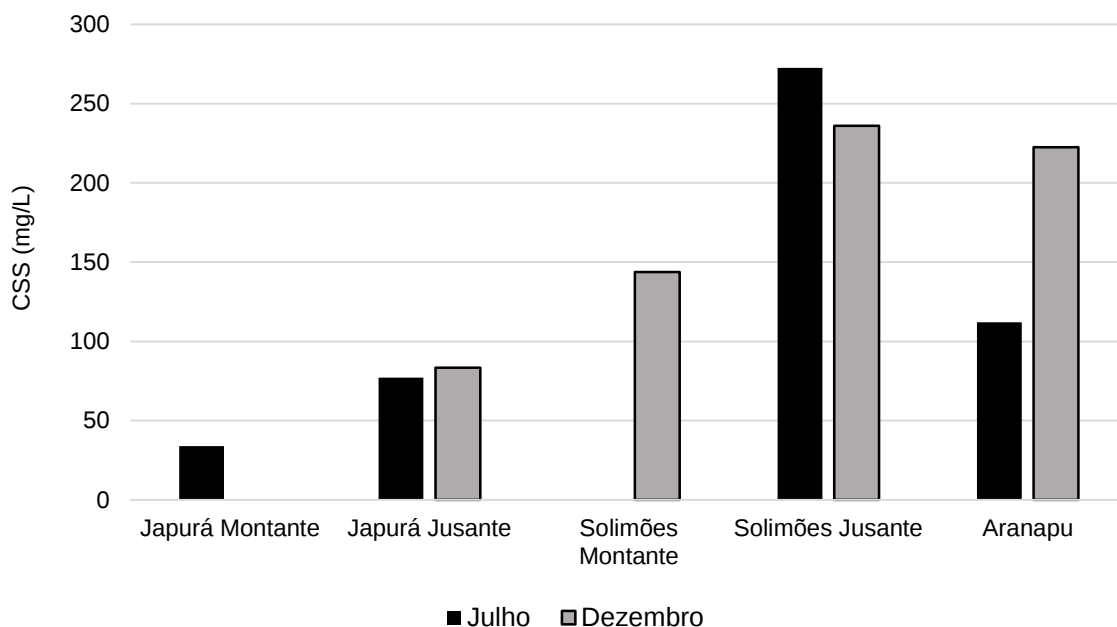
Fonte: Barbosa et al., 2019.

3.4 Concentração de Sedimentos Suspensos in situ

As análises da Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS), a partir de coletas em campo em sees nos Rios Japurá Montante, Japurá Jusante, Solimões Montante, Solimões Jusante e Paraná do Aranapu, indicam um aumento nas concentraes na direo montante-jusante.

Com as coletas de campo realizadas nos períodos de julho e dezembro, observou-se maiores valores de CSS no mês de dezembro em comparao a julho (figura 40). Dezembro está entre os meses com as menores cotas, marca o início do período chuvoso e da elevao da cota dos rios Japurá e Solimões. Por outro lado, julho está entre os meses com as maiores cotas e apresenta os menores níveis de precipitao.

Figura 40 - CSS coletados em campo em dezembro 2023 (águas baixas) e Julho 2024 (águas altas).

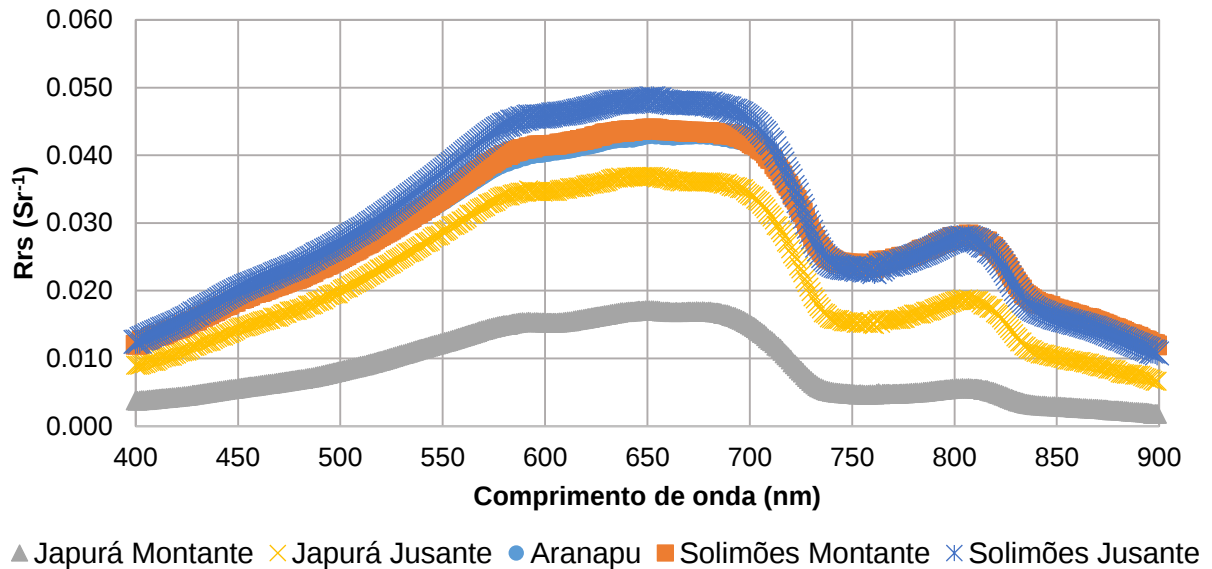


Elaboração: Autor, 2025.

3.5 Assinatura Espectral da água dos rios Japurá e Solimões

A figura 41 apresenta o comportamento espectral da reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) obtidos in situ utilizando espectrorradiômetros nas seções dos rios Japurá montante e jusante, Solimões montante e jusante e Paraná do Aranapu. Observa-se que há uma variação expressiva na R_{rs} entre as diferentes seções, a qual está diretamente relacionada CSS.

Figura 41 – Média das Assinaturas espectrais das águas nos rios Solimões e Japurá observadas entre 2023 e 2024.



Elaboração: Autor, 2025.

A Figura 41 mostra que os maiores valores de reflectância ocorrem nas seções do Solimões Montante, Solimões Jusante e do Paraná do Aranapu, especialmente no intervalo espectral entre 550 e 700 nm, com picos que superam 0,04 a 0,05 Sr^{-1} . Estes resultados são consistentes com a CSS observadas nessas seções.

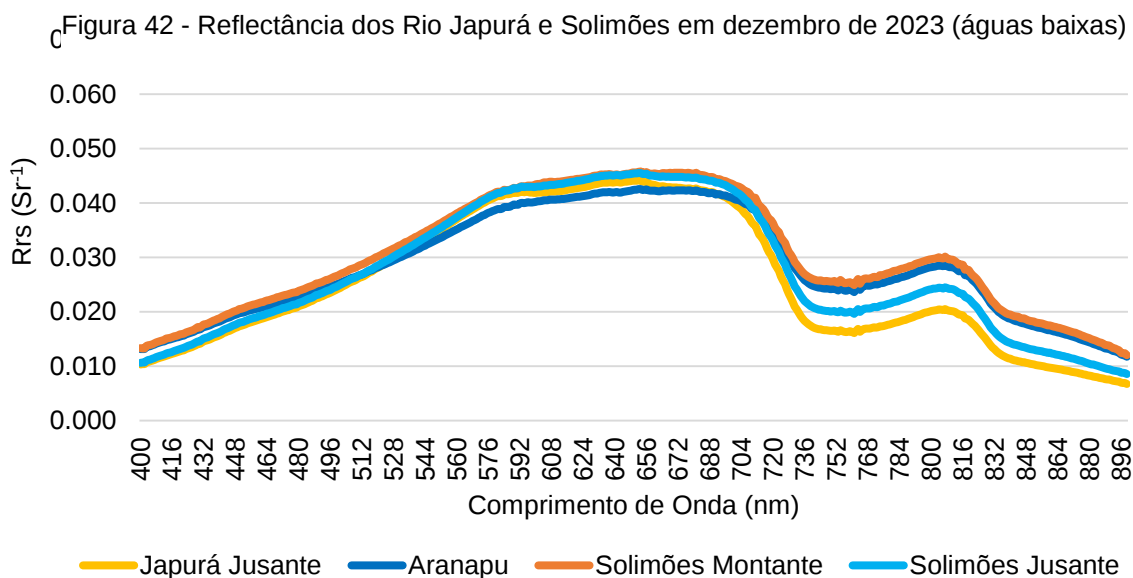
A seção Japurá Montante apresenta os menores valores de reflectância em todos os comprimentos de onda analisados, situando-se abaixo de 0,02 Sr^{-1} . Esse comportamento é característico de corpos d'água com baixa concentração de sedimentos comparada com as demais seções, e evidenciado pelas análises de CSS, com valores inferiores a 40 mg.L^{-1} ao longo do ano.

Esses resultados vão de encontro com diversos trabalhos realizados na região amazônica, como o de Rudorff et al. (2007) e Park e Latrubresse (2014), que demonstraram a forte correlação entre a concentração de sedimentos suspensos e a reflectância da água, principalmente no intervalo de 600–700 nm. Tais estudos confirmam que a reflectância espectral é uma ferramenta eficiente para estimar a concentração de sedimentos em suspensão e a turbidez da água.

Barbosa (2005) observou que regiões de águas complexas no rio Amazonas, caracterizado por águas brancas ricas em sedimentos, apresentam curvas espectrais semelhantes às do presente estudo, com picos de reflectância em comprimentos de onda entre 550 e 680 nm.

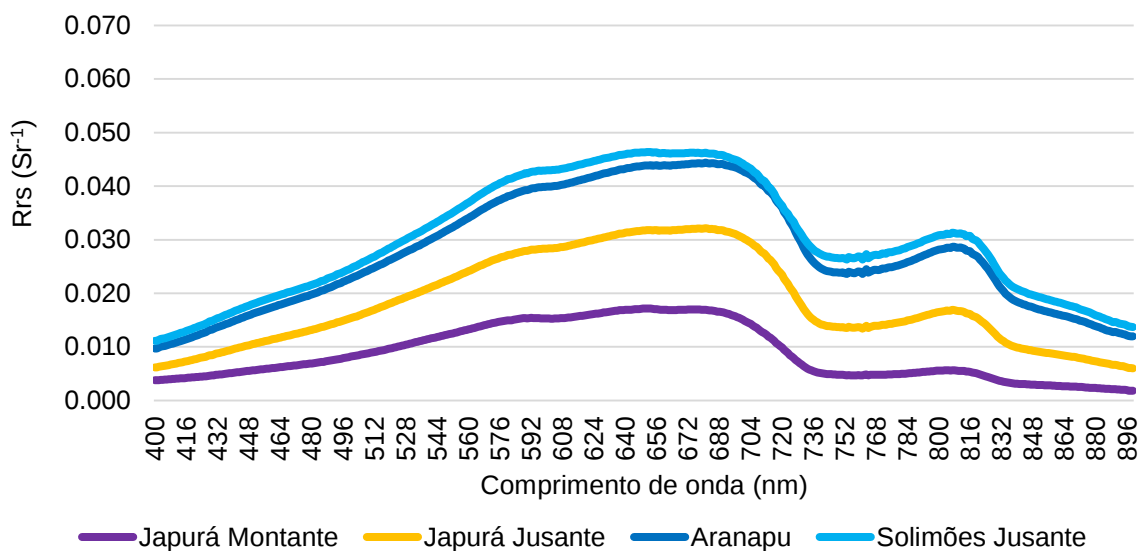
A resposta espectral da água apresentada na figura 42 evidencia a conexão entre a reflectância e a dinâmica hidrossedimentar das águas amazônicas, demonstrando como o sensoriamento remoto pode ser utilizado para monitoramento ambiental em regiões de difícil acesso e alta complexidade fluvial, como a área de estudo.

A análise das figuras 42 e 43 comparam a Rrs em diferentes seções durante o mês de dezembro e julho, permitindo entender como a sazonalidade influencia diretamente na interação da radiação com a coluna d'água, especialmente em função da variação de sedimentos suspensos, o que vai de encontro com o trabalho de Barbosa (2005).



Elaboração: Autor, 2024.

Figura 43 - Reflectância dos Rio Japurá e Solimões em julho – 2024 (águas altas)



Elaboração: Autor, 2024.

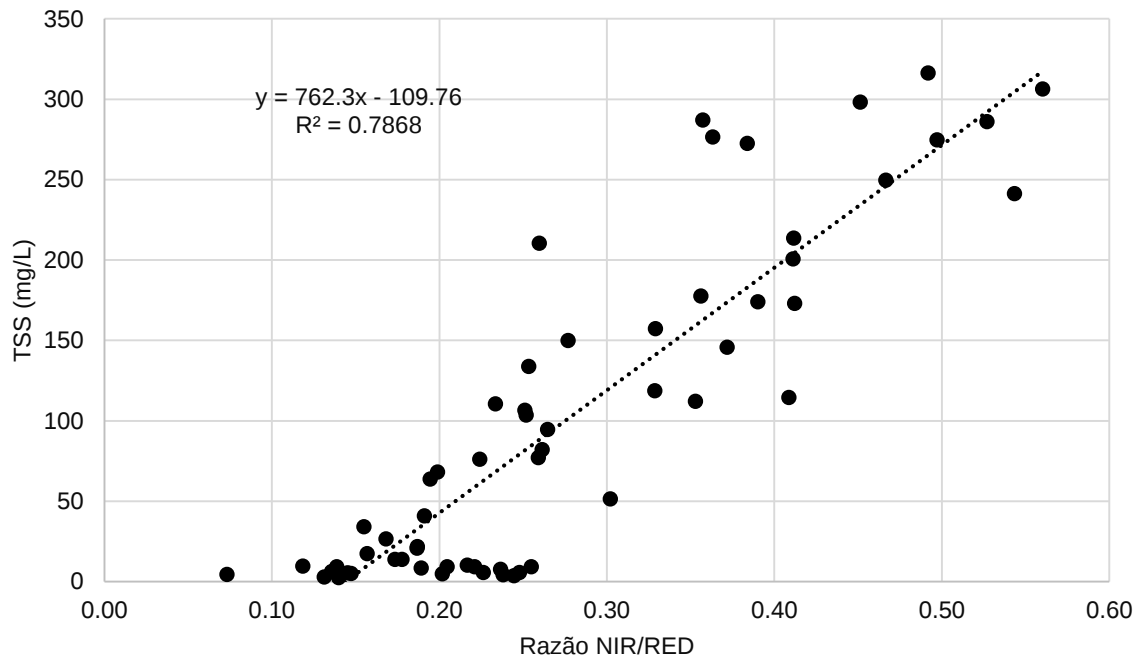
Em dezembro, apesar de ser o início do período chuvoso, os níveis de precipitação ainda são baixos, e as cotas dos rios Japurá e Solimões estão nos valores mínimos do ano hidrológico. Nessa condição, a reflectância é relativamente alta, as quatro seções nesse período ultrapassam valores superiores a $0,04 \text{ Sr}^{-1}$ no intervalo de 600 a 700 nm. Isso se deve à maior concentração de sedimentos em suspensão. A baixa cota favorece o aumento da concentração de CSS na superfície da coluna d'água, elevando consequentemente, a Rrs. Vale destacar que a seção Japurá Montante não foi realizada no período de dezembro por questões logísticas.

Em contraste, a Rrs em julho é significativamente menor na seção Japurá Jusante, figura 43, comparando com o mês de dezembro, com valores abaixo de $0,032 \text{ Sr}^{-1}$ na banda do vermelho (650 nm). As seções Aranapu e Solimões Jusante, tiveram um comportamento de reflectância semelhante ao gráfico da figura 42. A seção Solimões Montante não foi monitorada no mês de julho devido às limitações logísticas.

O gráfico de dispersão apresentado na figura 44 mostra a relação entre a razão da reflectância espectral no infravermelho próximo e vermelho (NIR/RED) e a concentração de sedimentos suspensos (CSS). Observa-se uma forte correlação positiva

entre essas variáveis ($R^2 = 0,78$), em que à medida que a razão NIR/RED aumenta, os valores de CSS também aumentam, refletindo a influência direta da concentração de sedimentos sobre o comportamento espectral da água.

Figura 44 - Relação entre CSS e a razão de bandas do infravermelho e vermelho (NIR/RED) .



Elaboração: Autor, 2025

Segundo Rudorff et al. (2007) e Barbosa (2005), em rios da bacia amazônica, a presença de sedimentos em suspensão afeta fortemente a reflectância da água, especialmente nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Isso ocorre porque partículas suspensas aumentam a retroespalhamento da luz, resultando em maior reflectância nessas faixas do espectro eletromagnético.

Além disso, Santos et al. (2015) demonstra que a razão de bandas (NIR/RED) pode ser usado como uma técnica confiável para estimar CSS, especialmente em ambientes de águas brancas. Essa abordagem é particularmente útil para o monitoramento e avaliação contínua em larga escala de diversas variáveis ambientais, como a concentração de sedimento suspenso.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação da dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Japurá e Solimões revelou a complexidade dos processos fluviais em sistemas multicanais amazônicos, permitindo avanços significativos na compreensão dessa região, ainda que com limitações inerentes ao ambiente estudado.

A caracterização espectral das águas identificou assinaturas espectrais distintas entre os rios Solimões e Japurá, com forte correlação entre reflectância e CSS, particularmente na faixa espectral de 550-700 nm. A razão das bandas NIR/RED demonstrou-se um indicador robusto ($R^2 = 0,78$) para estimativa de sedimentos suspensos, validando o uso da técnica em ambientes com restrições logísticas para amostragem sistemática.

As relações entre transporte de sedimento em suspensão, precipitação e níveis dos rios revelou forte relações entre as estações fluviométricas de Maraã e Acanauí no rio Japurá ($R^2 = 0,82$). A correlação moderada entre Maraã e Fonte Boa ($R^2 = 0,65$) evidenciou a influência progressiva do Solimões sobre o baixo curso do rio Japurá.

O regime pluviométrico, com amplitude de 147 mm (setembro) a 354 mm (maio), mostrou-se determinante na modulação sazonal do transporte sedimentar. Contudo, a defasagem temporal entre precipitação e CSS (correlação de Pearson entre 0,30-0,49) indica que o transporte de sedimentos responde mais diretamente ao regime hidrológico (Pearson = 0,672 com níveis fluviais) do que aos eventos pluviométricos isolados. Os picos de CSS, registrados entre dezembro e março, coincidem com a fase de ascensão das águas, quando a remobilização de sedimentos das planícies de inundação é máxima.

Quanto a determinação da foz do rio Japurá os resultados, embora não conclusivos em termos cartográficos, forneceram importantes evidências hidrossedimentares. A análise integrada demonstrou que o trecho do rio Japurá a jusante do Paraná do Aranapu apresenta comportamento hidrossedimentar semelhante ao do rio Solimões. A correlação elevada ($R^2 = 0,92$) entre os padrões de CSS e as assinaturas espectrais desses trechos, contrastando com as características do Japurá a montante, sustenta a hipótese de que, sob perspectiva hidrossedimentar, a foz do Japurá situa-se a montante do Paraná do Aranapu.

Esta constatação tem implicações teóricas relevantes para a geomorfologia fluvial amazônica. O conceito tradicional de foz como ponto singular de desembocadura mostra-

se inadequado para sistemas caracterizados por extensas planícies aluviais, múltiplos canais e forte variabilidade sazonal. Na região estudada, a "foz" configura-se como uma zona de transição dinâmica, cuja extensão e características variam conforme o regime hidrológico, com o Paraná do Aranapu e a várzea de Mamirauá funcionando como elementos de conexão hidrogeomorfológica entre os sistemas Solimões e Japurá.

Conclui-se que a hipótese inicial foi corroborada pelas evidências hidrossedimentares: o canal a jusante do Paraná do Aranapu funciona, efetivamente, como um canal do sistema Solimões. Esta conclusão, fundamentada em múltiplas linhas de evidência convergentes, contribui para o refinamento do conhecimento sobre a organização da rede de drenagem amazônica e reforça a necessidade de abordagens multidisciplinares para compreensão de grandes sistemas fluviais tropicais.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, Adriana Gomes. **A Relação entre parâmetros ambientais e a densidade de pirarucu nos lagos de várzea de Mamirauá**: uma análise multi- sensor. São José dos Campos: INPE, 2012. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE.

ALMEIDA, Catherine Torres de et al. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do estado do Amazonas. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 279-286, 2015.

ALVES, Neliane de Sousa. **Mapeamento hidromorfodinâmico do Complexo Fluvial de Anavilhanas**: Contribuição aos estudos de Geomorfologia Fluvial de rios Amazônicos. 2013. Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo.

BARBOSA, Claudio Clemente Faria; NOVO, Evelyn Marcia Leão de Moraes; MARTINS, Vitor Souza (Ed.). **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos**: princípios e aplicações. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.

BARBOSA, Cláudio Clemente Faria. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. São José dos Campos, 2005. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos.

BARBOSA, Claudio, et al. Cor da água: Sedimentos, clorofila e matéria orgânicadissolvida colorida. in: FASSONI-ANDRADE, A. et al. (Org.). **Hidrologia da Amazônia vista do espaço**: avanços científicos e desafios futuros. Porto Alegre, RS : ABRHidro, 2023.

BARBOSA, Humberto Alves; BURITI, Catarina de Oliveira. **Como dominar o QGIS**: o guia definitivo para mapeamento. Maceió, AL: Instituto Letras Ambientais, 2022. ISBN 978-65-997758-0-2.

BERNARDI, Ewerthon Cezar Schiavo et al. **Qualidade das estimativas de precipitação do satélite TRMM no Estado do Rio Grande do Sul**. RS: USM, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria.

BICUDO, Tacio Cordeiro. **Estudo da Formação da Bacia Hidrográfica do rio Amazonas através da modelagem numérica de processos tectônicos e sedimentares**. São Paulo. 2017. Dissertação (Mestrado em Geofísica). Departamento de Geofísica de Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo.

CHEIN, Flávia. **Introdução aos modelos de regressão linear**: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas. Brasília: Enap, 2019.

CHARLTON, R. **Fundamentals of fluvial geomorphology**. London: Routledge. 2008. 234 p.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2º ed. 1980.

CONCHY, Tainá Sampaio Xavier, et al.,. **Caracterização da Variabilidade Espacial e Sazonal do Regime Hidrológico da Bacia do Rio Japurá com Aplicação de Altimetria Espacial**. In: XX Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais [...]. Maceió: USP, 2011.

COSTA, A. S. et al. Characterization of dissolved organic matter in the Piauí river estuary, Northeast Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 22, n. 11, p. 2139-2147, nov. 2011. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010350532011001100017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 jul. 2016.

DUNNE, Thomas et al. Exchanges of sediment between the flood plain and channel of the Amazon River in Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 110, n. 4, p. 450-467, 1998.

EMBRAPA, TERRA. **Earth Observing System (EOS)**, 2024. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/terra>>. Acesso em: 27 dez. 2024.

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

ESPINOZA-VILLAR, R. et al. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). **Comptes Rendus Geoscience**, v. 350, n. 1–2, p. 4–12, 2017.

FASSONI-ANDRADE, Alice César; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. **Remote sensing of environment**, v. 221, p. 94-107, 2019.

FERREIRA-FERREIRA, Jefferson et al. Combining ALOS/PALSAR derived vegetation structure and inundation patterns to characterize major vegetation types in the Mamirauá Sustainable Development Reserve, Central Amazon floodplain, Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, v. 23, p. 41-59, 2015.

FIGUEROA, Silvio N.; NOBRE, Carlos A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, v. 5, n. 6, p. 36-45, 1990.

FILIZOLA, Naziano; GUYOT, Jean Loup. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**. 41(4): 566-576, 2011.

FILIZOLA, Naziano; GUYOT, Jean Loup. **Suspended sediment yields in the Amazon basin**: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrological Processes: An International Journal*, v. 23, n. 22, p. 3207- 3215, 2009.

FILIZOLA, Naziano. **O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da bacia Amazônica Brasileira**. ANEEL, Brasília. 63pp, 1999.

GUERRA, A. J. T; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: uma interpretação de bases e conceitos. 12^a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

HYBAM, S. **Observation Service SO HYBAM**. 2024. Disponível em: < <https://hybam.obs-mip.fr/pt/amostragens/> >. Acesso em: 28 de out. 2024.

IDSIM, Instituto De Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. Plano de Gestão da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. IDSM, Tefé-AM, p.183, 2010.

IDSIM, Instituto De Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. **Áreas de Atuação**. 2024. Disponível em: <[https://mamiraua.org.br/areas-de-atuacao#:~:text=Sua%20extens%C3%A3o%20%C3%A9%20de%202.350,moradores%20\(Censo%20Demogr%C3%A1fico%202018\).](https://mamiraua.org.br/areas-de-atuacao#:~:text=Sua%20extens%C3%A3o%20%C3%A9%20de%202.350,moradores%20(Censo%20Demogr%C3%A1fico%202018).)>. Acesso em: 25 de out. 2024.

KUMMEROW, Christian et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of applied meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.

LATORRE, Marcelo Lopes et al. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. **Revista Espaço e Geografia**, p. 91-121, 2003.

LATRUBESSE, Edgardo Manuel; STEVAUX, José Cândido; SINHA, Rajiv;. Grandes sistemas fluviais tropicais: uma visão geral. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 1, 2005.

LATRUBESSE, Edgardo. **Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers**. In: *Geomorphology*, 101(1-2), 130–145. doi:10.1016/j.geomorph.2008.05.035, 2008.

MACIEL, Daniel et al. **Retrieving total and inorganic suspended sediments in Amazon floodplain lakes**: A multisensor approach. *Remote Sensing*, v. 11, n. 15, p. 1744, 2019.

MAMIRAUÁ, Sociedade Civil. **Plano de Manejo da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá**. Brasília: CNPq/MCT, 1996. Disponível em: < <https://mamiraua.org.br/documentos/2562dcd1a10814f8a6deb5963e57e191.pdf> > f > Acesso em: 17 de jul. 2024.

MAMIRAUÁ, **Instituto de Desenvolvimento Sustentável**. Banco de Dados da Hidrografia da RDSM. No prelo. 2024.

MARENGO, José Antônio. **Água e mudanças climáticas**. Estudos avançados, v. 22, p. 83-96, 2008.

MARINHO, R. R.; FILZIOLA, N. P.; MARTINEZ, J.-M.; HARMEL, T. Suspended sediment transport estimation in Negro River (Amazon Basin) using MSI/Sentinel-2 data. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, 2022.

MARINHO, R. R.. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro - Amazonas, Brasil**, 2019. 160 f. Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Clima e Ambiente do INPA e UEA como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Clima e Ambiente, área de concentração Interações Amazônia. Manaus, 2019.

MARINHO, T.; FILIZOLA, N.; MARTINEZ, J.-M.; ARMIJOS, E.; NASCIMENTO, Suspended Sediment Variability at the Solimões and Negro Confluence between May 2013 and February 2014. **Geosciences**, v. 8, n. 7, p. 265, 2018.

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

MASSAGLI, G. O.; VICTORIA, D. De C.; ANDRADE, R. G. Comparação entre precipitação medida em estações pluviométricas e estimada pelo satélite TRMM. **Anais [...]** 5º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica - CIIC 20119 a 11 de agosto de 2011 – Campinas, SP. 2011.

MELO, E. C. **Fatores de controle dos fluxos fluviais de material em suspensão em diferentes cenários climáticos na bacia do rio Solimões**. 2012. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação na área de Clima e Ambiente. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2012.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MONTANHER, Otávio Cristiano. **Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas a partir de imagens Landsat 5**. 2013. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

MORAES, Elisabete Caria de. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campo, 2002.

MOSLEY, M. P. An experimental study of channel confluences. **Journal of Geology**, v. 84, p. 535-562, 1976.

MOURA, Edila Arnaud Ferreira et al. **Sociodemografia da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá**: 2001-2011. IDSM, 2016.

NASA. **Earth Observatory**. 1999. Disponível em: < <https://www.earthobservatory.nasa.gov/features/TRMM> > Acesso em: 4 de out. 2022.

NOBRE, C. A.; OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; FU, R.; POVEDA, G. Características do Clima Amazônico: aspectos principais. **Geophysical Monograph** Séries, n. 186, p. 149-162, 2009.

NOBREGA, Ranyére Silva; SOUZA, Enio Pereira; SOUSA, Francisco de Assis Salviano. Análise da utilização de dados do satélite TRMM em um modelo hidrológico semidistribuído na bacia do rio Jamari (RO). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, n. 1, p. 47-61, 2008.

OLIVEIRA, Daniel.; ANDRADE, Nailde Martins. **Recursos Hídricos Superficiais**. In: Maria MAIA, Adelaide Mansini.; MARMOS, José Luiz. (Orgs.) Geodiversidade do estado do Amazonas. Manaus: CPRM, 2010. p.47-57.

OLIVEIRA, Alexandre Adalardo de Oliveira.; DALY, Douglas C. **Florestas do Rio Negro**. São Paulo: Companhia das Letras : UNIP, 2001.

PARK, E.; LATRUBESSE, E. M. Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 232–242, 2014.

PASSOW, Michael J. TRMM-Tropical Rainfall Measuring Mission: Bringing remote sensing of precipitation into your classroom. **Terra e Didática**, v. 6, n. 1, p. 03-08, 2010.

PEIXOTO, Juliana Maerschner Aguiar. **Monitoramento da dinâmica da geomorfologia fluvial da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. Manaus. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Programa Integrado de Pós-graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais – INPA e Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais.

RUDORFF, Conrado M. et al. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 269-280, 2007.

SANTOS, Andre Luis Martinelli Real et al. Purus River suspended sediment variability and contributions to the Amazon River from satellite data (2000–2015). **Comptes Rendus. Géoscience**, v. 350, n. 1-2, p. 13-19, 2015.

SANTOS, Vanessa Cristina dos; STEVAUX, José Cândido. Processos fluviais e morfologia em confluências de canais: uma revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, 2017.

SALATI, Eneas; MARQUES, José. **Climatology of the Amazon region**. In: **The Amazon**: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. p. 85-126.

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

SEGARRA, Joel et al. Sensoriamento remoto para agricultura de precisão: recursos e aplicações aprimorados do Sentinel-2. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 641, 2020.

SILVA, M. S. L.; BERNARDES, M. C.; OLIVEIRA, L. M. C. Influência da precipitação na qualidade da água do rio Purus no estado do Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 4, p. 799–804, 2008.

SILVA, Maria do Socorro Rocha da et al. Classificação dos rios da Amazônia: uma estratégia para preservação desses recursos. **Holos Environment**, v. 13, n. 2, p. 163-174, 2013.

SILVA, Kaique Brito; REGO, Neylor Alves Calasans; SANTOS, José Wildes Barbosa. Confluência de rios e suas contribuições para estudos em bacias hidrográficas: estudo de caso em rios da região do sul da bahia. **Revista Geografar**, Curitiba, v. 14, n. 1, p. 170-187, 2019.

SHIMAKURA, S.E. **Correlação**. In: CE003 - Estatística II. Paraná: Dep. de Estatística da Universidade Federal do Paraná: 71-78p. 2006.

SIOLI, Harald. **Amazônia**: fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais. Editora Vozes, Petrópolis-RJ, 1985.

STREHER, Annia Susin et al. **Aplicação de Dados SAR na Avaliação da dispersão de Espécies e conectividade da Paisagem em um Ecossistema Sazonalmente Inundado**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. João Pessoa-PB. 2015. Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

TIBONI, Conceição Gentil Rebelo. **Estatística básica**: para cursos de administração. Ciências contábeis, tecnológicos e de gestão. São Paulo: Atlas, 2010. 332 p.

TONIOLO, Gustavo Rodrigues. **Identificação de constituintes opticamente ativos na água do lago Guaíba, a partir de dados de sensores orbitais e espectrorradiometria de campo**. 2016. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

ZANANDREA, Franciele; KOBAYAMA, Masato; MICHEL, Gean Paulo. **Conectividade Hidrossedimentológica**: uma abordagem conceitual. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico]. [Porto Alegre: ABRH, 2017], 2017.

APÊNDICE A – Stories Maps do Campo na Reserva Mamirauá



1º CAMPANHA - RESERVA MAMIRAUÁ

A campanha dos projetos HyperSED
e Monitoramento do clima e recursos
hídricos da Reserva Mamirauá

Filipe De Araujo Oliveira
25 de junho de 2024

ACESSE O QR CODE:

