



**Universidade de Brasília**

**Instituto de Geociências**

**Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica**

**DIEGO RAPHAEL ALVES E SANTOS**

CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE TRANSPORTE SEDIMENTAR NO  
RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE JIRAU ATRAVÉS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-2

Dissertação de Mestrado n° 190

*(ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOPROCESSAMENTO E ANÁLISE AMBIENTAL)*

BRASÍLIA – DF

2022

**DIEGO RAPHAEL ALVES E SANTOS**

**CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE TRANSPORTE SEDIMENTAR NO  
RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE JIRAU ATRAVÉS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-2**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, área de concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jean-Michel Martinez

BRASÍLIA – DF

2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

eS237c e Santos, Diego Raphael Alves  
CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE TRANSPORTE SEDIMENTAR NO  
RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE JIRAU ATRAVÉS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-2/ Diego  
Raphael Alves e Santos; orientador Jean-Michel Martinez. -  
Brasília, 2022.  
128 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências  
Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Sensoriamento Remoto da Água. 2. Transporte de  
Sedimentos. I. Martinez, Jean-Michel, orient. II. Título.

**DIEGO RAPHAEL ALVES E SANTOS**

**CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE TRANSPORTE SEDIMENTAR NO  
RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE JIRAU ATRAVÉS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-2**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, área de concentração: Geoprocessamento e Análise Ambiental.

12 de janeiro de 2022

---

Prof. Dr. Jean-Michel Martinez  
(IRD/GET/IG-UnB)

---

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig  
(IG-UnB)

---

Prof. Dr. Naziano Pantoja Filizola Junior  
(Departamento de Geociências – UFAM)

"(...) Avacanoeiro prefere as águas

Avacanoeiro prefere o rio

Avacanoeiro prefere os peixes

Avacanoeiro prefere remar (...)"

*À minha mãe, Dorinha*

*À minha querida Paula*

*Às minhas filhas, Teresa e Emanuele.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à minha mãe, Dorinha, que ao longo de minha vida sempre acreditou, apoiou e contribuiu incondicionalmente para que eu conduzisse o caminho que trilhei até aqui.

À minha querida Paula, que sempre esteve ao meu lado, que me incentivou e me apoiou para que eu me lançasse a navegar mais esse percurso.

Às minhas filhas Teresa e Emanuele, que, mesmo sem terem por minha parte toda a atenção e dedicação que merecem por causa das horas dedicadas ao trabalho, estiveram sempre florescendo, alegrando e iluminando o meu horizonte.

À querida Dôra (*in memoriam*), por seu acolhimento afetuoso e ensinamentos espontâneos, que nos mostrou sempre o verdadeiro caminho de amor e de perseverança. Saudades!

Ao meu pai, Getúlio, que trouxe energia e sabedoria para que seguíssemos navegando.

À minha tia Cássia, que sempre me apoiou, principalmente desde que cheguei à Brasília, ressaltando através de seu olhar atento os nuances da cidade, captando muitas vezes a minha atenção para detalhes que poderiam passar despercebidos e que de fato suavizaram e embelezaram a o dia a dia nesse período.

À dona Lúcia, que contribuiu enormemente com os cuidados com a Tetê, com a Manu e com a nossa casa, enquanto eu dedicava o tempo necessário ao trabalho.

Aos meus amigos, em especial ao Egberto e a Angelita, que deram todo o suporte, tanto na hora de resolver papeis e circunstâncias cotidianas quanto nas horas de socializar e desfrutar momentos de lazer em Brasília.

Ao meu orientador Jean-Michel Martinez, por sua disponibilidade e confiança, além de seus valorosos ensinamentos.

Ao Tristan Harmel, que gentilmente disponibilizou os pacotes de imagens que foram utilizadas para a realização do trabalho.

Aos colegas e aos professores do PPGGAG do IG-UnB. Aos colegas do Projeto SPECTROSED que contribuíram com sua experiência e dedicação à pesquisa (André, David, Diogo, Henrique, Keila, Osmair, Fábio, Ednaldo, Tayline)

À CAPES, pelo fomento à pesquisa no Brasil e pela bolsa oferecida a mim, que

garantiu maior tranquilidade para conduzir o trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

À ESRB que subsidia a pesquisa do Projeto SPECTROSED e pela bolsa oferecida a mim para seguir com tranquilidade no desenvolvimento da pesquisa.



# CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE TRANSPORTE SEDIMENTAR NO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE JIRAU ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZANDO IMAGENS SENTINEL-2

## RESUMO

O transporte de sedimentos em águas continentais superficiais é um dos fatores que implicam na dinâmica da geomorfologia dos leitos dos rios e de suas zonas marginais. Diante complexo operacional envolvido para realizar amostragens de águas superficiais *in situ* e mensurar a quantidade de sedimentos presentes nos corpos d'água, a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto, que possibilitam recuperar dados originados por satélites para estimar a Concentração de Sedimentos em Suspensão – CSS, apresentam-se como mecanismos vantajosos para estimativas frequentes da carga sedimentar suspensa e para a caracterização dos padrões de transporte sedimentar nos rios. A missão Sentinel-2 levou a órbita sensores multiespectrais transportados por satélites que fornecem imagens da superfície terrestre em uma mesma área a cada 5 dias, desde o ano de 2016. Este trabalho contou com o processamento de 259 imagens Sentinel-2 nível 2A corrigidas atmosféricamente pelo algoritmo GRS contendo informações sobre a água que permitiram retratar a dinâmica hidrossedimentar ocorrida entre abril de 2016 e abril de 2021, através da aplicação de um modelo bio-ótico apropriado a imagens Sentinel-2 e ao rio Madeira que resulta em estimativas de CSS. A pesquisa apontou a ocorrência de variações na CSS em função das descargas líquidas e do período hidrológico, indicando zonas de erosão, com ressuspensão de sedimentos de fundo e zonas de depósito de sedimentos. As estimativas medianas de CSS ficaram entre  $129\text{mg.l}^{-1}$  no período de vazante e  $703\text{mg.l}^{-1}$  no período de cheia, considerando todo o trecho entre a formação do rio Madeira e o barramento da Usina Hidrelétrica de Jirau – UHE Jirau. Foi constatada a partir das estimativas realizadas, do mapeamento de CSS ao longo do reservatório da UHE e pela aplicação do teste para análise de tendências de Mann-Kendall e o estimador de sem Slope uma tendência ao depósito de sedimentos no leito do rio em direção ao barramento da usina com magnitude média de  $Q_t = -2,67$ .

**Palavras-Chave:** Concentração de Sedimentos em Suspensão - CSS, estimativas, Sensoriamento Remoto, Sentinel-2, reservatório.

# **CHARACTERIZATION OF SEDIMENTARY TRANSPORT PATTERNS IN THE RESERVOIR OF THE JIRAU HYDROELECTRIC PLANT THROUGH REMOTE SENSING USING SENTINEL-2 IMAGES**

## **ABSTRACT**

The transport of sediments in surface continental waters is one of the factors that affect the dynamics of the geomorphology of river beds and their marginal zones. In view of the operational complex involved to perform in situ surface water sampling and measure the amount of sediment present in water bodies, the use of Remote Sensing techniques, which make it possible to retrieve data from satellites to estimate the Suspended Sediment Concentration - SSC, present themselves as advantageous mechanisms for frequent estimation of suspended sediment load and for the characterization of sediment transport patterns in rivers. The Sentinel-2 mission has orbited multispectral sensors carried by satellites that provide images of the Earth's surface in the same area every 5 days, since the year 2016. This work included the processing of 259 atmospherically corrected Sentinel-2 level 2A images by the GRS algorithm containing information about the water that allowed to portray the hydrosedimentary dynamics that occurred between April 2016 and April 2021, through the application of a bio-optical model appropriate to Sentinel-2 images and to the Madeira River, which results in SSC estimates. The research pointed out the occurrence of variations in the SSC due to the water discharges and the hydrological period, indicating erosion zones, with resuspension of bottom sediments and sediment deposit zones. The median estimates of SSC were between 129mg/L during the ebb period and 703mg/L during the flood period, considering the entire stretch between the formation of the Madeira River and the dam of the Jirau Hydroelectric Power Plant – HPP Jirau. Based on the estimates made, the mapping of SSC along the HPP reservoir and the application of the Mann-Kendall test for analysis of trends and the Sen Slope estimator, a trend towards sediment deposition in the river bed towards the plant busbar with an average magnitude of  $Q_t = -2.67$ .

**Keywords:** Suspended Sediment Concentration - SSC, estimates, Remote Sensing, Sentinel-2, reservoir.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bacia Amazônica e suas sub-bacias com a localização das UHE's existentes e planejadas para construção – Domínios geológicos-fisiográficos, fluxos de sedimentos e taxas de migração de canal.....	20
Figura 2 - Índice de Vulnerabilidade Ambiental de Barragens (DEVI) .....	21
Figura 3 - Distribuição dos sedimentos ao longo do curso d'água.....	29
Figura 4 - Ocorrências típicas de erosão, transporte e deposição em bacia hidrográfica .....	29
Figura 5 - Comparação concentração de SSS estimada por satélite calibrada com amostras in situ x amostras in situ.....	33
Figura 6 - Mudanças na Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) no Rio Madeira a jusante da UHE Santo Antônio antes e depois da construção do barramento .....	33
Figura 7 - Configuração para utilização do espectroradiômetro SE-590.....	35
Figura 8 - Espectro de absorção de TSS .....	37
Figura 9 - Características de alguns sensores orbitais e assinaturas espectrais características de COA's .....	37
Figura 10 - Proposta de Classificação para Modelos Bio-óticos.....	39
Figura 11 - Intervalo espectral de reflectância de superfície de água para diferentes concentrações de sedimentos em suspensão .....	42
Figura 12 – Precipitações médias mensais (1979-1995) (mm.mês <sup>-1</sup> ) entre setembro e abril e localização da Alta da Bolívia (A).....	46
Figura 13 - a) Mês mais seco (mês com a menor cobertura de nuvens altas) e b) Duração da estação seca definida pela cobertura de nuvens .....	47
Figura 14 – Bacia do rio Madeira, principais rios e dados altimétricos.....	49
Figura 15 – Processos erosivos de terras caídas .....	50
Figura 16 – Processos erosivos de terras caídas .....	50
Figura 17 – Vazões entre 2016 e 2020 – a) Estação Jusante do Rio Beni (15318000) - b) Estação Morada Nova Jusante (15326010) c) Estação Porto R4 (15340600) .....	53
Figura 18 – Coloração das águas do rio Madeira no reservatório da UHE Jirau em julho de 2021 .....	54
Figura 19 - Árvore de decisão para classificação de SSS em rios amazônicos de águas brancas.....	55

Figura 20 - Assinaturas espectrais da água no reservatório da UHE Jirau – a)10/2019 b)01/2020 .....	55
Figura 21 - Localização da área de estudo .....	56
Figura 22 - Localização das seções amostrais SPECTROSED.....	57
Figura 23 - Seções amostrais na região do reservatório da UHE Jirau.....	58
Figura 24 - Localização das estações telemétricas .....	58
Figura 25 - Regiões amostrais (Igarapé – IGP, Montante – M1, Jusante – J1 e Lago – L1) de reflectância da água na região do reservatório da UHE Santo Antônio .....	60
Figura 26 - Bandas espectrais x resoluções espaciais dos satélites Sentinel-2 .....	61
Figura 27 - Esquema metodológico para conversão de imagem Topo de Atmosfera (L1C) para Imagem de Reflectância de superfície (L2A) .....	68
Figura 28 - Fluxograma do esquema metodológico para a avaliação e comparação das reflectâncias da .....	68
Figura 29 - Fluxograma do esquema metodológico para o processamento das imagens e obtenção de mapas de CSS e análise de tendências.....	69
Figura 30 - Modelo para estimativa e mapas de CSS .....	71
Figura 31 - Distribuição das reflectâncias da banda 4 para os produtos Sen2Cor e MAJA medidas no reservatório da usina de Santo Antônio pelo sensor MSI Sentinel-2 em 28/06/2017.....	78
Figura 32 - Diagramas de dispersão das reflectâncias da banda 4 e 8a S-2 para as correções atmosféricas.....	78
Figura 33 - Mapas de CSS em diferentes datas na região L1 a partir de dados Sentinel-2 com a utilização de produtos de três diferentes correções atmosféricas.....	83
Figura 34 - Estimativas de CSS por satélite x medidas in situ SO HYBAM – a) CSS entre maio e julho 2017. b) CSS entre janeiro e fevereiro de 2018. c) CSS entre abril e maio de 2018.....	84
Figura 35 - Gráfico Vazão média 2016-2020 x CSS estimada por satélite x CSS medida in situ.....	87
Figura 36 - Variação anual da CSS estimada através de imagens de satélite ao longo do reservatório entre 2016 e 2021 *Valores negativos representam as regiões a jusante do barramento da UHE – *O ano de 2021 contempla imagens apenas de janeiro e de abril. .....	89
Figura 37 - Distribuição do conjunto de imagens da série temporal 2016 – 2021 .....	89

Figura 38 - Mapeamento anual das CSS's medianas da região do reservatório da UHE Jirau – a) 2017 - b)2018 - c)2019 - d)2020 – Elaborado pelo autor .....	90
Figura 39 - Variação da carga sedimentar estimada por satélite ao longo da região do reservatório da UHE Jirau entre 2016 e 2021 por período hidrológico.....	92
Figura 40 - Régua para amostragem do nível da água no início do período de seca e processos erosivos marginais .....	93
Figura 41 - Draga para garimpo no rio Madeira na região da seção Abunã .....	93
Figura 42 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de vazante.....	94
Figura 43 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de seca.....	94
Figura 44 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de enchente.....	95
Figura 45 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de cheia .....	95
Figura 46 - Variação anual da CSS por período hidrológico no intervalo 2016 – 2020. a)2016 - b)2017 - c)2018 d)2019 - e)2020 - f)2021 .....	98
Figura 47 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de cheia entre 2016 e 2021.....	99
Figura 48 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de vazante entre 2016 e 2020.....	100
Figura 49 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de seca entre 2016 e 2020.....	101
Figura 50 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de enchente entre 2016 e 2020.....	102
Figura 51 - Gráficos das séries anual e sazonal resultantes das estatísticas de tendências .....	104
Figura 52 - Gráficos das séries mensais resultantes das estatísticas de tendências .....	105
Figura 53 - Séries temporais de médias mensais das vazões e sedimentos finos em suspensão nas estações Porto Velho e Cachuela Esperanza antes e depois da construção dos barramentos das UHE's Jirau e Santo Antônio (2003-2017) .....	106
Figura 54 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de vazante. a)2018 b)2019 c)2020 .....	108

Figura 55 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de seca. a)2018 b)2019 c)2020 .....	109
Figura 56 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de enchente. a)2018 b)2019 c)2020 .....	110
Figura 57 - Levantamentos batimétricos na seção SJ01 entre setembro de 2019 e fevereiro de 2020 .....	111
Figura 58 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de cheia. a)2018 b)2019 c)2020 .....	112
Figura 59 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais do regime anual. a)2018 b)2019 c)2020.....	113
Figura 60 - Depósito de sedimentos visualizado no período de vazante na região da UHE Jirau .....	115
Figura 61 - a) Perfis batimétricos na seção Velha Mutum – b) CSSsat 17/09/2017 – c) CSSsat 19/03/2018 – d) CSSsat 22/10/2018 – e) CSSsat 15/03/2019 – f) CSSsat 19/09/2019 – g) CSSsat 25/03/2020 – h) CSSsat 24/08/2020.....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de autores e publicações com a utilização de Sensoriamento Remoto para as águas dos rios Amazônicos .....	23
Tabela 2 – Tabela comparativa entre os produtos MODIS e Sentinel-2 .....	24
Tabela 3 - Modelos bio-óticos - Algoritmos de regressão para banda única .....	40
Tabela 4- Modelos bio-óticos - Algoritmos de regressão para razão de banda.....	40
Tabela 5 - Seções amostrais e suas distâncias aproximadas até o barramento da UHE .	57
Tabela 6 – Conjunto de imagens utilizadas por período e quadrícula correspondente...	65
Tabela 7 - Níveis de significância para interpretação do teste de hipótese.....	74
Tabela 8 - RMSEr's reflectâncias – RMSE (%) Reflectância região L1- com referências médias GRS e Sen2Cor.....	77
Tabela 9 - Reflectâncias médias nas regiões amostrais M1, J1 e IGP – banda 4.....	81
Tabela 10 - Reflectâncias médias nas regiões amostrais M1, J1 e IGP – banda 8a .....	81
Tabela 11 - Estimativas de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) por correção atmosférica x estação SO HYBAM.....	82
Tabela 12 - Diferenças entre as estimativas de CSS x medidas SO HYBAM.....	85
Tabela 13 - Valores resultantes dos parâmetros Z de Mann Kendall e Q de Sen's Slope para as análises de tendência .....	103
Tabela 14 - Síntese das CSS medianas e Diferenças relativas entre as seções amostrais com referência na seção Abunã .....	113

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
AISA	<i>Airborne Imaging Spectrometer</i>
ANA	Agência Nacional das Águas
AOT	<i>Aerosol Optical Thickness</i>
APDA	<i>Atmospheric Precorrected Differential Absorption</i>
BOA	<i>Bottom-of-Atmosphere</i>
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>
CACH	Cachuela Esperanza
CDOM	<i>Colored Dissolved Organic Matter</i>
Chl-a	Clorofila
COA's	Componentes Oticamente Ativos
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
Ed	Irradiância descendente
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESBR	Energia Sustentável do Brasil
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
GRS	<i>Glint Removal for Sentinel-2</i>
GUAY	Guayaramerin
H <sub>0</sub>	Hipótese nula
HRV	<i>High Resolution Visible</i>
IGP	Igarapé
IRD	<i>Institut de Recherche pour le Développement</i>
J1	Jusante
Km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
L( $\lambda$ )	Radiância
Lu	Radiância ascendente
LUT's	<i>Lookup tables</i>
Lw	Radiação ascendente da água
m	metro
M1	Montante
MACCS-ATCOR	<i>Multi-Mission Atmospheric Correction and Cloud</i>



	<i>Screening</i>
MAJA	<i>Maccs-Atcor Joint Algorithm</i>
MERIS	<i>Medium Resolution Imaging Spectrometer</i>
mg.l <sup>-1</sup>	Miligrama por litro
MNDWI	<i>Modified Normalized Difference Water Index</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSI	<i>Multispectral Instrument</i>
Mt.a <sup>-1</sup>	Milhões de toneladas por ano
N <sub>amostragem</sub>	Número de amostragens
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIR	<i>Near Infrared</i>
NO	Noroeste
ORE HYBAM	Observatório de Pesquisa Ambiental
PHICAB	Programa Climatológico e Hidrológico da Bacia Amazônica
POA	Propriedades Óticas das Águas
POA's	Propriedades Óticas Aparentes
POI's	Propriedades Óticas Inerentes
PVEL	Porto Velho
Q	Vazão
Q <sub>m</sub>	Vazão média
Q <sub>t</sub>	Magnitude da tendência
Q <sub>(espec)</sub>	Vazão específica
RED	Vermelho
REM	Radiação Eletromagnética
RMSEr	<i>Root Mean Square Error relative</i>
Rrs	Reflectância de Sensoriamento Remoto
S2-A	Sentinel-2A
S2-B	Sentinel-2B
SE	Sudeste
SENAMHI	Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia
SNAP	<i>Sentinel-2 Aplicaton Plataform</i>
SO HYBAM	Serviço de Observação Controles geodinâmico, hidrológico

e biogeoquímico da erosão/alteração e da transferência de  
matérias nas bacias dos rios Amazonas, Orinoco e Congo

SPM	<i>Suspended Particulate Matter</i>
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
SRF	<i>Spectral Response Function</i>
SWIR	<i>Short-wave infrared</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TOA	<i>Top-of-Atmosphere</i>
TSM	Total Suspended Matter
TSMc	Total Suspended Matter Concentration
TSS	Totais de Sedimentos em Suspensão
TSS	<i>Total Suspended Solids</i>
UHE	Usina Hidrelétrica
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VIS	<i>Visible</i>
WV	<i>Water Vapour</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	20
2	OBJETIVOS .....	27
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	28
3.1	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	28
3.1.1	Transporte de sedimentos e impactos de barragens nos rios.....	28
3.1.2	Transporte de sedimentos no rio Madeira .....	31
3.2	SENSORIAMENTO REMOTO DA ÁGUA .....	34
3.2.1	Modelos para estimativa da Concentração de Sedimentos utilizando imagens de satélites .....	38
3.2.2	Estimativas de Concentração de Sedimentos em Suspensão utilizando imagens Sentinel-2 .....	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	45
4.1.1	Clima, formação de nebulosidade e precipitação na região da bacia do rio Madeira e Amazônia.....	45
4.1.2	Caracterização do rio Madeira no contexto da Bacia Amazonica.....	48
4.1.3	Contexto da bacia Amazônica.....	48
4.1.3.1	Dados de descargas na Bacia do Rio Madeira.....	50
4.1.3.2	Vazões do rio Madeira na região do reservatório da UHE Jirau .....	52
4.1.4	Propriedades óticas das águas do rio Madeira.....	53
4.1.5	Localização da área de estudo, estações e postos ESBR e seções amostrais SPECTROSED.....	56
4.2	IMAGENS DE SATÉLITES .....	59
4.2.1	Imagens MODIS.....	59
4.2.2	Imagens Sentinel-2 .....	60
4.3	CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS .....	62
4.3.1	MAJA.....	63
4.3.2	Sen2Cor .....	63
4.3.3	GRS.....	64
4.4	CONJUNTO DE IMAGENS.....	65
4.5	MODELOS UTILIZADOS PARA AS ESTIMATIVAS DE CSS.....	66
4.6	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS .....	67

<b>4.7</b>	<b>TESTE ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DE TENDÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>COMPARAÇÃO ENTRE AS REFLECTÂNCIAS DA ÁGUA E ESTIMATIVAS DE CSS A PARTIR DAS CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS GRS, MAJA E DADOS DOS SENSORES MODIS. ....</b>	<b>75</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Comparação das reflectâncias a partir das correções atmosféricas MAJA, Sen2Cor e GRS em imagens Sentinel-2.....</b>	<b>76</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Comparação das estimativas de CSS por imagens Sentinel-2 com as correções atmosféricas MAJA, Sen2Cor e GRS .....</b>	<b>82</b>
<b>5.2</b>	<b>MAPEAMENTO E ESTIMATIVAS DA CSS NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DA UHE JIRAU.....</b>	<b>85</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Relação entre vazão x CSS estimada por satélite x CSS medida in situ....</b>	<b>86</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Análises espaço-temporais das CSS's estimadas através de imagens de satélite no período 2016-2021 desde a região de Abunã até barragem da UHE Jirau</b>	<b>87</b>
5.2.2.1	Análise da variação global da CSS do período 2016-2021 .....	88
5.2.2.2	Análises da variação global da CSS dos períodos hidrológicos no intervalo 2016-2021 .....	90
5.2.2.2.1	Análise da variação global da CSS nos períodos hidrológicos da série de imagens 2016-2021 .....	91
5.2.2.2.2	Análise da variação da CSS interanual por períodos hidrológicos da série de imagens 2016-2021.....	93
5.2.2.2.3	Análise da variação da CSS anual por períodos hidrológicos da série de imagens 2016-2021.....	96
5.2.2.2.4	Análise da variação da CSS por períodos hidrológicos no intervalo 2016-2021 .....	99
<b>5.2.3</b>	<b>Análise das tendências hidrossedimentares na região do reservatório ...</b>	<b>102</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Análises espaço-temporais das CSS's estimadas através de imagens de satélite no período 2016-2021 nas seções amostrais SPECTROSED .....</b>	<b>107</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Relação entre os perfis batimétricos x mapeamento de CSS por satélite</b>	<b>115</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>119</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>



Latrubesse, et. al (2017) apresentaram uma técnica para a medida do grau de vulnerabilidade ambiental de bacias diante dos impactos ocasionados pelas barragens nos principais rios Amazônicos, que mede o Índice de Vulnerabilidade Ambiental de Barragem (*Dam Environmental Vulnerability Index – DEVI*) baseada na combinação do Índice de Integridade da Bacia (*Basin Integrity Index – BII*), ligado ao uso do solo existente e potencial, do Índice de Dinâmica Fluvial (*Fluvial Dynamics Index – FDI*), que aborda o fluxo de sedimentos transportados pelos rios e suas atividades morfodinâmicas e o Índice de Impacto de Barragem (*Dam Impact Index – DII*) que mede o quanto as barragens afetam os sistemas fluviais. O DEVI resultante do mapeamento de barragens e seus impactos na Bacia Amazônica realizado pelos autores, em um conjunto de 19 sub-bacias Amazônicas (**Figura 2**), mostrou que o grau de vulnerabilidade da Bacia do Rio Madeira (80-100) é o mais alto entre todas elas.

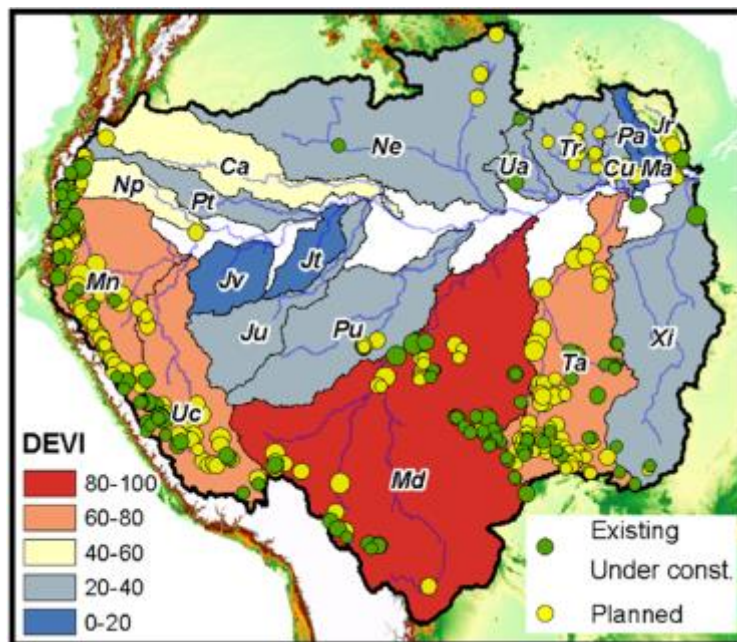


Figura 2 - Índice de Vulnerabilidade Ambiental de Barragens (DEVI) - Fonte: Adaptado de Latrubesse, et. al., 2017

A descarga líquida média da Bacia Amazônica que deságua no Oceano Atlântico é de  $209.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , de acordo com Filizola, N. e Guyot, J (2009) apud Molinier, et. al (1995), e por seu enorme potencial para geração de energia hidráulica, na bacia Amazônica, segundo o Portal do Governo do Brasil – Infraestrutura (2011), encontram-se estimados 40,6% (105,5GW) de um total de 260 GW do potencial hidrelétrico

brasileiro. O plano decenal de expansão energética com previsão de grandes barragens com capacidade superiores a 30MW está em curso desde 2011 (FEARNSIDE, P, 2013). A bacia do Rio Madeira corresponde a aproximadamente 25% da área de drenagem da Bacia Amazônica e transporta cerca de 16% das águas e 50% dos sedimentos que desaguam no Rio Amazonas. Oriunda da vertente oriental dos Andes, a carga sedimentar transportada pelo Rio Madeira faz dele o maior contribuinte em relação a descarga de sedimentos na Bacia Amazônica (VILLAR, R. E, 2013). Já se encontra em operação a Usina Hidrelétrica – UHE Jirau no curso do Rio Madeira desde de setembro de 2013.

Atualmente, de acordo com a RESOLUÇÃO CONJUNTA Nº 03 ANA/ANEEL, DE 10 DE AGOSTO DE 2010, o monitoramento sedimentométrico deverá ser realizado, no mínimo, 4 vezes por ano, ocorrendo assim a cada trimestre. Verifica-se que o lapso estabelecido para as medições, segundo a literatura, mostra-se insuficiente para realizar detecções de alterações do fluxo sedimentar em suspensão transportado pelas vias fluviais ao longo do regime hidrológico e de sua sazonalidade, além de um monitoramento em intervalos regulares aptos a observação do comportamento hidrossedimentar resultante de eventos extremos na bacia.

As estações físicas para as medições da descarga sedimentar exigem pessoal e técnicas qualificadas, o que junto às dificuldades logísticas e operacionais, oneram as operações de monitoramento de sedimentos nos cursos d'água. Neste sentido, dados de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizados para estudar as propriedades óticas das águas e subsidiar análises do comportamento hidrossedimentar dos corpos hídricos. Na região da Amazônia, diversos autores vêm realizando pesquisas sobre o transporte de sedimentos em suspensão através de Sensoriamento Remoto e contribuindo com a construção de uma biblioteca espectral das águas da Bacia Amazônica, como nos trabalhos listados na **Tabela 1**, permitindo aumentar a frequência de estimativas e reduzindo o elevado custo dos métodos de medições *in situ*. Um vantajoso mecanismo para estimar as Concentrações de Sedimentos em Suspensão - CSS em corpos d'água é a aplicação de algoritmos bio-ópticos, que a partir de dados fornecidos por sensores orbitais, deduzem parâmetros dos constituintes aquáticos (CAVALI ET, M, et al, 2019; PALMER, S. C. J, et al, 2014; OGASHWARA, I, 2015). No entanto, os dados de satélites podem sofrer interferências de artefatos atmosféricos presentes entre a superfície da Terra e os detectores dos sensores ópticos que fazem a aquisição da informação refletida pelos componentes terrestres. Para a correta interpretação das imagens de satélites, estas que

contém os dados necessários ao monitoramento dos recursos hídricos, é de fundamental importância que as imagens estejam livres de tais artefatos, como nuvens, vapor d'água, aerossóis, sombras, efeitos de adjacência, reflexos da luz solar e do céu e para mitigar os efeitos indesejados das referidas contaminações. No caso dos corpos d'água, problemas adicionais como reflexões especulares solares denominados *sun glint*, e das nuvens, *sky glint*, devem ser considerados. Para mitigar os sinais indesejados, faz-se então o uso de modelos de correções atmosféricas que convertem a reflectância de topo de atmosfera em reflectância de superfície, para aplicação em modelos que fornecerão as estimativas de sedimentos em suspensão nos corpos hídricos.

Autor	Região de pesquisa	Ano	Referência	Publicação
Alice César Fassoni-Andrade e Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Bacia Amazônica	2018	Fassoni-A, A.C., e Paiva, R C.D. (2019)	Remote Sensing of Environment
André Luis Martinelli Real dos Santos	Rio Purus	2017	Santos, A.L.M.R, et al. (2017)	Comptes Rendus Geoscience
Jean-Michel Martínez	Bacia Amazônica	2007	Martínez, J.-M., et al. (2007)	IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium
	Bacia Amazônica	2008	Martínez, J.-M., et al. (2008)	13th World Water Congress
	Rio Amazonas	2009	Martínez, J.-M., et al. (2009)	Catena
	Bacia Amazônica	2015	Martínez, J.-M., et al. (2015)	Journal of Geophysical Research F: Earth Surface
Raúl Espinoza Villar	Confluência dos Rios Marañon e Ucayali	2012	Villar, R. E, et al. (2012)	Journal of Hydrology
	Rio Madeira	2013	Villar, R. E, et al. (2013)	Journal of South American Earth Sciences
Rogério Ribeiro Marinho	Rio Negro	2021	Marinho, R. R, et al. (2021)	International Journal of Geo-information
Thiago Marinho	Confluência dos Rios Solimões e Negro	2018	Marinho, T, et al. (2018)	Geosciences

Tabela 1 - Lista de autores e publicações com a utilização de Sensoriamento Remoto para as águas dos rios Amazônicos

A Missão Sentinel-2 lançou em junho de 2015 e em março de 2017 dois satélites orbitais polares pertencentes à *European Space Agency* – ESA. Seus satélites possuem instrumentos multiespectrais (MSI – *Multispectral Instrument*) compostos por 13 bandas espectrais que abrangem a faixa eletromagnética do visível, do infravermelho próximo e



do infravermelho de ondas curtas, e resolução espacial que varia entre 10 e 60m, com frequência para aquisição de imagens a cada 5 dias. Por se tratar de uma missão recente, o volume de trabalhos desenvolvidos sobre dados Sentinel-2 ainda não é extenso como trabalhos desenvolvidos com dados dos sensores MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordos dos satélites Aqua e Terra, que, embora tenha muito boa resolução temporal para trabalhos voltados à qualidade das águas, 1 a 2 dias, e espectral, com até 36 bandas, possui desvantagem em relação à sua resolução espacial, que é de 250m, considerada baixa para observações de recursos hídricos continentais. As estimativas realizadas pelos sensores MODIS se dão após a conversão da reflectância de topo de atmosfera para reflectância de superfície com a utilização de 7 bandas espectrais, compondo o produto denominado MOD09 (*MODIS Surface Reflectance*). Em comparação com os produtos gerados pelos sensores MSI dos satélites Sentinel-2, os dados de superfície MODIS possuem 3 bandas na região do visível, 1 banda na região do Infravermelho próximo, 1 banda no Infravermelho médio e 2 bandas no Infravermelho de ondas curtas, sendo a resolução espacial de 250m é atribuída apenas às bandas 1 e 2, enquanto os produtos Sentinel-2 possuem resolução espacial muito superior, conforme a

**Tabela 2.**

Aqua/Terra - MODIS			Sentinel-2 - MSI		
Banda	Largura de banda (nm)	Resolução espacial (m)	Banda	Centro de banda (nm)	Resolução espacial (m)
b1	620-670	250	1	442,7	60
-			2	492,4	10
b3	459-479	500	3	559,8	10
b4	545-565	500	4	664,6	10
-			5	704,1	20
-			6	740,5	20
-			7	782,8	20
b2	841-876	250	8	832,8	10
-			8a	864,7	20
-			9	945,1	60
b5	1230-1250	500	10	1373,5	60
b6	1628-1652	500	11	1613,7	20
b7	2105-2155	500	12	2202,4	20

Tabela 2 – Tabela comparativa entre os produtos MODIS e Sentinel-2. Fonte: Adaptado de MODIS Surface Reflectance User's Guide e ESA

Este trabalho apresenta uma revisão da literatura focada em Sensoriamento Remoto da Água voltado às estimativas de concentração de sólidos em suspensão nos corpos hídricos, com recorte especial ao reservatório da Usina Hidrelétrica Jirau – UHE Jirau, localizada no rio Madeira, no estado de Rondônia – Brasil.

A implementação de barramentos para geração de energia hidrelétrica resulta na alteração do regime sedimentar acentuando os processos de assoreamento e modificando a morfologia do canal do rio e das áreas alagadas e por isso é de fundamental importância conhecer o comportamento dos processos de assoreamento em reservatórios já que estes integram fatores que implicam em limitações para a existência e vida útil de uma Usina Hidrelétrica.

Os Estudos de Impacto Ambiental - EIA são instrumentos para a mensuração dos efeitos da construção das UHE's e subsidiam de forma geral diversos temas que compõem instalações deste porte e características, mas os estudos que adentram em camadas temáticas específicas, como o monitoramento do regime hidrossedimentar, auxiliam os agentes na tomada de decisões e acompanhamento dos efeitos das obras e operação das UHE's.

Medidas da concentração de sedimentos presentes nos corpos d'água representam importantes informações para problemáticas que interessam à comunidade científica, agentes governamentais, setor privado e a sociedade em geral, que envolvem aspectos da diversidade ecológica, social e econômica. O mapeamento da carga sedimentar em ambientes aquáticos retrata o estado do sistema, segundo as relações de conectividade e comportamento dos fluxos de água e materiais constituintes do meio, auxiliando a compreensão do processo hidrossedimentológico. A aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto permite quantificar certos parâmetros hídricos e subsidiar pesquisas sobre a dinâmica dos processos hidromorfológicos e avaliações sobre a qualidade das águas continentais (CAVALI ET, M, et al, 2019; PALMER, S. C. J, et al, 2014).

Portanto, dentro do contexto em que se insere o rio Madeira, onde se localiza a UHE Jirau, fundamental e necessário monitoramento da carga sedimentar se faz diante dos impactos gerados pela construção de sua barragem, e, visto que a frequência das medições *in situ* são dispendiosas e complexas do ponto de vista logístico e operacional o Sensoriamento Remoto se apresenta como ferramenta complementar muito vantajosa, que complementa os métodos tradicionais, já que possibilita superar o déficit de dados

que são gerados por medições pontuais das estações existentes, permitindo visualizar e mapear com maior frequência e abrangência as regiões do rio, e, colecionando dados sobre o reservatório que são gerados a cada cinco dias pelos satélites Sentinel-2, possibilita realizar a descrição das tendências dos processos de erosão e deposição de sedimentos identificados pelos mapeamentos.

O presente trabalho se encontra vinculado ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento P&D da Energia Sustentável do Brasil – ESBR a partir das diretrizes da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL tendo sido criado o grupo de pesquisa do projeto “Espectrorradiometria para Monitoramento de Sedimentos em Reservatórios” - SPECTROSED no ano de 2020 que realiza campanhas para medições em campo da Concentração de Sedimentos em Suspensão – CSS, granulometria, mineralogia, vazão e radiometria, desde abril de 2021. Os resultados apresentados nesse trabalho referem-se a um conjunto de imagens de satélites Sentinel-2 com correções atmosféricas entre abril de 2016 e abril de 2021. Os dados de campos complementarão a pesquisa após o seu tratamento, com previsão para o segundo semestre de 2022, portanto, o trabalho desenvolvido até a conclusão deste documento consiste na primeira etapa do Projeto que visa o desenvolvimento de um modelo robusto para o monitoramento contínuo da CSS no reservatório da UHE Jirau.

## 2 OBJETIVOS

Observando o contexto explorado no presente trabalho, evidencia-se o relevante interesse pelo monitoramento da concentração de sedimentos nos reservatórios de UHE's, tendo em vista a construção de seus barramentos nos cursos dos rios que implicam em alterações geomorfológicas no canal principal, bem como suas áreas de alagamento. O foco deste trabalho refere-se, portanto, à utilização de imagens fornecidas por sensores espaciais de média (MODIS) e alta resolução (Sentinel-2) comparadas às imagens MODIS, suportada por técnicas de Sensoriamento Remoto e análise das propriedades óticas das águas para mapear a CSS no reservatório da UHE Jirau. Considerando que as técnicas de Sensoriamento Remoto para quantificar a CSS presente em corpos d'água apresentam-se como uma alternativa complementar e viável ao monitoramento dos processos hidrossedimentares, combinada a monitoramentos *in situ*, os objetivos específicos do trabalho são:

- Identificar os padrões de transporte sedimentar no reservatório da UHE Jirau a partir da análise sistemática de mapas de CSS produzidos por satélite e durante ciclos hidrológicos consecutivos;
- Relacionar os padrões de transporte sedimentar aos fatores de controle hidrológicos, hidráulicos e geomorfológicos considerando a área da usina e a bacia hidrológica;
- Contribuir a definir uma metodologia de processamento dos dados de satélites de alta resolução Sentinel-2 comparadas aos sensores MODIS para um monitoramento robusto dos padrões de transporte sedimentar em reservatórios incluindo as diversas etapas de pré-processamento (correções atmosféricas, detecção dos pixels de água) passando pelo mapeamento do parâmetro de interesse (CSS) com a seleção de modelos radiométricos adequados e até a validação das estimativas obtidas por Sensoriamento Remoto com os dados de campo disponíveis.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

##### 3.1.1 Transporte de sedimentos e impactos de barragens nos rios

Conforme Steavaux, J. C e Latrubesse, E. M (2017) a transformação da energia ao longo de uma rede de drenagem no sentido longitudinal de uma bacia é o fenômeno responsável pela produção e transporte de sedimentos. As vertentes da bacia são as grandes produtoras de sedimentos do sistema fluvial, que ocorrem através da erosão de substratos oriundos dos depósitos aluviais. Os sedimentos são deslocados ao longo da bacia das partes mais altas até as partes mais baixas por processos contínuos e alternados de erosão e sedimentação (**Figura 3 e** Figura 4). Segundo Carvalho N. O e Strasser, M. (2000), o sedimento é o resultado da fragmentação das rochas ou de materiais biológicos, e a gota de chuva é a causa inicial da erosão hídrica, sendo a partícula resultante dessa fragmentação posteriormente transportada pelas enxurradas e levadas ao encontro do curso de água ou reservatório onde poderá se depositar, porém, embora seja um processo natural o desgaste das rochas e dos solos com desagregação e deslocamento das partículas é influenciado por fatores antrópicos como a retirada da cobertura vegetal, o que favorece também a degradação das regiões de relevo movimentado com solos erodíveis e a instabilidade de margens de rios. Os processos erosivos são mais intensos na alta bacia e os processos deposicionais iniciam-se nas regiões de transição, sendo a média bacia a região com formação de braços e meandros. Os processos mais intensos de agradação

ocorrem na baixa parte da bacia.

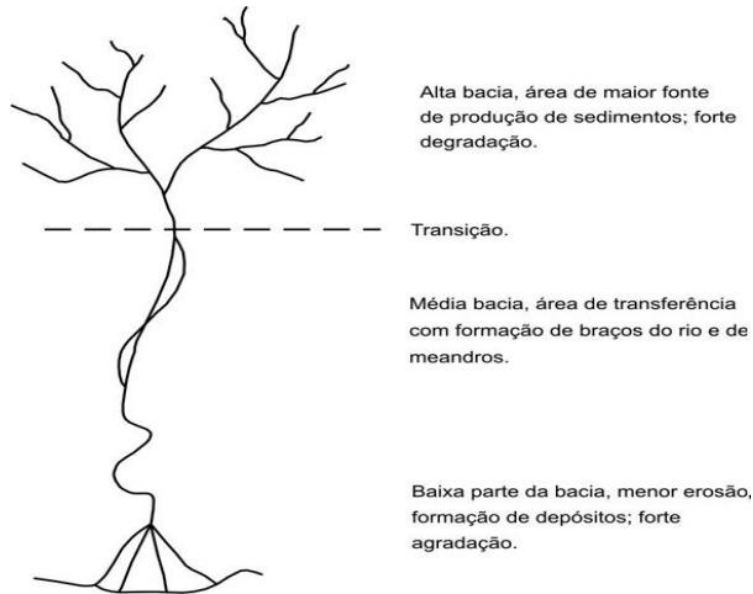


Figura 3 - Distribuição dos sedimentos ao longo do curso d'água - Fonte: Carvalho, N. O. e Strasser M, 2019

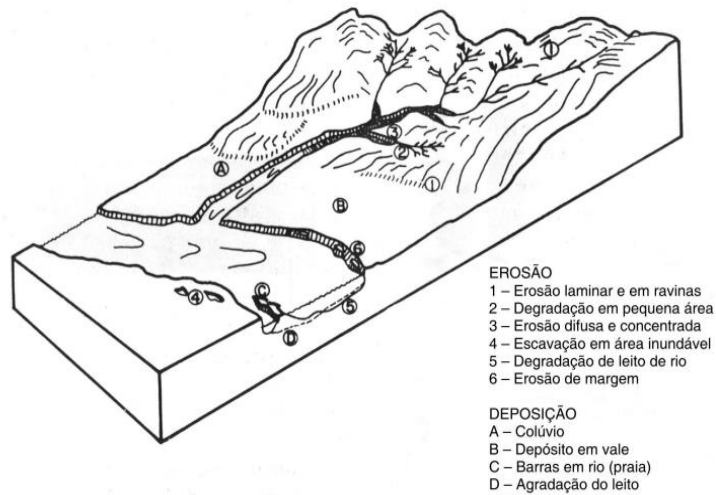


Figura 4 - Ocorrências típicas de erosão, transporte e deposição em bacia hidrográfica - Fonte: Carvalho, N. O. e Strasser, M, 2019

Ainda em relação ao transporte de sedimentos, Adamy, A (2016), indica que, devido à dinâmica fluvial intensa, sofrendo constantes remodelamentos, o curso do rio

sofre frequentes alterações, sendo que os processos mais atuantes ocorrem em suas planícies de inundação seja por deposição de sedimentos ou pelos processos de erosão. Neste sentido, o rio Madeira apresenta em função de suas velocidades de escoamento e turbulência de suas águas grande influência nos processos erosivos, implicando em maiores taxas de transporte de sedimentos. O contexto da carga sedimentar na região onde se encontra o rio Madeira é reforçado por Bernini, H, et. al (2016) que apontam que o ambiente orogênico de formação dos grandes canais implica em características como o aumento da taxa de erosão e aumento do fluxo de sedimentos em grandes canais fluviais tropicais, e que, por conta de tais características junto a alterações das condições naturais do curso do rio, dentre elas a redução da velocidade de escoamento de suas águas, ocorre a intensificação dos processos deposicionais de sedimentos.

Os sedimentos transportados pelos rios são, portanto, depositados em unidades geomorfológicas e alteram a morfologia dos canais fluviais e das planícies de inundação, criando barreiras, vales e remansos. Em relação aos componentes dos sistemas fluviais como as planícies de inundação, que se conectam com os canais principais dos rios e que são periodicamente afetadas pelo regime hidrológico, pelo transporte de sedimentos e pelos processos de deposição e erosão, estas têm acentuadas as alternâncias entre paisagens terrestres e aquáticas com a ampla variedade de novas estruturas físicas, o que gera instabilidade aos habitats, que podem se tornar efêmeros ou permanentemente estáveis (JUNK, W. J, et al, 1990). Junto a isso, A parte sólida em suspensão é composta, em grandes parcelas por argilas, que agregam e transportam elementos tóxicos à biota da bacia levando-a a um quadro de contaminação (VILLAR, R. E, et al, 2013).

O escoamento dos rios, devido à turbulência, ocasiona a suspensão dos sedimentos finos, que outrora foram transportados e depositados em seus leitos e que poderão se depositar novamente a jusante e novamente serem ressuspensos de acordo com a hidrodinâmica dos fluxos e correntes. Existem evidências de que a construção de barragens hidráulicas na Bacia Amazônica resulta na alteração da dinâmica do transporte de sedimentos da região, e como consequências, acarretam alterações das morfologias dos canais fluviais e das planícies de inundação (LATRUBESSE, E. M. et. al, 2017). Já, no que diz respeito às regiões de menor turbulência, como os lagos e reservatórios das usinas, onde às áreas das seções transversais são aumentadas, as velocidades das correntes são menores, criando nestes locais condições para que os sedimentos se depositem no fundo, o que ocasiona a diminuição de sua capacidade, aumento dos riscos de enchentes,

aumento da influência do remanso para montante, prejuízos à navegabilidade, e ainda, a vida útil das usinas hidrelétricas (CARVALHO, N. O. et. al, 2000).

Conforme Labadessa, A (2011) os processos erosivos fluviais estão diretamente relacionados com as rupturas, solapamentos e desmanches das margens fluviais, e podem ser constantemente visualizados nas bordas do rio Madeira sendo comumente classificados pelos ribeirinhos amazônicos como “Terras caídas”. Adamy, A (2016) ressalta que no rio Madeira os processos deposicionais possuem maiores magnitudes e a carga sedimentar não é totalmente entregue aos oceanos, já que grande parcela é estocada nas planícies aluviais formadoras do relevo de sua bacia.

Os processos erosivos fluviais de Terras caídas referem-se aos deslizamentos de massa associados as sinuosidades dos canais, depósitos aluviais ou depósitos do período geológico do Terciário localizados em regiões de clima quente e úmido e possuem particularidades associadas às condições morfológicas dos rios Amazônicos sob grandes movimentos de massa. As massas laterais dos rios podem ser desprendidas das margens do rio nos períodos em que ficam submersas ou erodidas nos períodos das enchentes. Também é possível associar os processos de rupturas e deslizamentos às altas declividades e curvaturas das bordas marginais junto a chuvas e a força gravitacional. Outro fator que pode resultar em Terras caídas é o rastejamento lento ao longo de planos compostos por argilas arenosas que podem sofrer rupturas pelo fluxo das águas (BANDEIRA, I. C. N, et. al, 2018)

### **3.1.2 Transporte de sedimentos no rio Madeira**

Os fluxos de água dos grandes rios da bacia Amazônica são responsáveis pelas alterações da geomorfologia da paisagem das planícies e o transporte de sedimentos inevitavelmente remete aos impactos na hidrodinâmica de seus canais, estes, geralmente conectados com diversos corpos hídricos, em grande parte, com heterogeneidade de formas e profundidades, sendo, portanto, inseridos em um complexo sistema hidrodinâmico onde eventos extremos podem implicar em alterações do regime de



descargas do rio (CARPIO, J. M., 2008).

Para a caracterização dos processos de transportes de sedimentos na Bacia Amazônica os Projetos de monitoramento da concentração de sedimentos recuperam dados contínuos de descarga na estação Porto Velho desde 1967 pelos programas do Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia – SENAMHI, Programa Climatológico e Hidrológico da Bacia Amazônica – PHICAB e HyBam. A partir de 1995 a rede de monitoramento internacional SO HYBAM (Serviço de Observação Controles geodinâmico, hidrológico e biogeoquímico da erosão/alteração e da transferência de matérias nas bacias dos rios Amazonas, Orinoco e Congo) mantida pela Agência Nacional das Águas - ANA e pelo Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (*Institut de Recherche pour le Développement* – IRD) atualiza e dá continuidade às amostragens de descarga sólida, oferecendo dados que são em estações fixas, sendo que 5 dessas (Abunã, Porto Velho, Humaitá, Manicore e Fazenda Vista Alegre) estão localizadas no rio Madeira (VILLAR, R. E, et. al, 2013). Revisando os dados de descarga sólida que alcança o rio Amazonas através do Rio Madeira, Vauchel, P. (2017) indicaram uma variação nas medições que fica entre 240 Mt..ano<sup>-1</sup> a 715 Mt.ano<sup>-1</sup> valores que apresentam relevantes diferenças que podem estar relacionadas ao conjunto de dados adquiridos, seja pelas metodologias adotadas, quantidade ou qualidade das amostragens, considerando a dificuldade para o acesso ao longo do curso dos rios Amazônicos, ou mesmo pelas relações de descarga de água e sedimentos utilizadas para realizar as estimativas que podem apresentar inconsistências.

Conforme Vauchel, P. (2017) e Martinez, J. M, et. al, (2015), intensivas campanhas amostrais de sedimentos junto as medidas das propriedades óticas a partir de imagens de satélite dos principais rios Amazônicos são suficientemente estáveis para monitorar os sedimentos suspensos das superfícies das águas. A compatibilidade temporal entre as medidas *in situ* e a composição 8 dias de dados MODIS é vantajosa para estimar a descarga sólida de sedimentos em suspensão, e, após a separação dos pixels de água não contaminados por misturas espectrais, mostram que bons resultados são conferidos quando as reflectâncias são calibradas com as medidas SO HYBAM (**Figura 5**).

Com estimativas de sedimentos suspensos através de dados de satélites entre os anos de 2001 e 2015, Latrubesse, et. al (2017) mostraram que as variações de descarga sólida de superfície na calha fluvial do rio Madeira, a jusante da UHE Santo Antônio,

sofreram acentuado impacto com redução em 20% na média anual de CSS a partir do ano de 2013, quando ocorreu a construção da Usina 2013 (**Figura 6**).

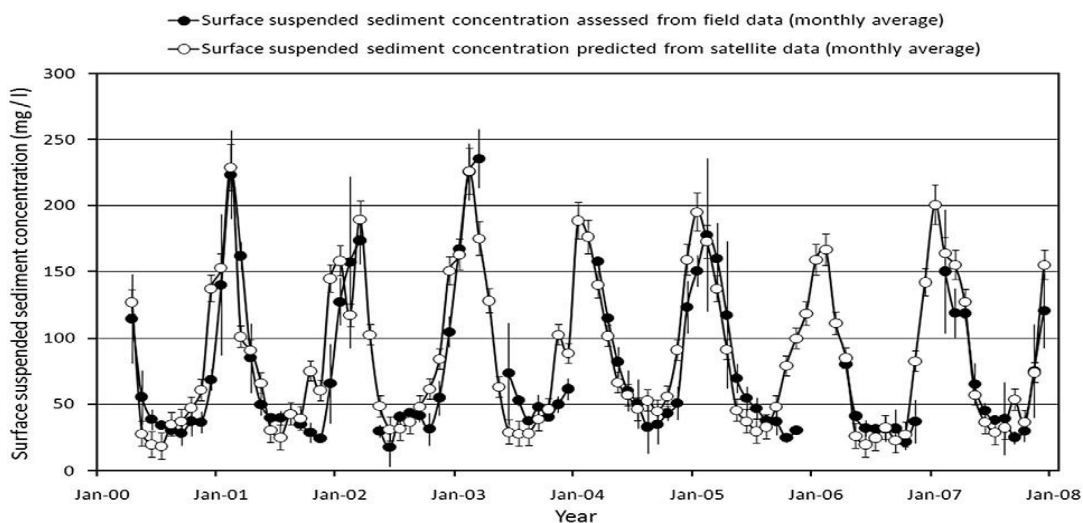


Figura 5 - Comparação concentração de SSS estimada por satélite calibrada com amostras in situ x amostras in situ – Fonte: Martinez et al, 2009

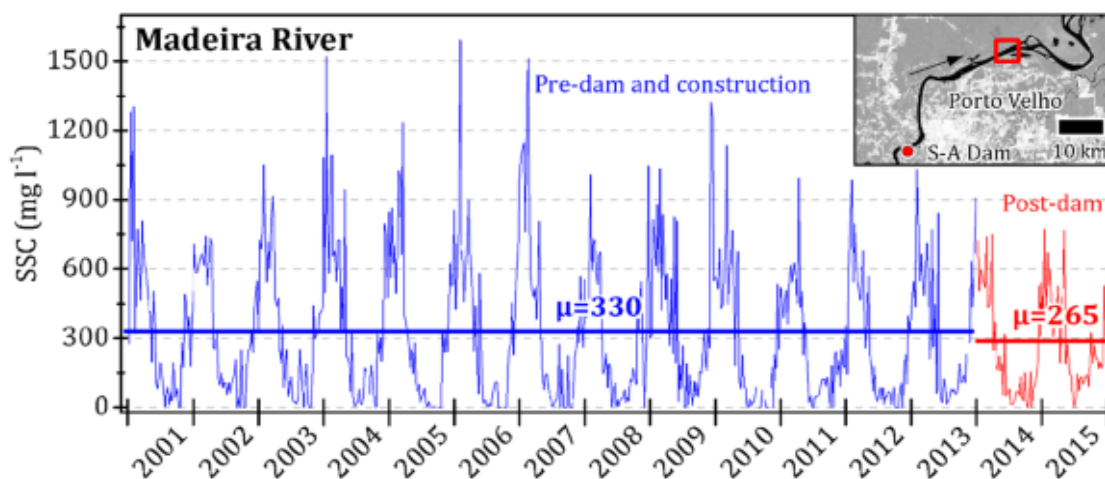


Figura 6 - Mudanças na Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) no Rio Madeira a jusante da UHE Santo Antônio antes e depois da construção do barramento – Fonte: Latrubesse, et. al, 2017

Martinez, J. M, et al. (2004) mostraram que na região Amazônica a reflectância na faixa entre o azul e o verde sofre variações ligadas à forte absorção pelos sólidos totais em suspensão e clorofila e que durante o período das enchentes a reflectância depende principalmente dos sedimentos suspensos na coluna de água. O sinal para as bandas do

vermelho é melhor para menores concentrações, no entanto, o sinal fica saturado em torno de  $80\text{mg.l}^{-1}$  e uma relação linear não saturada ocorre então para o infravermelho próximo num intervalo de valores superior, no período em que as águas já se encontram no período de estiagem.

Quanto ao rio Madeira, Villar, E R, et. al (2013) mostraram que seu comportamento se assemelha ao ciclo hidrológico regional, no entanto, o pico de sedimentos antecede o pico de cheia, logo, uma relação mais apropriada de descarga de sedimentos-água deve ser utilizada para análise de sua hidrodinâmica.

### 3.2 SENSORIAMENTO REMOTO DA ÁGUA

As pesquisas de Sensoriamento Remoto em ambientes aquáticos estudam as relações entre a absorção e o espalhamento da luz provocados pelas interações entre a Radiação Eletromagnética - REM e as Propriedades Óticas das Águas - POA. Referem-se a leitura e interpretação do comportamento espectral dos constituintes dos corpos hídricos quando um sensor ótico capta a REM que retorna da superfície possibilitando a leitura de parâmetros que oferecem condições para relacionar os materiais constituintes do corpo aquático com faixas espectrais conhecidas, sendo a radiância  $L(\lambda)$ , o parâmetro que se correlaciona fortemente com os sedimentos presentes no meio aquático onde ocorrem as interações entre a luz e a água (CURRAN, P. J. e NOVO, E.M.M , 1988).

Baseando-se na teoria de espalhamento MIE, onde se observa tamanhos semelhantes de partículas atmosféricas e o comprimento da onda eletromagnética, aplicada às águas oceânicas, e, considerando a possibilidade de assumir as partículas presentes nas massas aquáticas como sendo de forma esférica, Gordon, H. R e Brown, O. B (1972) e Gibbs, R. J (1974) verificaram um baixo índice de refração derivada, em virtude da presença de componentes orgânicos em larga escala, mostrando a necessidade de relaciona-los e distribuí-los em classes em função do volume de espalhamento.

Alguns experimentos com espectroradiômetros (**Figura 7**) realizados por Novo,

E. M. M et. al. (1989) e Novo, E. M. M, et. al. (1991) mostraram a influência dos sedimentos no comportamento da reflectância espectral provocada pelos efeitos de espalhamento e atenuação da REM nas regiões do visível, correlacionando algumas características com determinadas faixas espectrais. A aplicação de modelos bio-ópticos em ampla escala de amostragem, em consequência dos avanços tecnológicos como lançamentos de missões espaciais, é possibilitada pela potencialidade das configurações espectrais, radiométricas, temporais e escalares de sensores transportados por satélites, que coletam dados sobre variedade física e biológica das águas (GORDON, H. R. ET AL, 1988). Com isso, algoritmos empíricos, semi-empíricos e analíticos desenvolvidos por Morel, A. Y. e Gordon, H. R (1980), baseando-se nas medidas da radiância ascendente (Lu) da superfície dos oceanos e irradiância descendente (Ed), combinadas com as influências do espalhamento e absorção do meio, passam a detalhar a cor intrínseca da água fundamentando o conceito de mapeamento de sedimentos suspensos em corpos hídricos.

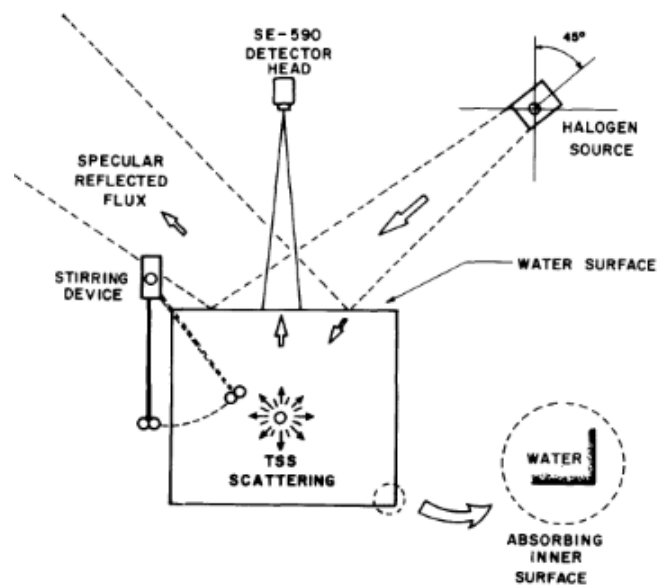


Figura 7 - Configuração para utilização do espectroradiômetro SE-590 – Fonte: Novo, E. M. M, et al., 1991

As características dos corpos hídricos são distintas e por isso as águas são divididas basicamente em duas categorias principais, definidas como Caso 1 para águas oceânicas e Caso 2 para águas complexas ou continentais conforme Morel, A. Y e Prieur, L (1977), sendo os ambientes aquáticos continentais os mais diversificados e passíveis de

complexas interações entre seus constituintes (OGASHAWARA, I, et. al, 2017).

Para a interpretação da informação contida na água, medida pelo sinal que retorna aos sensores, faz-se necessário ter em mente que as variáveis dos Componentes Óticamente Ativos – COA's são divididas em duas categorias: as Propriedades Óticas Aparentes – POA's e as Propriedades Óticas Inerentes – POI's (PREISENDORFER, R. W, 1976).

Mishra, D. R, et al, (2017), em sua publicação *Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters* destaca que a razão entre a radiação ascendente da água ( $L_w$ ) e a irradiância descendente ( $E_d$ ) refere-se à Reflectância de Sensoriamento Remoto ( $R_{rs}$ ), a POA comumente utilizada para águas continentais. As POA's são descritas como propriedades ligadas às grandezas radiométricas e dizem respeito ao meio de propagação e sobre a influência das geometrias sobre o campo de luz natural. Já as POI's, ainda em destaque pelos trabalhos de Mishra, D. R, et al (2017) e de Mobley, C. D (1994) em *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, podem ser assumidas como independentes do campo de luz e se caracterizam por oferecerem condições para a descrição do corpo aquático em si, diante dos processos de absorção e o espalhamento provocados pelos COA's.

Modelos para o cálculo do volume de espalhamento requerem coeficientes de absorção e espalhamento próprios dos constituintes do meio aquático. Nos casos das águas continentais, a variação destes constituintes é grande e as POI's modificam os resultados medidos da radiação eletromagnética do campo de luz. Entre outros, destacam-se pela utilização de mensurações por sensoriamento remoto, os Totais de Sedimentos em Suspensão - TSS, Clorofila Chl-a e Matéria Orgânica Colorida Dissolvida, abreviado do inglês, *Colored Dissolved Organic Matter* - CDOM (ODERMATT, D, et. al, 2011, DÖRNHÖFER E OPPELT, 2016, GHOLIZADEH, M. H, et. al, 2016). Os processamentos realizados a partir de dados de sensores orbitais oferecem assinaturas espectrais características e dominadas pelos diferentes constituintes presentes nas águas onde a região entre o azul e o verde é dominada pela alta absorção da luz (**Figura 8**) (OGASHAWARA, I, et. al, 2017, GURLIN, et. al, 2011).

Através do Sensoriamento Remoto é possível mapear qualitativamente os corpos hídricos, monitorar e caracterizar a dinâmica da cor da água. Contudo estas tarefas ainda sofrem com a limitação decorrente das características das câmeras espectrais transportadas em plataformas orbitais. Para atender os requisitos da aplicação do

sensoriamento remoto voltado à qualidade das águas continentais os sensores devem contar com resoluções espaciais (**Figura 9**) que possam diferenciar cursos d'água em suas diferentes geometrias e extensões, além de possuírem qualidades radiométricas e espectrais refinadas (MARTINS, V. S, 2019).

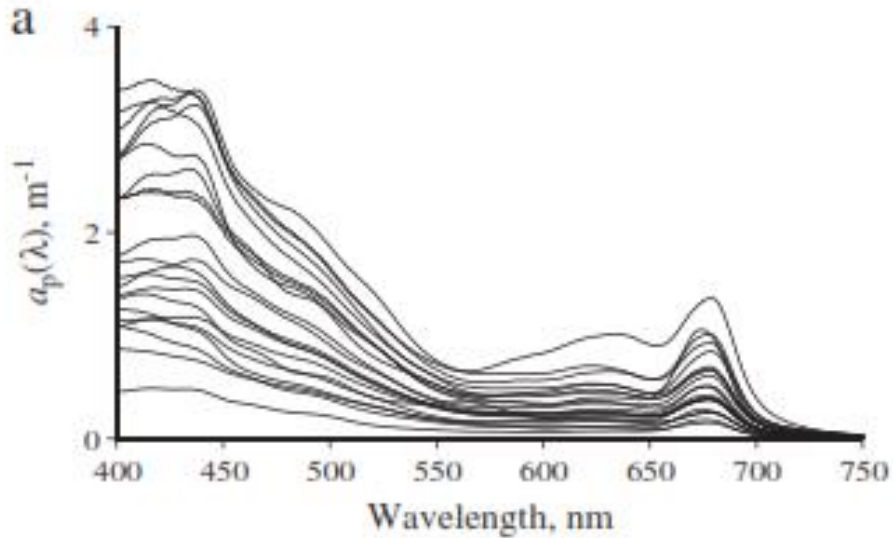


Figura 8 - Espectro de absorção de TSS – Fonte: Gurlin et al., 2011

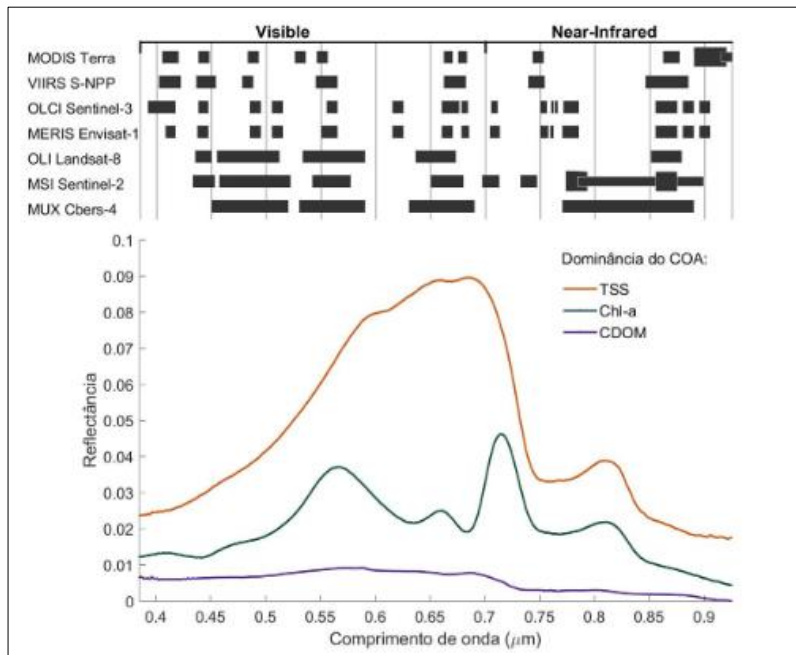


Figura 9 - Características de alguns sensores orbitais e assinaturas espectrais características de COA's – Fonte: Martins, V. S, 2019

### 3.2.1 Modelos para estimativa da Concentração de Sedimentos utilizando imagens de satélites

Como visto anteriormente, diversos parâmetros da qualidade da água podem ser estimados por técnicas de Sensoriamento Remoto mediante as relações existentes entre os tipos de constituintes presentes no corpo d'água e suas assinaturas espectrais, quando da interação com a REM em função de suas POI's. As pesquisas em Sensoriamento Remoto da Água que visam estimar sólidos em suspensão têm apresentado bons resultados quando utilizados modelos bio-óticos com parâmetros relacionados às faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo para mapear as águas continentais de acordo com as características de seus constituintes (KUHN, C. et. al, 2019; GURLIN, D. et. al, 2011; YACOBI, Y. F, et. al, 2011; MARTINEZ et. al, 2015; GHOLIZADEH, 2016).

A publicação de Ogashawara, I, (2015), esquematizada na **Figura 10**, trata-se de uma proposta terminológica e de classificação para os algoritmos bio-óticos, elementos que constituem o principal arcabouço metodológico utilizado pelas técnicas de sensoriamento remoto para a descrição da cor da água, em que considera a Teoria da Transferência Radiativa a estrutura fundamental para a modelagem bio-ótica que descreve as propriedades óticas dos materiais presentes na coluna d'água.

Os modelos são divididos entre aqueles que realizam regressões estatísticas para deduzir parâmetros dos constituintes das águas, dentre eles estão os empíricos, que combinam bandas espectrais sem medidas de referência tomadas por POI's, e os semi-empíricos, utilizados para inferir medidas após a obtenção de informações que relacionam faixas espectrais aos constituintes alvos. O segundo grupo de modelos, conhecidos como modelos de inversão ou modelos analíticos e semi-analíticos estabelecem relações entre as POI's e POA's para realizar as estimativas e o que os diferenciam é a possibilidade de estimar absorção e espalhamento diretamente pela reflectância, ou, em conjunto, pela soma das absorções dos materiais do meio aquático.

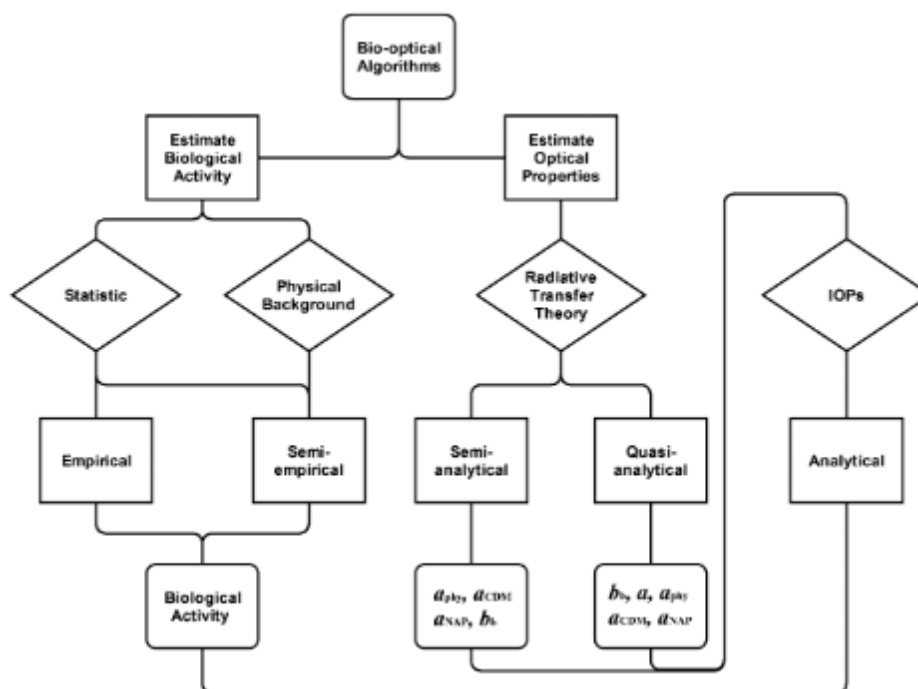


Figura 10 - Proposta de Classificação para Modelos Bio-óticos – Fonte: Ogashwara, I, 2015

Pesquisas baseadas em diversas combinações entre bandas ou *inputs* de variáveis, bem como sensores de médias e altas resoluções possibilitam formulações para diferentes regiões, de acordo com as características de cada uma. Entre tantos constata-se uma tendência da correlação entre  $R_{rs}$  e material particulado em suspensão crescer da faixa espectral do azul para o vermelho, já que a água pura influencia no coeficiente da absorção total (HAN, B, et. al, 2016).

Nesta sessão a revisão traz alguns trabalhos que utilizaram modelos empíricos e semi-empíricos baseados em técnicas matemáticas como regressões lineares e logarítmicas, dentre outras, por banda única e por razão de bandas (**Tabela 3 e Tabela 4**) processados com dados de diferentes sensores para avaliação das aplicações dos algoritmos para as estimativas dos sedimentos presentes em corpos hídricos, desde as águas claras até as águas mais escuras, estas últimas, enquadradas ao caso 2 de Morel, A e Prieur, L (1977).

Diversos trabalhos exploraram diferentes algoritmos para estimar a concentração de sedimentos sem suspensão nas águas. Assim, uma gama de formulações bio-óticas foi desenvolvida, baseadas nas classes de algoritmos já mencionados, e aplicadas a diferentes sensores. Neste sentido, modelos de regressão linear foram utilizados a fim de se verificar as relações entre os sólidos suspensos presentes nos corpos hídricos e observar a



qualidade das estimativas resultantes dos algoritmos.

No caso de regressão linear por banda única utilizando dados do sensor MODIS, com simulação de reflectâncias espectrais tomadas *in situ* ou relações com amostras coletadas em estações de amostragens, as relações se mostraram consistentes para as águas claras, em regiões costeiras com ampla variedade de concentrações (MILLER, R e MCKEE, 2004). No entanto equações distintas (**Tabela 3**) mostraram resultados mais apropriados em função da diferença das concentrações, aplicando-se, por exemplo, a banda 1 para concentrações acima de  $0,5\text{mg.l}^{-1}$  até  $50\text{mg.l}^{-1}$  e a banda 2 para concentrações entre  $50\text{ mg l}^{-1}$  a  $146\text{ mg l}^{-1}$  (PETUS, C, et. al, 2009). Também foi verificado por Kallio, K, (2001) usando dados AISA – *Airborne Imaging Spectrometer* para águas com concentrações entre  $0,7\text{ mg l}^{-1}$  a  $32\text{ mg l}^{-1}$ , que o melhor resultado de correlação direta entre reflectância e sólidos totais ocorre na banda  $R_{705-714}$  daquele sensor, mostrando similaridade com o caso anteriormente mencionado, já que as regiões espectrais são similares entre os dois sensores. Um algoritmo que utiliza a banda no infravermelho do sensor Landsat ETM foi verificado por Onderka, M e Pekárová, P, (2008), ocasião em que mostraram que poucas amostras de qualidade das águas de um reservatório com concentrações baixas e condições favoráveis à sedimentação, embora não localizadas no canal principal do fluxo, foram suficientes para calibrar o modelo, contando com uma passagem de satélite em dia de céu limpo sobre o local. Por outro lado, utilizando um modelo de regressão linear com a aplicação da banda 3 (0,63 – 0,69nm) do sensor Landsat TM, Tyler, A. N, et al (2006) indicaram uma forte correlação entre sedimentos em suspensão e o número digital da imagem com facilidade para o mapeamento, porém, uma boa acurácia para calibração do modelo requeria condições isentas de ventos fortes já que a turbulência poderia provocar erros de estimativas.

Autor	Satélite/Sensor	Parâmetro	Algoritmo	R <sup>2</sup>
Miller and Makee (2004)	MODIS	TSM	$-1.91 * 1140.25$ (Band 1)	0,89
Petus et al. (2010)	MODIS	TSMc	$12.450x^2+666.1x+0.48$	0,97
Kallio et al. (2001)	AISA	TSM	$R_{705-714}$	0,85
Onderka e Pekárová (2008)	Landsat ETM	SPM	$4.17 * L(TM4) - 43.22$	0,93
Tyler et al. (2006)	Landsat TM	SSC	$-2.44 + 1.36*DN_{b3}$	0,89

Tabela 3 - Modelos bio-óticos - Algoritmos de regressão para banda única

Autor	Satélite/Sensor	Parâmetro	Algoritmo	R <sup>2</sup>
Doxaran et al. (2009)	MODIS	SPM	$12.996 * \exp ((R_{21})/0.189)$	0,89
Koponen et al (2006)	MERIS	TSS	$90.0 * (L709/L560+L665) - 19.6$	0,89
Doxaran et al. (2002b)	SPOT-HRV	SPM	$(XS3)/(XS2)=0.1884\ln(SPM) - 0.4832$	0,91

Tabela 4- Modelos bio-óticos - Algoritmos de regressão para razão de banda

Utilizando algoritmo desenvolvido para aplicação em conjunto de dados de satélites de alta resolução mirando grandes áreas estuarinas europeias, Doxaran, D, (2008) uniu medidas do sensor MODIS com dados de campo para verificar a acurácia do modelo para estimativa dos particulados suspensos e mapear a concentração naquela região. O autor afirma que a razão de bandas aplicada na pesquisa limitou os efeitos dos reflexos da luz do céu (*Sunlint*) e mostrou que os resultados das estimativas não estiveram longe daqueles medidos em campo, ocasião em que o algoritmo se mostrou satisfatório para superar as circunstâncias atmosféricas. Koponen, S. (2007) investigou a viabilidade da aplicação de uma razão de bandas aos dados do sensor MERIS – *Medium Resolution Imaging Spectrometer* para mapear a concentração de sedimentos num evento de *bloom* de primavera com pluma de sedimentos em um mar Finlandês, adicionando à sua pesquisa dados AISA com melhor resolução espacial. Seus resultados indicam que a utilização dos dados MERIS são aceitáveis, embora o modelo aplicado a uma situação isolada não se comporte bem frente às interferências atmosféricas, e que o modelo com aplicação dos dados AISA tem comportamento similar ao aplicado a dados MERIS.

Para águas altamente turvas, onde a concentração supera  $2000 \text{ mg l}^{-1}$ , Doxaran, D, et. al, (2002) aplicaram uma equação de razão de bandas a dados do sensor HRV (*High Resolution Visible*) transportado pelo satélite SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) para determinar a composição das águas no estuário Gironde. As medidas *in situ* foram realizadas com espectrorradiômetro em locais coincidentes com as amostras de água tomadas utilizando valores da faixa do radiômetro entre 500-900nm, 610-680nm e 790-890nm para simular as bandas no sensor HRV. Seus resultados novamente mostram uma elevação da reflectância crescente do azul para o vermelho, acompanhando os valores de sedimentos em suspensão e confirmaram, através de medidas típicas da Rrs e o modelo semi-empírico aplicado, que os parâmetros são aproximados aos medidos diretamente, diante das características das POI (**Figura 11**). Quando utilizadas as bandas XS3 e XS2 as faixas do vermelho e infravermelho próximo, observaram decréscimo em direção a jusante concordando com observações e histórico das pesquisas sedimentométricas locais, mostrando detalhadamente o fluxo de sedimentos no estuário.

A revisão de literatura mostra, portanto, que algoritmos bio-ópticos podem ser utilizados para monitorar o comportamento e a dinâmica de sedimentos em meios aquáticos. No caso do projeto de dissertação em questão, mediante o foco em concentração de sedimentos em suspensão no reservatório de uma usina hidrelétrica, as

pesquisas anteriores, a exemplo das publicações descritas pelas (Tabela 3 e Tabela 4), mostraram a forte tendência a utilização das faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, onde os sedimentos suspensos apresentam picos de reflectância, concomitantemente a utilização de amostras *in situ* para a calibração dos modelos. Novos sensores orbitais possuem configurações diferenciadas que podem apresentar características cada vez mais adequadas a corpos d'água continentais, como é o caso do sensor *Multispectral Instrument* - MSI da missão Sentinel-2. Os trabalhos também mostraram que o rio Madeira tem significativa importância no contexto hidrológico Amazônico, sendo o maior contribuinte da carga sólida que deságua no Rio Amazonas.

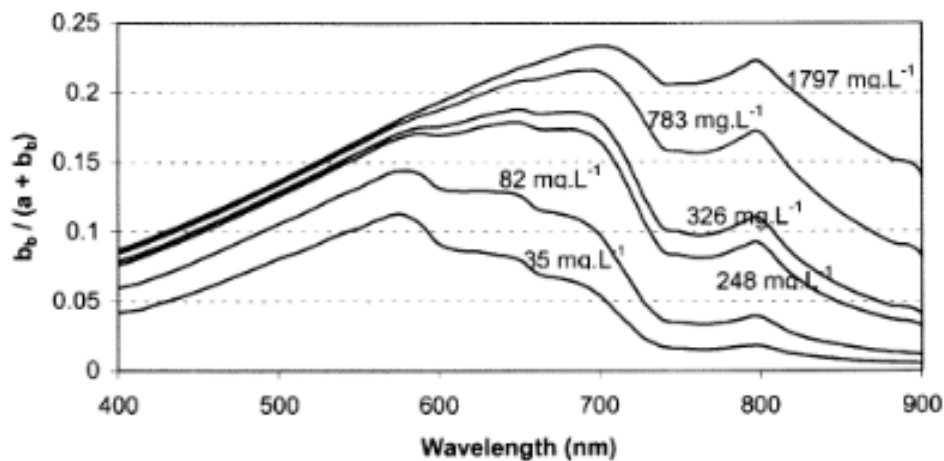


Figura 11 - Intervalo espectral de reflectância de superfície de água para diferentes concentrações de sedimentos em suspensão – Fonte: Doxaran, D. et al, 2002b

### 3.2.2 Estimativas de Concentração de Sedimentos em Suspensão utilizando imagens Sentinel-2

A *European Space Agency* - ESA lançou entre os anos de 2015 e 2017 o conjunto de satélites da missão espacial Sentinel-2, transportando a bordo os sensores MSI, que oferecem novas configurações para a obtenção de dados sobre a superfície da Terra. Os produtos da referida missão já estão sendo utilizados para o monitoramento da qualidade

das águas e com isso recentes trabalhos vêm descrevendo a aplicabilidade de modelos bio-ópticos com dados Sentinel-2 (Satélites S2-A e S2-B).

Dornhofer, K, et al. (2016) observaram que o retroespalhamento estimado a partir dos dados S2-A era levemente maior que o medido *in situ*. O autor ressalta que não há restrições para aplicação dos algoritmos entre diferentes corpos aquáticos ou sensores, destacando que as resoluções características oferecidas pelos sensores resultam em melhores níveis de detalhamento para análise dos corpos d'água. Os resultados das estimativas das concentrações de sedimentos em suspensão se encontraram dentro do intervalo das amostras de água utilizadas como referência.

O trabalho de Liu, H, et al. (2017) buscou desenvolver modelos para estimativas de sedimentos em suspensão utilizando medições espectrais realizadas *in situ* para suportar as simulações das bandas MSI, já que suas bandas espectrais entre o vermelho e infravermelho próximo representam potencial adicional para os modelos de estimativas de sedimentos. As bandas 4 e 8b se mostraram de alta performance quando da calibração e da validação, sendo geralmente mais consistentes para a produção de mapas, que quando comparados com os mapas produzidos a partir de imagens MODIS, mais refinados para solucionar variações em pequenas escalas.

Toming, K, et al. (2016) reafirmaram a vantagem da aplicação de modelos para estimativa de sedimentos utilizando as bandas de 10m oferecidas pelos sensores MSI, no entanto, sugeriram a reamostragem dos pixels para 20m para a exploração de todo o intervalo espectral disponível, já que, ainda assim, para pequenos lagos a resolução espacial de 20 m é suficiente.

A fim de avaliar a potencialidade de dados Sentinel-2 para a estimativa de sólidos suspensos, Caballero, I. et al. (2018) partem de uma calibração por validação cruzada, utilizando as bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Neste trabalho os autores alertam para a baixa relação sinal/ruído em virtude das configurações do sensor MSI. Tais configurações acabam por ocasionar novos desafios ligados à detecção de sombras, nuvens e efeitos de superfície. O modelo utilizado possui a recomendação de se aplicar previamente as reflectâncias da água sem medições radiométricas de campo para ajustá-lo posteriormente às condições locais através de uma recalibração. Dessa maneira, para a transição do modelo multi-condicional para sua região de pesquisa, identificaram pontos de saturação mais sensíveis das bandas da região do vermelho e infravermelho próximo do sensor MSI demonstrando novamente a vantajosa aplicabilidade dos dados Sentinel-2

entre águas claras e águas turvas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 4.1.1 Clima, formação de nebulosidade e precipitação na região da bacia do rio Madeira e Amazônia

O reservatório da UHE Jirau está localizado no rio Madeira, no estado brasileiro de Rondônia, que possui clima Equatorial Quente Úmido com 3 meses de seca, conforme a classificação climática do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE 2020. Segundo Franca, R, R. (2015), que analisou o comportamento climatológico da precipitação pluvial em Rondônia no período compreendido entre 1981 e 2011, o volume das chuvas é maior ao norte do estado (2100 mm/ano) e menor na região onde se forma o rio Madeira, nas proximidades do Vale do Mamoré (1600 mm/ano). O período de seca apresentou uma estação bem definida entre junho e agosto. As chuvas no estado de Rondônia se enquadram no regime pluvial que concentra maior parte da precipitação entre dezembro e fevereiro, correspondendo a 45,3% da chuva anual ocorrente no estado, que apresentou volume médio de 1.896,5 mm no período analisado.

A ocorrência das chuvas entre dezembro e fevereiro é controlada pela movimentação da nebulosidade da convecção amazônica no sentido SE/NO. A distribuição de chuvas nesta região oriental amazônica é considerada como de altas precipitações, acima dos 900 mm no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, e conecta-se com o sistema meteorológico Alta da Bolívia (**Figura 12**), um sistema de alta pressão atmosférica, centrado sobre a Bolívia, com as precipitações chegando a atingir 3.500 mm.ano<sup>-1</sup> nas regiões próximas a Cordilheira dos Andes (FISCH, G, et. al, 1998, SHI, W. et. al, 2000)

Nas proximidades dos grandes corpos d'água o contraste térmico induz a formação de nuvens convectivas e precipitação e geralmente as formações de nebulosidade ocorrem sobre o continente durante o dia com o ciclo de insolação e o aquecimento da superfície exercendo influência sobre o ciclo diurno de precipitação, onde, em áreas continentais, 30% da precipitação ocorre entre 13 e 18hs (FISCH, G, et. al, 1998).

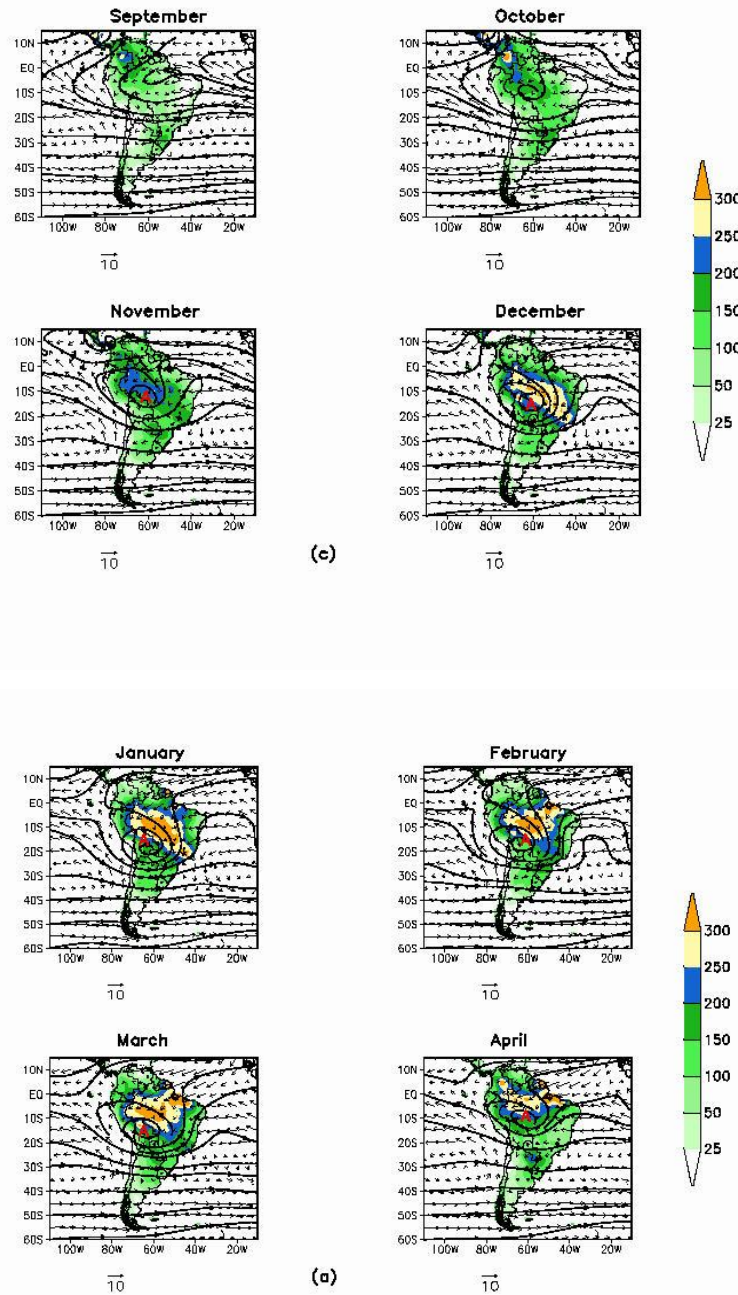


Figura 12 – Precipitações médias mensais (1979-1995) (mm.mês<sup>-1</sup>) entre setembro e abril e localização da Alta da Bolívia (A) – Adaptado de SHI, W. et al, 2000

Dados de satélites geostacionários para estudos climáticos que fornecem parâmetros para observação do clima em séries temporais e estatísticas de cobertura de nuvens são utilizados para definir períodos secos e chuvosos, frente a uma boa relação entre a precipitação e a alta cobertura de nuvens. Dessa forma o período da estação seca na Amazônia foi definido levando-se em consideração aquele que apresenta a menor cobertura de nuvens altas, sendo um critério de ajuste um limite de cobertura máxima de nuvens de 10% numa escala espacial de cerca de 128 km. Na região do rio Madeira o mês de julho foi identificado como o mês mais seco do ano e a estação da seca apresentou duração de 3 meses (MACHADO, L. A. T et. al., 2004) (**Figura 13**).

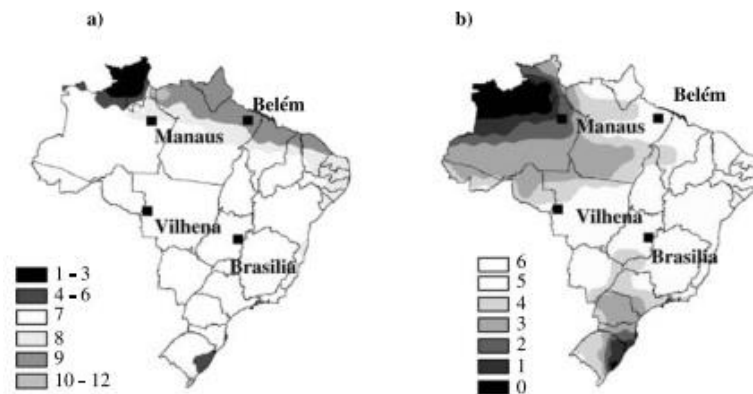


Figura 13 - a) Mês mais seco (mês com a menor cobertura de nuvens altas) e b) Duração da estação seca definida pela cobertura de nuvens. Fonte: Machado, L. A. T. et. al, 2004

Considerada uma em escala de tempo sazonal, a bacia do rio Madeira é caracterizada por um regime de chuvas tropical sul com uma marcada estação seca durante o inverno austral, que é mais intensa no interior dos Andes, e uma estação úmida durante o verão austral. Cerca de 75% da precipitação anual é registrada de dezembro a março. Nos Andes e em seu Piemonte, a distribuição sazonal das chuvas determina hidrogramas de inundações múltiplos que se fundem rio abaixo para contribuir para a grande inundação de tipo tropical anual (VAUCHEL, P, et. al, 2017).



## 4.1.2 Caracterização do rio Madeira no contexto da Bacia Amazônica

### 4.1.3 Contexto da bacia Amazônica

O rio Madeira é formado pela confluência dos Rios Beni e Mamoré na região fronteira entre Brasil e Bolívia, no sudoeste Amazônico, próximo à cidade de Nova Mamoré, no estado de Rondônia - RO. Em seu complexo, destacam-se também dois importantes tributários, os rios Madre de Dios com alta carga sedimentar, afluente do rio Beni, originado no Peru, na cordilheira dos Andes, e o rio Guaporé, denominado Itenez na Bolívia, afluente do rio Mamoré, nascido no estado brasileiro de Mato Grosso – MT. Conforme mostrado por Guyot, J. L (1993), através de dados de vazão do programa PHICAB reunidos entre 1983 e 1989 nas estações localizadas logo a montante do encontro das águas que afluem no rio Beni, o rio Madre de Dios possuía um volume médio anual na estação Miraflores cerca de 77% superior ao volume do rio Beni medido na estação Portachuelo, que foi de  $2870 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , embora as áreas de suas bacias de drenagem sejam equivalentes,  $124.200 \text{ Km}^2$  e  $119.000 \text{ Km}^2$ . O volume de águas oriundo dos rios Madre de Dios e Beni ( $8.920 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), considerando também a contribuição do rio Orthon, foi apontado como responsável por cerca de 51,7% das águas que formam o rio Madeira sendo o restante de seu volume médio anual de formação ( $8340 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) oriundo do Rio Mamoré, com área de drenagem de  $599.400 \text{ Km}^2$ , cerca de 54% maior que a área das bacias dos rios Madre de Dios, Beni e Orthon juntas. O rio Madeira é considerado um mega rio encontrando-se entre os dez maiores rios do mundo e é o segundo maior contribuinte em relação ao volume de águas para o rio Amazonas com descarga líquida média anual estimada em  $26.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , alcançando sua foz após percorrer uma distância aproximada de 1.400 km. Quanto à sua carga sólida, o rio Madeira é o maior contribuinte para o rio Amazonas, levando a ele, cerca de 50% de seu total de sedimentos, com estimativa que fica entre  $500$  e  $600 \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$  que chegam ao oceano Atlântico. Apenas em sua formação, já conta com cerca de  $419 \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$ , na confluência entre os rios Beni e Mamoré, seus formadores (DAMASCENO, J. A, et al, 2017, FILIZOLA, N, et al, 2011, MOLINIER, M, et al, 1996, APUD VILLAR, R. E, et al 2012, RIVERA, I. A, et al, 2019,

VILLAR, R. E, et al 2012, VAUCHEL, P. et al, 2017)

A bacia do rio Madeira (**Figura 14**) tem sua nascente localizada nos Andes a 6.000 m de altitude, em território boliviano (51%) e peruano (7%), onde ocorrem os mais intensos processos erosivos. Com acentuada variação altimétrica, estende-se em parte para o Peru e para o Brasil, na planície Amazônica, caindo para menos de 100 m de altitude no Brasil (42%) onde as taxas de erosão são reduzidas e onde se encontram extensas áreas de inundação. Nessas áreas de planície, o fluxo sedimentar é reforçado pelos processos erosivos de terras caídas (**Figura 15 e Figura 16**). Nas últimas estações sedimentométricas a montante da confluência entre os rios Beni e Mamoré as altitudes são da ordem de 110 a 120m. A área de sua bacia de drenagem é calculada em 975.379 Km<sup>2</sup> a montante da estação Porto Velho e quando considerada a área a montante de sua confluência com o rio Amazonas, calcula-se 1.368.431 Km<sup>2</sup> de extensão, representando 23% da área total da Bacia Amazônica (VAUCHEL, P. et. al, 2017, RIVERA, I. A, et al, 2019, VERGASTA, L. A. et al, 2021).

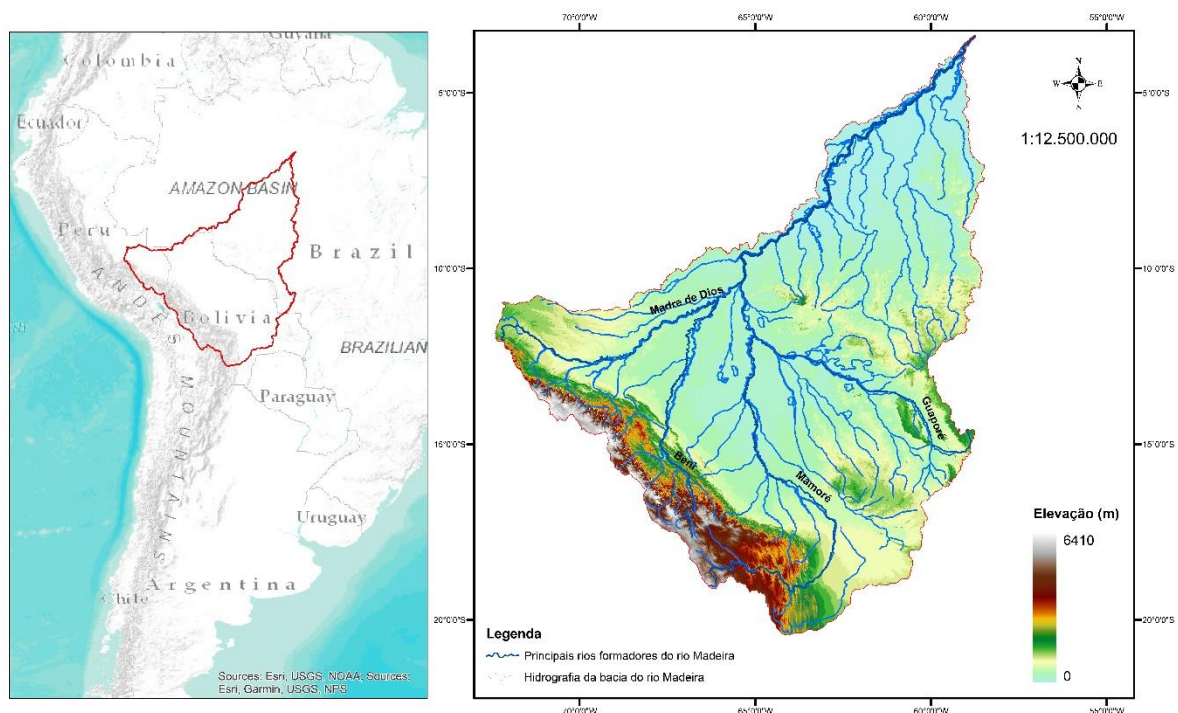


Figura 14 – Bacia do rio Madeira, principais rios e dados altimétricos



Figura 15 – Processos erosivos de terras caídas - Elaborada pelo autor



Figura 16 – Processos erosivos de terras caídas- Elaborada pelo autor

#### 4.1.3.1 Dados de descargas na Bacia do Rio Madeira

Dados resultantes de amostragens entre 2002 e 2011 do programa de monitoramento do Observatório de Pesquisa Ambiental – ORE HYBAM foram reunidos e organizados por Vauchel, P. et al (2017) que apresentaram informações a respeito do comportamento das descargas líquidas e sólidas na bacia do rio Madeira. A rede internacional HYBAM realizou neste período medidas das concentrações de sedimentos a cada 10 dias a longo prazo na estação Porto Velho - PVEL, em continuidade às medições dos programas HyBam e Programa Climatológico e Hidrológico da Bacia Amazônica – PHICAB entre 1984 e 1989. Além da estação Porto Velho, o programa conta com mais 10 estações de monitoramento na bacia do Madeira. As medições de vazões foram realizadas com a utilização de perfilador hidroacústico *Acoustic Doppler Current Profiler* – ADCP. As medições da carga sedimentar suspensa foram realizadas em campanhas de campo e foram simultâneas às medições de vazão, contando com amostragens entre 3 e 5 pontos da seção equidistantes e entre 3 e 5 verticais ao longo dos transectos do rio. Essas medições foram realizadas próximas as margens do rio, porém com profundidades e correntes de água suficientes para a realização das amostragens, contando com 3 amostras de água tomadas em 2 ou 3 campanhas anuais, em períodos hidrológicos distintos, no mesmo local onde é realizada a amostragem a cada 10 dias nas estações fixas, conforme metodologia definida no âmbito do programa de monitoramento HYBAM. Baseado nas

informações a longo prazo sobre a dinâmica sedimentar na bacia do Madeira, Vauchel, P, et al (2017) mostraram que na estação Cachuela Esperanza – CACH, localizada no rio Beni, na Bolívia, a montante de sua confluência com o rio Madeira, a máxima carga sedimentar ocorre entre os meses de janeiro a março enquanto na estação Porto Velho a máxima carga sedimentar observada ocorreu entre fevereiro e março. Embora a carga sedimentar comece a aumentar no início do período de chuvas, nas partes onde a declividade do relevo é menor, a velocidade de escoamento dos rios é inferior e o tempo de concentração maior, gerando um lapso entre os picos de sedimentos medidos de montante para jusante. Na mesma publicação, em relação às observações de CSS, as menores cargas foram constatadas pelas medições na estação Guayaramerin – GUAY, localizada no rio Mamoré em território boliviano, a montante de sua confluência com o rio Beni. Atribui-se às baixas concentrações encontradas nessa localidade as altas taxas de deposição de sedimentos grossos do Andes e a uma forte diluição das águas brancas pelas águas pretas das planícies de inundação. Os dados em relação ao rio Beni observados pelos autores na estação CACH entre 2002 e 2011 mostraram que sua vazão média ( $Q_m$ ) foi de  $9.083\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  e vazão específica  $Q_{(\text{espec})}$  de  $32\text{ l}.\text{s}^{-1}.\text{Km}^{-2}$  e sedimentos em suspensão calculada em  $940\text{ mg}.\text{l}^{-1}$  e  $346.10^6\text{t}.\text{a}^{-1}$ . Afluente do rio Mamoré, conforme Roche e Jauregui (1988), que realizaram um primeiro levantamento sobre os recursos aquáticos na bacia do Madeira, o rio Guaporé/Itenez drena uma vasta área de inundação com águas claras, ao contrário dos rios Andinos, e seu período de enchente e cheia dura de janeiro a maio e apresentava mediante observação que reuniu dados de campanhas realizadas entre 1984 e 1985 das estações hidrométricas do PHICAB vazão de  $2.021\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ . Conforme Vauchel, P. et al 2017 o rio Mamoré, na estação GUAY, apresentou vazão ( $Q_m$ ) da ordem de  $7.114\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e vazão específica  $Q_{(\text{espec})}$  de  $12\text{ l}.\text{s}^{-1}.\text{Km}^2$ , com descargas de sedimentos de  $225\text{ mg}.\text{l}^{-1}$  e  $62.10^6\text{t}.\text{a}^{-1}$  e o rio Madre de Dios, importante contribuinte em termos de descargas sólida e líquida que chegam ao rio Madeira, que encontra-se localizado na Bacia do rio Beni, apresentava, na estação SENA, na Bolívia, uma vazão média ( $Q_m$ ) correspondente a  $5.661\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Acessando dados de bacias de captação ao redor das estações CACH e GUAY, os autores contabilizaram os dados de carga sedimentar introduzida no rio Madeira até a estação PVEL, em  $3\text{Mt}.\text{a}^{-1}$ . Além disso, foi obtida uma estimativa para a carga de sedimentos de  $419\text{Mt}.\text{a}^{-1}$  na confluência entre Beni e Mamoré. Foi observada uma considerável diferença entre as origens das descargas dos rios Beni e Mamoré. Segundo os autores, da vazão de formação do rio Beni, 55% das

águas têm origem nos Andes e quantidade de sedimentos equivalente à sua produção andina, enquanto o rio Mamoré possui apenas 26% de suas águas oriundas dos Andes e apenas 20% dos sedimentos de produção andina, o que revela uma forte deposição em sua bacia devida a baixa energia de seus afluentes para o transporte de sedimentos. A carga sedimentar desde a formação do rio Madeira até a estação Porto Velho se mostra inferior no início do período chuvoso e aumenta no final do período de enchente, indicando que este fato pode estar relacionado à baixa vazão no início do período chuvoso para ressuspender à parte de areia oriunda dos Andes que permanece no leito do rio na região de planícies. Com o avanço do período chuvoso a descarga líquida é maior e aumenta o escoamento e a potencialidade para ressuspender a parte de areia que é então misturada ao silte, argila e sedimentos provenientes de processos erosivos das margens.

#### 4.1.3.2 Vazões do rio Madeira na região do reservatório da UHE Jirau

Dados diários de vazão (**Figura 17**) entre os anos de 2016 e 2020 das estações telemétricas operadas pela Energia Sustentável do Brasil – ESBR indicaram que, em sua formação, imediatamente a jusante da confluência entre o rio Beni e o rio Mamoré, as vazões mínimas do Rio Madeira ocorreram entre outubro e setembro, com valor médio de  $(Q_m) 2.381\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  no período e as vazões máximas ocorreram entre março e abril com valores médios  $(Q_m)$  de  $35.816\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  no mesmo período.

Após sua formação, o rio Madeira recebe ainda a contribuição do rio Abunã, com vazões medidas na estação Morada Nova Jusante com valor médio para as mínimas do período de  $(Q_m) = 68\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e máximo de  $(Q_m)1.380\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . A estação mais próxima da UHE Jirau (15340600), denominada Porto R4, se localiza aproximadamente a 3Km a jusante de seu barramento e as vazões medidas nessa localidade quantificaram mínima média  $(Q_m) = 3.048\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  para o mesmo período. As máximas ficaram com média de  $(Q_m) = 36.447\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ .

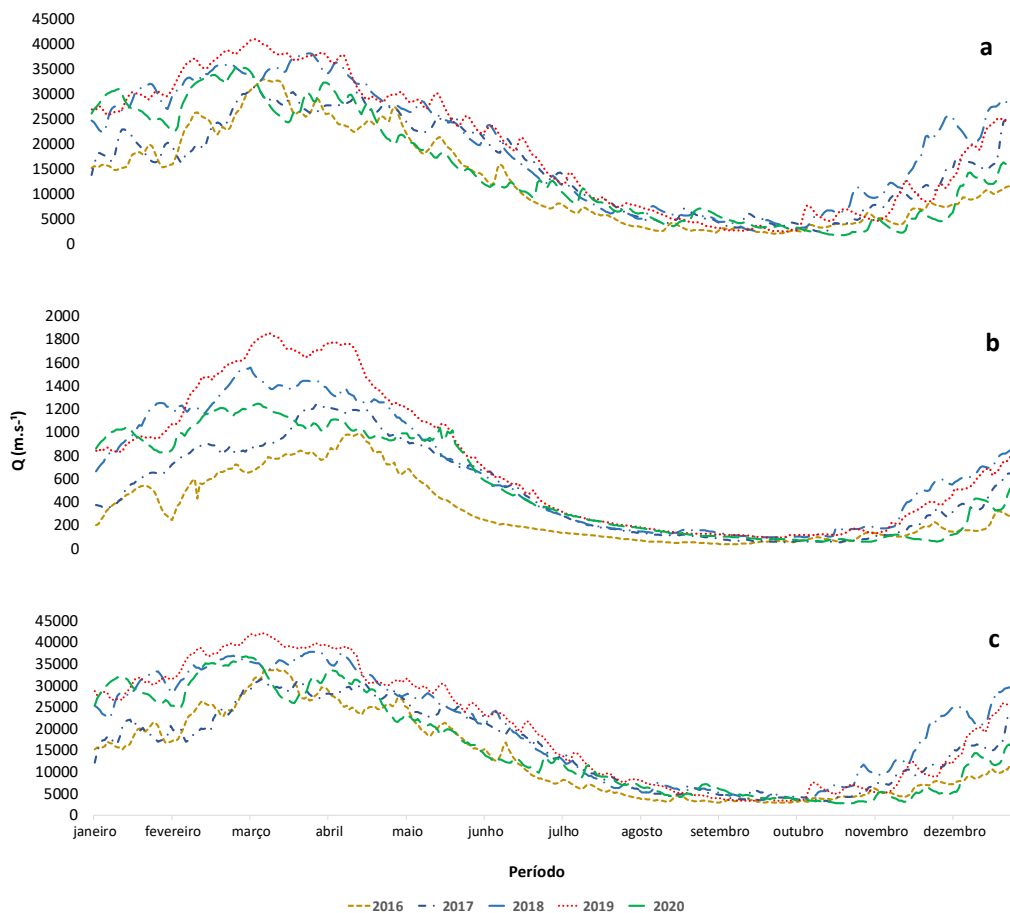


Figura 17 – Vazões entre 2016 e 2020 – a) Estação Jusante do Rio Beni (15318000) - b) Estação Morada Nova Jusante (15326010) c) Estação Porto R4 (15340600)

#### 4.1.4 Propriedades óticas das águas do rio Madeira

A quantidade de material que influencia a cor da água se relaciona com cada rio a depender de sua profundidade, da distância dos bancos de sedimentos da bacia e da sazonalidade. As águas do rio Madeira são ricas em minerais de argilas como ilita e esmectita e se caracterizam por possuírem aspecto amarronzado (**Figura 18**), e devido à

forte presença de sedimentos, conforme a divisão das categorias dos rios Amazônicos, o rio Madeira se enquadra no domínio dos rios de águas brancas (JUNK, W. J, et. al, 2015).



Figura 18 – Coloração das águas do rio Madeira no reservatório da UHE Jirau em julho de 2021 –  
Elaborada pelo autor

No entanto, em Sensoriamento Remoto a caracterização da cor das águas se faz pela assinatura espectral de cada corpo hídrico, conforme a composição físico-química de seus constituintes. Uma proposta sobre as propriedades óticas dos rios Amazônicos é apresentada por Montanher, O. C, et al (2014), ilustrada pela **Figura 19** que leva em consideração a variedade de características regionais como formações geomorfológicas, nível de antropização e atividades desenvolvidas na bacia, bem como a localização das nascentes e traçado das calhas fluviais, que podem influenciar na coloração das águas e interferir na acurácia da modelagem empírica para as estimativas de CSS.

O comportamento espectral do rio Madeira se mostra diretamente relacionado com a concentração de sedimentos e seu ciclo hídrico, com menores valores de reflectância ocorrendo nos períodos de vazante e seca e aumento da reflectância na enchente e cheia. Em relação à assinatura espectral, as águas do rio Madeira apresentam baixa reflectância nas regiões do verde e do azul do espectro eletromagnético e altos valores na região do vermelho, principalmente no período da enchente, decrescendo fortemente na direção dos comprimentos de ondas longas (VILLAR, R. E, et. al, 2013). A **Figura 20** mostra a assinatura espectral da água do rio Madeira no reservatório da UHE Jirau coletadas com imagens do período de seca e do período de enchente.

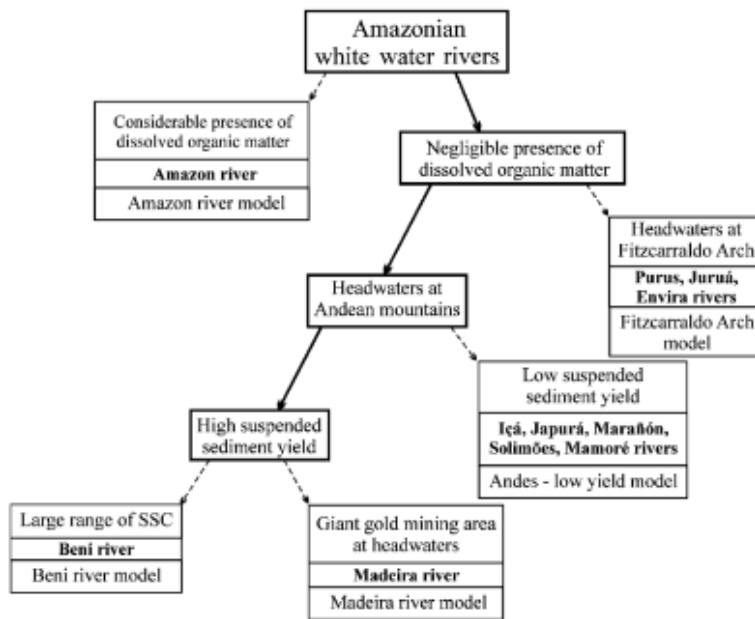


Figura 19 - Árvore de decisão para classificação de SSS em rios amazônicos de águas brancas –  
 Fonte: Montanher, O. C, et al, 2014

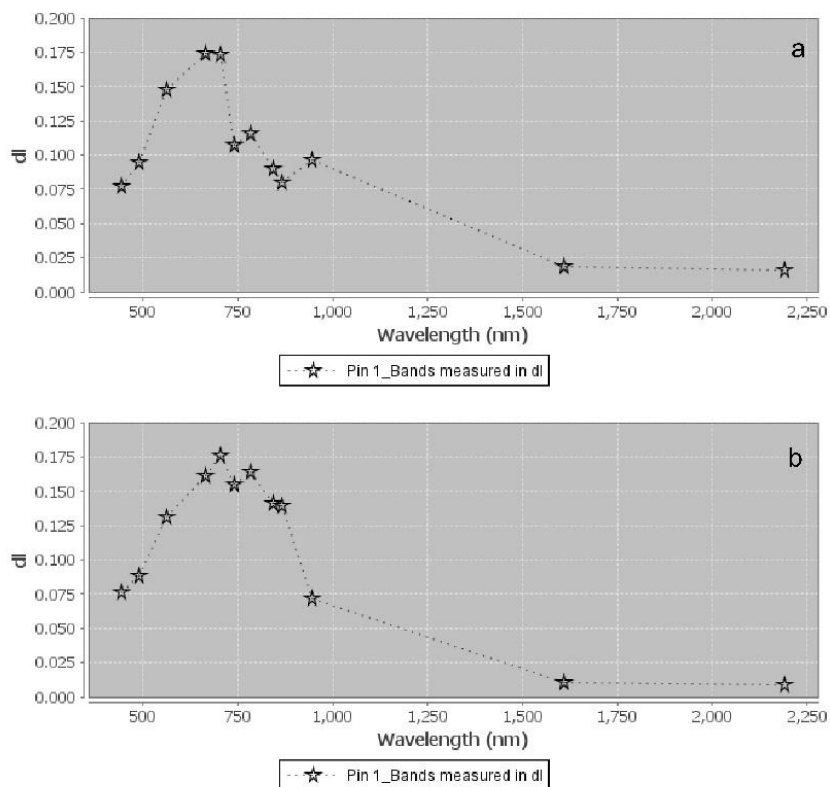


Figura 20 - Assinaturas espectrais da água no reservatório da UHE Jirau – a)10/2019 b)01/2020



#### 4.1.5 Localização da área de estudo, estações e postos ESBR e seções amostrais SPECTROSED

O trecho do rio que se estende até a cidade de Porto Velho, apresenta traçado retilíneo com leve sinuosidade e com frequentes cachoeiras e corredeiras e nele encontram-se instaladas as UHE'S Jirau e Santo Antônio (ADAMY, A. 2016). (**Figura 21**).

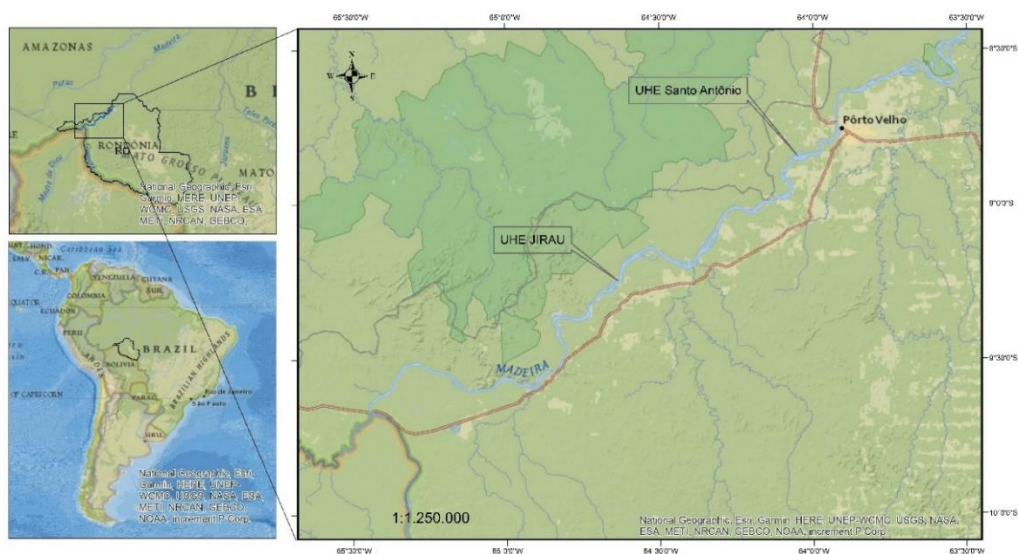


Figura 21 - Localização da área de estudo

A UHE Santo Antônio fica localizada a aproximadamente 7 Km da cidade de Porto Velho – RO e conta com um reservatório com área de 421,6 Km<sup>2</sup> e uma porção de pixels de água de seu reservatório foi utilizado para realizar análises de reflectâncias de imagens Sentinel-2 após a obtenção de dados de três diferentes correções atmosféricas. Já a UHE Jirau, área principal desta pesquisa, se encontra a cerca de 120Km a montante da cidade de Porto Velho – RO e o reservatório da UHE possui uma área de 395,21 Km<sup>2</sup> quando de seu nível máximo. Na região do reservatório da UHE Jirau foram delimitadas 8 seções amostrais, dentre elas, 3 com a presença de cachoeiras submersas (Figura 22 e Figura 23) para coleta de dados através das imagens de satélite ao redor dos pontos georreferenciados pela equipe de pesquisa SPECTROSED que realiza levantamentos em campo de CSS, granulometria, mineralogia vazão, dados batimétricos e radiometria. A

Erro! Fonte de referência não encontrada. contém informações a respeito das distâncias a proximadas das seções de amostragens até o barramento da UHE.

Além das seções amostrais para tomada de dados de satélite e amostras da superfície da água, a pesquisa também contou com a contribuição da Rede Hidrometeorológica Nacional, coordenada pela ANA em parceria com outras instituições, que possui um conjunto de estações telemétricas, entre elas um conjunto operado pela ESRB. Para este trabalho, foram utilizados dados das estações hidrométricas Jusante do Rio Beni (15318000), localizada a jusante da confluência dos rios Mamoré e Beni, Morada Nova Jusante (15326010), a montante da confluência do rio Abunã com o rio Madeira e Porto R4 (15340600), a jusante do barramento da UHE Jirau (**Figura 24**).

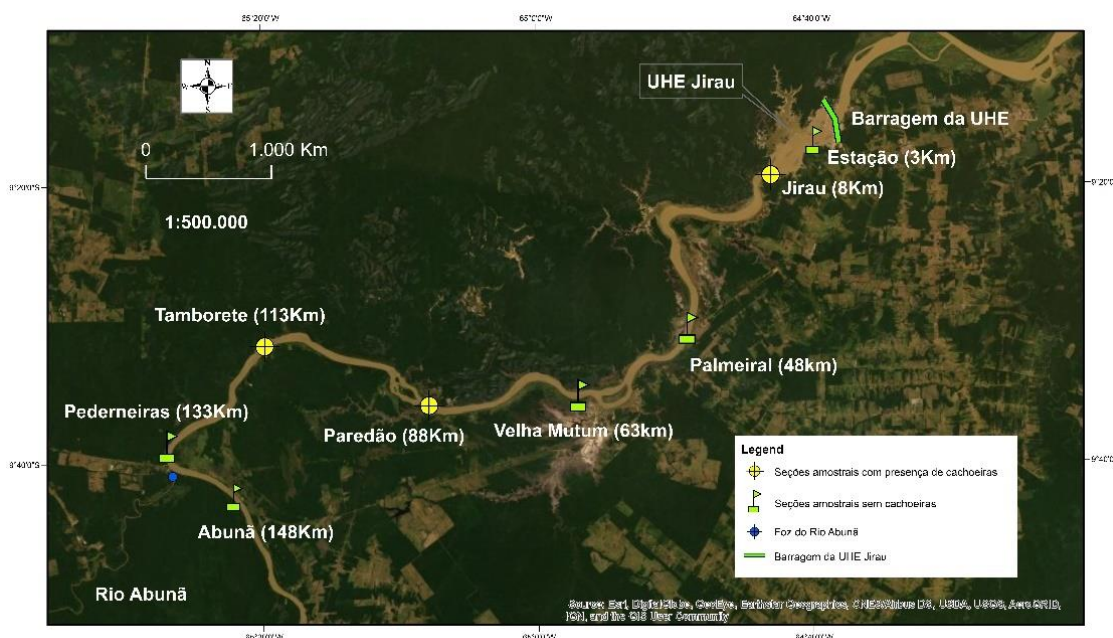


Figura 22 - Localização das seções amostrais SPECTROSED

Seção amostral	Distância até o barramento (Km)
Abunã	148
Pederneiras	133
Tamborete	113
Paredão	88
Velha Mutum	63
Palmeiral	48
Jirau	8
Estação	3

Tabela 5 - Seções amostrais e suas distâncias aproximadas até o barramento da UHE

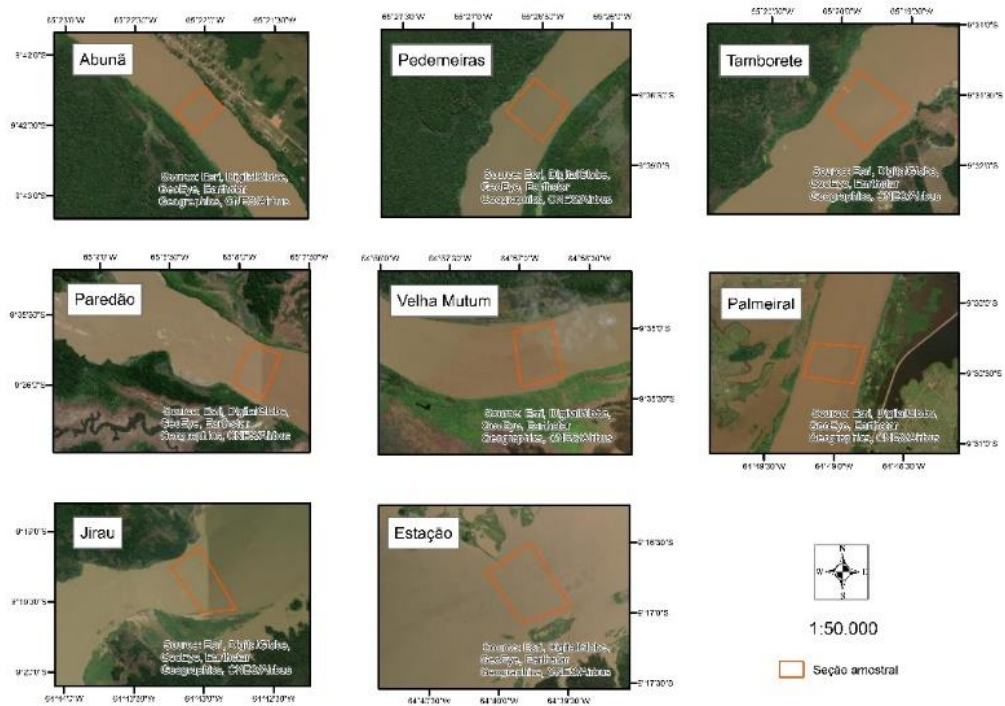


Figura 23 - Seções amostrais na região do reservatório da UHE Jirau



Figura 24 - Localização das estações telemétricas

## 4.2 IMAGENS DE SATÉLITES

### 4.2.1 Imagens MODIS

Os dados MODIS utilizados são os produtos compostos a 8 dias (*MODIS Surface Reflectance*) MOD09Q1 e MYD09Q1 com resolução espacial de 250m e MOD09A1 e MYD09A1 com resolução espacial de 500m, Level 2, o que significa que são dados atmosféricamente corrigidos e que para cada pixel, foi selecionado a melhor observação resultante de um intervalo dos 8 dias anteriores. O composto 8 dias é um conjunto de imagens diárias utilizado para a captação da imagem com menor cobertura de nuvens da série temporal. Estes dados foram adquiridos através do programa GetMODIS, utilizado para a extração e preparação das imagens em séries temporais distribuídas pela *National Aeronautics and Space Administration* - NASA. Para a obtenção dos dados de interesse deve ser delimitada uma área retangular contendo a região da estação virtual desejada, denominada *subset* e incluir a parte do curso d'água, que será delimitada por uma máscara definida pelo usuário em formato (.kml). A estação virtual que enquadra a área desta pesquisa é a estação 15400000.

Posteriormente o programa *MODIS River Reflectance Retrieval* - MOD3R obtém de forma robusta a reflectância da água a partir das bandas espectrais do produto MOD09Q1, retornando um código de qualidade de cada cena processada, obtido como informação adicional a partir das imagens de menor resolução, do conjunto MOD09A1. Foram utilizadas imagens da coleção MOD09Q1 compostas pelas bandas 1 e 2, que são as bandas do vermelho e infravermelho próximo, respectivamente. Para a porção de pixels de água desejado o usuário deve inserir uma máscara, que é um arquivo de pixels de cobertura da área de pesquisa e uma pasta de saída. Após a seleção de uma máscara que indica a região onde deverão ser extraídos os pixels, é gerada uma tabela com os níveis de qualidade de cada data adquirida. Ambos os programas foram desenvolvidos pelo IRD em parceria com o SO-HYBAM (Martinez et al. 2009). Para a aquisição das reflectâncias de água foram delimitadas neste trabalho 3 regiões amostrais, a jusante (J1) e a montante (M1) do barramento da UHE Santo Antônio e em uma região de igarapé próxima ao

barramento da usina (IGP) (**Figura 25**).

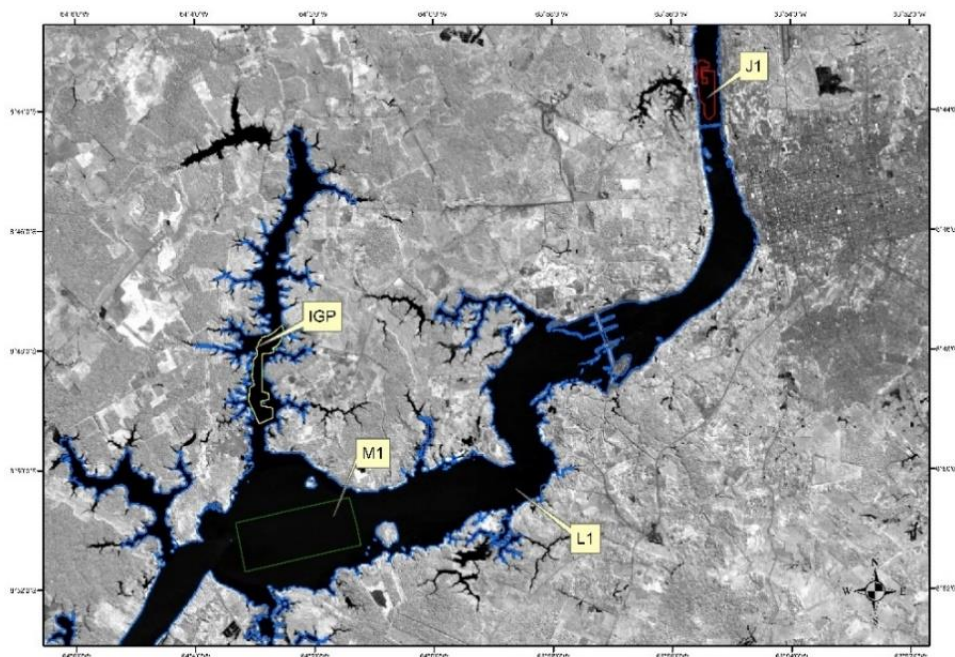


Figura 25 - Regiões amostrais (Igarapé – IGP, Montante – M1, Jusante – J1 e Lago – L1) de reflectância da água na região do reservatório da UHE Santo Antônio

#### 4.2.2 Imagens Sentinel-2

A missão Sentinel-2 ESA - *European Space Agency* conta com uma constelação de dois satélites idênticos que orbitam o planeta equidistantes em 180°, realizando a cobertura de toda a Terra entre as latitudes 84°N e 56°S com um faixa de observação (*swath*) de 290Km. Seus sensores utilizam o sistema de imageamento *push-broom*, que realiza a varredura eletrônica registrando a imagem da superfície ao longo de uma faixa em linhas sucessivas orientadas ortogonalmente à direção da trajetória do satélite. As imagens dos satélites S2-A e S2-B, lançados em junho de 2015 e março de 2017 respectivamente, possuem resoluções espaciais entre 10 e 60m que variam de acordo com suas bandas, entre o Visível (*Visible- VIS*), Infravermelho próximo (*Near Infrared- NIR*) e o Infravermelho de ondas curtas (*Short-wave infrared – SWIR*), sendo ao todo 13 bandas espectrais, detalhadas pela **Figura 26**. Uma das grandes vantagens das imagens

Sentinel-2, portanto, é o fato de possuírem alta resolução espacial (10 m) comparadas às imagens MODIS em quatro bandas, azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, 20m em 4 bandas, contando com uma banda no *Red edge* (borda do vermelho) com sensibilidade para detecção e discretização da vegetação, além das bandas para a discriminação de neve, gelo, nuvens e status de vegetação e 3 bandas em 60 m que são bandas para a correção atmosférica. Outra grande vantagem é seu tempo de revisita, já que conta com dois satélites em órbita simultânea heliosíncrona oferecendo imagens de 5 em 5 dias, o que impacta positivamente na qualidade dos monitoramentos de sistemas fluviais.

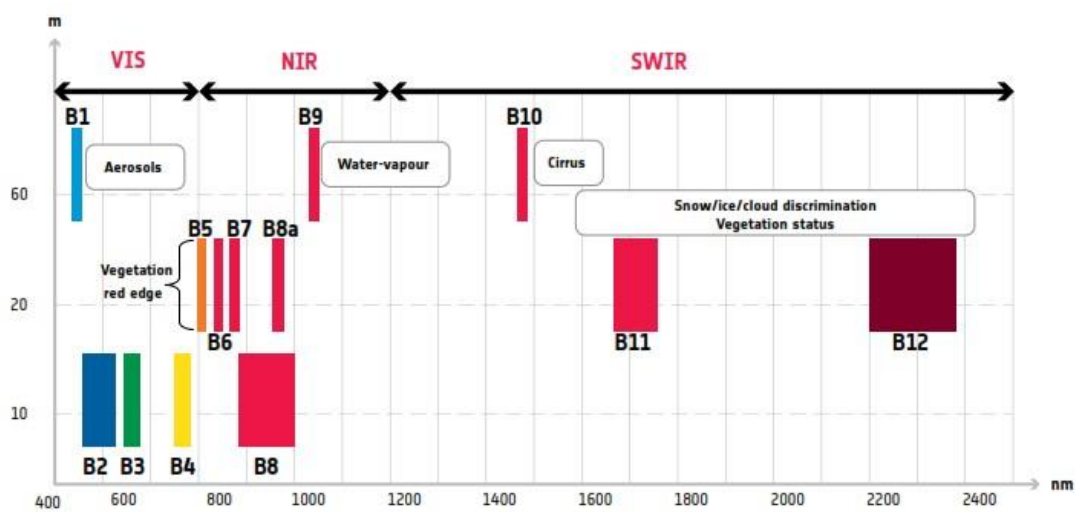


Figura 26 - Bandas espectrais x resoluções espaciais dos satélites Sentinel-2

Os produtos de reflectância *Bottom-of-Atmosphere* - BOA Level 2A da Missão Sentinel-2 são gratuitos para download pelo Programa *Copernicus*, da *European Space Agency* – ESA e produtos nível L1C, *Top-of-Atmosphere* - TOA pela *Copernicus* e pela Instituição *United States Geological Survey* - USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Posteriormente, os produtos de reflectância Level-1C foram, quando necessário, processados utilizando-se dos algoritmos para correção atmosférica Sen2Cor a fim de se obter os produtos Level-2A e as máscaras que foram utilizadas para extração dos pixels de água quando ainda não existentes os produtos corrigidos atmosféricamente pela correção GRS.

### 4.3 CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram analisados os resultados de diferentes correções que computam as variáveis atmosféricas que perturbam as medições, fazendo a integração dos componentes presentes no caminho entre os sensores e a superfície da água.

Os dados de reflectância das massas aquáticas nas regiões da pesquisa obtidos das relações de interação da luz com os componentes ópticamente ativos da água e os artefatos atmosféricos presentes no caminho entre a superfície terrestre e os sensores, após os processamentos das correções atmosféricas, resultam no valor da Reflectância de Sensoriamento Remoto (Rrs), medida que é a razão da radiância ascendente (Lu) pela irradiância descendente (Ed).

Das ferramentas computacionais baseadas em algoritmos que realizam a conversão dos produtos Sentinel-2 Level 1C TOA para produtos Level 2A BOA utilizou-se produtos dos processadores Sen2Cor (ESA), MAJA, desenvolvido pelo projeto Muscate do *Theia Land Data Center* - THEIA e *GRS Algorithm* (Harmel, et al. 2018).

Os algoritmos MAJA e Sen2cor, desenvolvidos para as agências espaciais francesas e europeias respectivamente, oferecem correções atmosféricas genéricas das imagens Sentinel-2 para as superfícies continentais, sem especificação particular para as águas continentais. O Sen2Cor utiliza uma biblioteca de dados de transferência de radiação para diferentes parâmetros, gerando uma classificação de cenas para produzir as imagens corrigidas. O MAJA introduz uma correção multitemporal para detectar melhor as variações oriundas da processos atmosféricos. O *GRS algorithm* oferece a remoção do efeito *sunlint* no corpo aquático, uma correção exclusiva para as águas continentais e costeiras.

#### 4.3.1 MAJA

Segundo Hagolle, O, et.al (2017), o processador MAJA utiliza a correção atmosférica baseada no algoritmo *Multi-Mission Atmospheric Correction and Cloud Screening* - MACCS-ATCOR. A correção atmosférica MAJA é apoiada no conhecimento da *Aerosol Optical Thickness* - AOT e códigos de transferência radiativa, convertendo reflectâncias TOA em reflectâncias BOA. Os efeitos de espalhamento molecular e de aerossóis são modelados com a utilização de *Lookup tables* - LUT's que convertem as reflexões TOA já corrigidas em reflexões de superfície. O processador utiliza um método de correção simplificada para corrigir a absorção de moléculas gasosas baseado na banda espectral apropriada a esta finalidade, no caso do Sentinel-2, a banda 9, centrada em 940nm, que corresponde à faixa de forte absorção de vapor de água. O algoritmo detecta nuvens e suas sombras através do método de detecção multi-temporal que processa uma série temporal de imagens em ordem cronológica obtendo imagens compostas por pixels livres de nuvens. Cada imagem do processo é comparada com a composição e as nuvens identificadas quando observado um aumento na faixa do azul. Considera-se também os efeitos de declividade em que o terreno apresenta mais brilho quando voltado para o sol. Dessa forma a correção atmosférica é feita após a determinação do vapor d'água e *Aerosol Optical Thickness* - AOT, realizando então a correção da absorção de vapor d'água, a correção do espalhamento ocasionado pelos gases atmosféricos, a correção dos efeitos de adjacência e correção do terreno.

#### 4.3.2 Sen2Cor

O processador Sen2Cor para a correção atmosférica e classificação de cenas é disponibilizado pela plataforma *Sentinel-2 Application Platform* - SNAP da ESA. De acordo com Müller-W, U (2016), o módulo para correção atmosférica é baseado em



LUT's – geradas através de uma base de dados de função de transferência de radiação, para diferentes parâmetros como, ângulo solar, ângulo do sensor, azimuth relativo, elevação do terreno, visibilidade, vapor de água no verão e no inverno, baseados na biblioteca *libRadtran*. O processamento apresenta três produtos com saídas para o usuário em forma de:

- *Aerosol Optical Thickness* – AOT, que correlaciona a reflectância da banda 12 (SWIR) com a banda 4 (Vermelho) e banda 2 (Azul) e fornece uma mensuração para a transparência da atmosfera;

- *Water Vapour* – WV – Informa a profundidade da coluna de vapor de água, através da utilização do algoritmo APDA – *Atmospheric Precorrected Differential Absorption*, aplicado às bandas 8a e 9;

- *BOA Corrected Reflectance* – Utiliza a classificação de cenas para gerar as imagens corrigidas para todas as bandas após a correção de terreno e remoção de nuvens cirrus através da banda 10.

### 4.3.3 GRS

Harmel, T, et. al (2018), apresentam o algoritmo GRS, desenvolvido para estimar e corrigir a radiação *sun glint*, para os dados Sentinel-2 adquiridos sobre águas oceânicas e continentais. O algoritmo é baseado em características espectrais do componente *sun glint*, medido pela radiância que atinge a atmosfera, a transmitância direta que chega à superfície e a que deixa a superfície e uma função da *Bidirectional Reflectance Distribution Function* - BRDF em águas com superfícies difusoras, como no caso de águas atingidas pelos ventos que geram uma miríade de imagens do sol que atingirão o sensor. São então consideradas múltiplas reflexões de facetas de ondas para a parametrização do efeito *sun glint*. Segundo os autores, o algoritmo objetiva derivar valores da interface ar-água nas bandas do SWIR, onde a atmosfera é fracamente impactada pelo espalhamento dos gases e aerossóis. Nessa faixa, a radiância que deixa a água pode ser considerada nula por conta da alta absorção da luz incidente pela coluna de água. Aplica-se a correção a imagens Level-1C dos sensores da missão Sentinel-2,

reamostrando-as para a resolução da banda do SWIR. Faz-se a correção de absorção dos gases e também a correção para radiância difusa da atmosfera para AOT. Em seguida faz-se o cálculo do BRDF, computa-se a radiância *sunglint* para todas as bandas e por fim realiza-se a correção da radiância *sunglint*.

#### 4.4 CONJUNTO DE IMAGENS

Um conjunto de 259 imagens (**Tabela 6**) dos satélites Sentinel-2, correspondente a uma série temporal entre abril de 2016 e abril de 2021, composto pelas quadrículas T20LKQ e T20LLQ que compõem a região do reservatório da UHE contendo pixels de água do rio Madeira foi selecionado para a realização da pesquisa. A quadrícula T20LKQ oferece imagens que cobrem desde a região da confluência dos rios Beni e Mamoré indo até a região da seção amostral Palmeiral. Já a região das seções Jirau e Estação e a barragem da Usina é coberta pelas imagens da quadrícula T20LLQ.

Período	2016		2017		2018		2019		2020		2021		N
	T20LKQ	T20LLQ	T20LKQ	T20LLQ	T20LKQ	T20LLQ	T20LKQ	T20LLQ	T20LKQ	T20LLQ	T20LKQ	T20LLQ	
Jan					1	1	1		2	2	2	1	10
Fev			1		1	2	1	4	1	1			11
Mar					3	3	2	3	1	1			13
Abr	1	1	2	1	4	2	4	2	3	3	3	4	30
Mai		1	1	1	3	4	2	2	2	3			19
Jun	1	1	2	2	3	4	4	4	2	4			27
Jul	2	2		1	6	6	6	6	2	3			34
Ago	1	1	4	4	6	6	4	2	6	6			40
Set	2	2	2	1	5	5	5	3	5	4			34
Out			1	2	4	4	2	1	3	3			20
Nov			1		1	1	3	3	4	1			14
Dez			1	1	1	1	1	1	1				7
N	7	8	14	14	38	39	35	31	32	31	5	5	259

Tabela 6 – Conjunto de imagens utilizadas por período e quadrícula correspondente

Para comparar e avaliar a qualidade dos produtos de reflectância produzidos a partir das imagens Sentinel-2, foram consideradas três diferentes correções atmosféricas, a correção MAJA, a correção sem2Cor e a correção GRS, descritas separadamente na próxima sessão deste trabalho. Para esse fim, foram utilizadas 3 imagens de três datas

diferentes da região do lago da UHE Santo Antônio, 27/06/2017 (seca), 19/01/2018 (enchente) e 24/04/2018 (cheia). O lago de Santo Antônio foi escolhido porque fica mais perto de uma estação de monitoramento da concentração de superfície pela rede HYBAM em Porto Velho, logo a jusante da usina. Para essa comparação das concentrações produzidas a partir de 3 correções atmosféricas dos produtos Sentinel-2, também foram utilizadas três imagens dos sensores MODIS a bordo dos satélites AQUA e TERRA em três períodos hidrológicos distintos, com as datas mais próximas àquelas das imagens Sentinel-2 para a comparação das reflectâncias de cada produto, 26/06/2017, 17/01/2018 e 23/04/2018. A escolha das imagens levou em consideração a menor presença de nuvens.

#### 4.5 MODELOS UTILIZADOS PARA AS ESTIMATIVAS DE CSS

Para estimar a CSS a partir das medições de Rrs por satélite, foi utilizado o banco de dados radiométricos hiperespectrais *in situ* apresentado por Villar et al. (2013) e complementado por Martinez et al. (2015) que apresenta um modelo radiométrico validado para as águas do Rio Madeira. O modelo foi adaptado para as bandas MSI por Bernini, H (2019), utilizando os *Spectral Response Function* - SRF das bandas 4<sup>a</sup> a 8a. O modelo para estimativas de CSS que foi testado para o intervalo de CSS de 1 a 2000mg/L é descrito pela **Eq. 1**.

Eq. 1.

$$CSS = 945,1 \cdot \left( \frac{b8a}{b4} \right)^{1,9463}$$

E para as estimativas da CSS o modelo utilizado para os dados MODIS é descrito pela **Eq. 2** conforme publicação de Villar et al. (2013)

Eq. 2.

$$CSS = 2,94 \cdot \left( \frac{IR}{RED} \right)^{1,020}$$

## 4.6 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

O esquema metodológico para o processamento das imagens e dados de satélites da pesquisa foi dividido em duas partes. A primeira parte, detalhada pelas **Figura 27 e Figura 28**, consistiu no pré-processamento das imagens Sentinel-2 pela correção atmosférica em Sen2Cor e obtenção de imagens pré-processadas das correções atmosféricas MAJA, sob demanda (<https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/home>) e GRS disponibilizada por Tristan Harmel, para a comparação e avaliação da qualidade dos produtos de reflectância produzidos pelos três diferentes algoritmos aplicados às elas e dados de reflectância MODIS sobre a superfície do lago da UHE Santo Antônio. Para esse fim, foi utilizado o *Root Mean Square Error relative* - RMSEr (**Eq. 3**) para acessar de maneira quantitativa o ajuste dos diversos conjuntos de dados.

Eq. 3

$$RMSEr = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}}{\bar{x}}$$

Onde:

n = número de pixel,

$\bar{x}$  = Rrs ou CSS calculado pelo GRS Sen2Cor MAJA ou MODIS

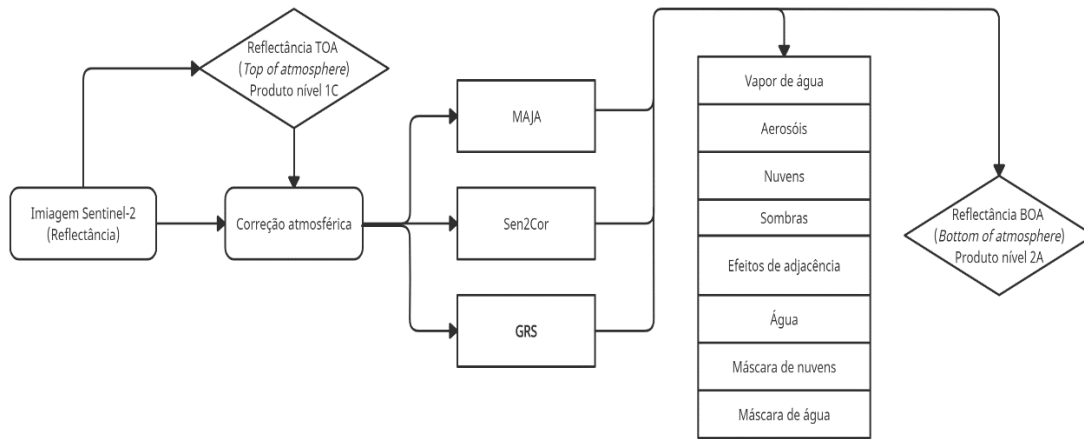


Figura 27 - Esquema metodológico para conversão de imagem Topo de Atmosfera (L1C) para Imagem de Reflectância de superfície (L2A)

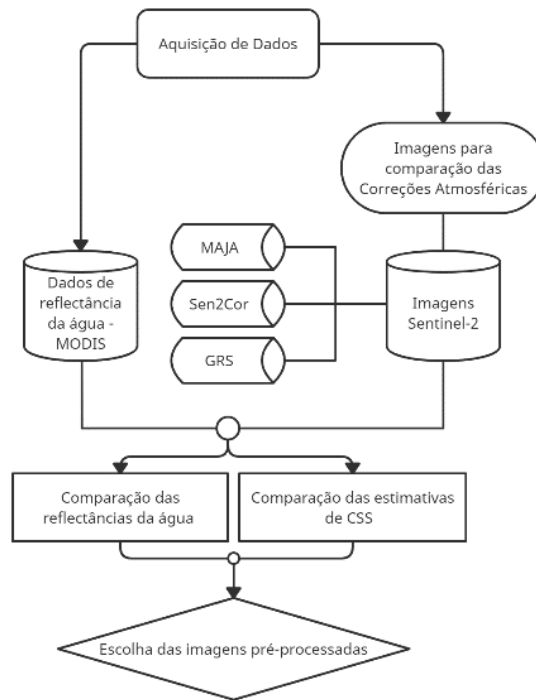


Figura 28 - Fluxograma do esquema metodológico para a avaliação e comparação das reflectâncias da água

A segunda parte da pesquisa, ilustrada pelo esquema metodológico da **Figura 29**, mostra as etapas dos processamentos das imagens para a obtenção dos mapas de CSS que subsidiaram a caracterização da dinâmica hidrossedimentar na região do reservatório da UHE Jirau.

Todas as imagens foram inicialmente reduzidas ao trecho principal da área utilizada, retirando as áreas de igarapés e braços do rio Madeira, considerando, portanto, apenas a calha principal do rio. Para a redução das áreas à calha principal do rio Madeira foi utilizada uma técnica que trabalha com os índices espectrais de água, denominada *Modified Normalized Difference Water Index* MNDWI, pela aplicação da **Eq. 4**, que utiliza uma relação de bandas do verde e outra do SWIR, assim, para imagens Sentinel-2 adquiridas para este trabalho foram utilizadas as bandas 3 e banda 11, reamostrada para 10m. As imagens selecionadas para a extração da máscara contendo a calha fluvial do rio para o trecho pesquisado foram datadas de 23/06/2019 por não conterem nuvens na região do reservatório.

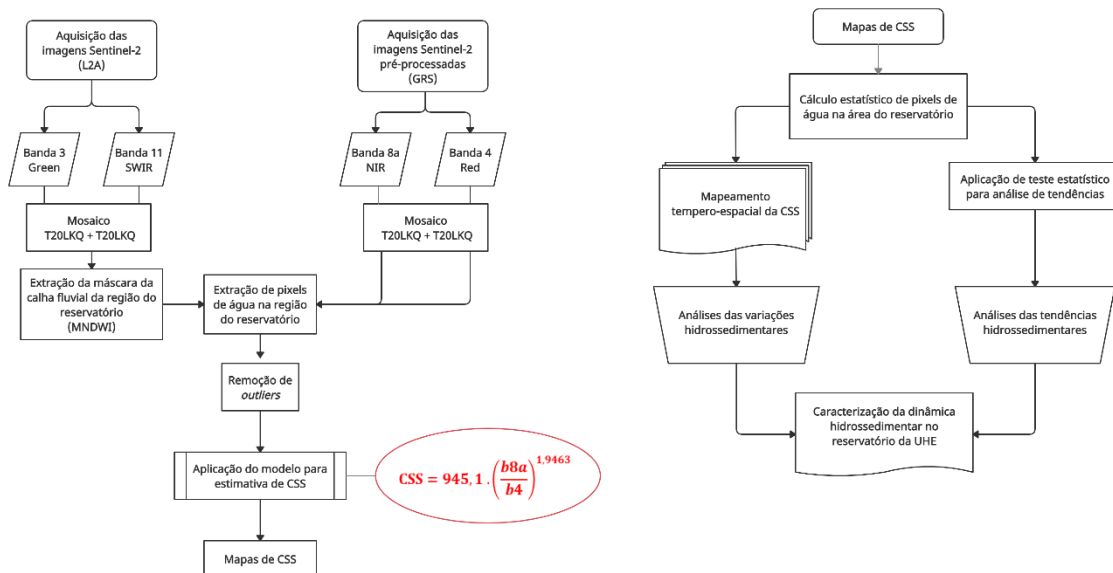


Figura 29 - Fluxograma do esquema metodológico para o processamento das imagens e obtenção de mapas de CSS e análise de tendências

Eq. 4

$$MNDWI_{10m} = \frac{b_3 - b_{11}}{b_3 + b_{11}}$$

Martinez, J. M, et. al (2009), ressaltam que ao longo das margens do rio a imagem pode resultar misturas espectrais, já que outros elementos ocorrem no local, como areia e vegetação, o que resulta em efeitos de adjacência, além de sombra de nuvens, o que revela

a necessidade de processamentos mais robustos para a obtenção do pixel puro de água. Além da máscara base para recorte da calha principal do rio Madeira, foram utilizadas as máscaras de classificação de cenas MG2-R1 produzidas pelo processamento MAJA que informa sobre a presença de nuvens, sombra de nuvens e outros artefatos que interferem no sinal, e, quando não disponíveis os dados MAJA, foi utilizado o processador para correção atmosférica Sen2cor para imagens Sentinel-2 através do aplicativo *Sentinel Applications Platform – SNAP* (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>), uma plataforma que contém a ferramenta para a obtenção da reflectância de superfície e para a extração dos valores classificados como de pixels de água a partir de sua classificação de cenas SCL (*Scene Classification*). O SNAP converte imagens com reflectância TOA para reflectância BOA e gera, dentre outros, um arquivo *raster* com a classificação de cenas.

Para a extração dos valores de CSS para todo o conjunto de imagens, os processamentos foram realizados através da aplicação para criação de modelos *Model Builder*, que gera fluxos e sequências de execução das ferramentas do programa *ArcMap 10.4* a partir de bibliotecas pré-estabelecidas de processamentos de arquivos. O fluxo de trabalho para a extração dos mapas de CSS a partir foi elaborado seguindo os passos para a geração dos mapas de CSS e está detalhado na **Figura 30 - Modelo** para estimativa e mapas de CSS. Para tanto, fluxos foram realizados separadamente para cada uma das quadrículas que abrangem os dois trechos do rio e para o mapeamento completo do trecho do reservatório foi realizado o mosaico das imagens resultantes. As imagens das bandas b4 e b8a do processamento GRS foram utilizadas uma a uma em cada data gerando novos arquivos *rasters*. Em função da remoção do efeito *sunlint* e incorreções de processamentos notou-se que foram gerados alguns valores negativos de reflectância e por isso, após a extração da calha principal do rio, foi incluído na rotina do modelo a função *Conditional* da ferramenta *Raster Calculator* do *software ArcGis 10.4*. Assim foram removidos todos os valores negativos de cada um dos novos arquivos de imagens gerados resultando nos dados finalmente pré-processados para sua aplicação à **Eq. 1** que gerou a estimativa de CSS individualmente para cada uma das 259 imagens processadas.



Figura 30 - Modelo para estimativa e mapas de CSS

Posteriormente à obtenção dos valores de CSS para cada uma das imagens, foi realizada a iteração de *rasters* do *Model Builder* para a aquisição em massa das medidas estatísticas em cada região, obtendo os valores medianos de cada uma das oito seções amostrais e sobre o trecho completo da pesquisa, através da função *Cell Statistics*.

Para verificar a existência de tendência espacial de deposição de sedimentos em direção à barragem da UHE, foram realizados os testes estatísticos para análise de tendências de *Mann-Kendall* e *Sen Slope*.

A obtenção dos valores de reflectância para cada região se deu pelo cálculo do valor mediano para 50 regiões consecutivas que subsidiam as análises de tendências utilizando-se a ferramenta de edição *Split Into Equal Parts* do programa *ArcMap 10.4*, após o traçado da região central do leito do rio.

Para analisar as seções amostrais foi utilizado o suplemento *XRealStats*



(<https://www.real-statistics.com/free-download/real-statistics-resource-pack/>) para Excel que constrói diagramas de caixas que utilizam as referências dos valores resultantes para dizer sobre sua distribuição, minimizando os efeitos dos valores discrepantes.

#### 4.7 TESTE ESTATÍSTICO PARA ANÁLISE DE TENDÊNCIAS

Uma das maneiras para avaliar o comportamento de uma série de dados sequenciais é a realização da análise de tendências. Séries históricas de dados hidrológicos são usualmente avaliadas sobre o aspecto de suas variações ao longo do tempo e as observações sobre a dinâmica de suas variações podem indicar se há mudança gradual em determinada direção, expressando a ocorrência de uma mudança monotônica nos dados (MEALS, D. W, et. al, 2011). Para tanto a análise estatística de tendência realiza um teste de hipótese em que o resultado de Hipótese Nula ( $H_0$ ), ou próximo dele deve ser interpretado como a ausência de tendência nos dados e a rejeição da hipótese nula leva a uma interpretação de que não é possível afirmar que não exista tendência nos dados. O teste não-paramétrico de *Mann-Kendall* é utilizado como método estatístico com vantagem por sua capacidade de minimizar os efeitos dos valores discrepantes que fogem ao padrão para definir se os valores da variável medida ao longo do tempo tendem a aumentar ou a diminuir, orientada por uma mudança monotônica, analogamente à uma análise de regressão (HELSEL e HIRSCH, 2002 apud SANTOS, V. O, et. al, 2016). A maneira para avaliar a magnitude da tendência é dada pela estimativa *Sen's slope* e o teste de significância é estabelecido conforme a **Eq. 5**, em que os valores da série analisada são comparados entre si com os dados subsequentes, incrementando em 1 o resultado de um dado subsequente maior que o anterior e reduzindo em 1 quando o dado posterior é menor que o do período anterior. A função *sign* é definida pela **Eq. 6** e o somatório resultante dos valores incrementados e reduzidos resulta no valor S, que representa a soma dos sinais das diferenças entre as combinações observadas. O teste se aplica quando o conjunto de dados é superior à 4 elementos ( $n > 4$ ) e o cálculo da variância de S ( $\sigma_S$ ) segue conforme a **Eq. 7**. A direção da tendência, caso a hipótese nula seja rejeitada, é dada por

$\tau$  (*Tau*) **Eq. 8** e a significância da tendência é dada por  $Z$  **Eq. 9** (ASWAD, F. K, et al, 2020, HELSEL, D. R and FRANS, L. M, 2006, MEALS, D. W, et. al, 2011, SALMI, T, et. al, 2002, SANTOS, V. O, 2016, TRINDADE, A. L. C, et al, 2017).

Para a realização do teste estatístico para detecção de tendências foi utilizada a aplicação MAKESENS 1.0 (<https://en.ilmatieteenlaitos.fi/makesens>) para o software Excel que oferece o valor da magnitude da tendência ( $Q_t$ ), parâmetro que estima a inclinação mediana da curva resultante da combinação dos pares de dados. A aplicação utiliza quatro níveis de significância que indicam o nível de confiança adotado para a interpretação do teste de hipótese, conforme a **Tabela 7**:

Eq. 5

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

Eq. 6

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{se } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

Eq. 7

$$\sigma_S = \sqrt{(n/18)(n-1)(2n+5)}$$

Eq. 8

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$

Eq. 9

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sigma_S} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sigma_S} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

***	$\alpha = 0.001$
**	$\alpha = 0.01$
*	$\alpha = 0.05$
+	$\alpha = 0.1$

Tabela 7 - Níveis de significância para interpretação do teste de hipótese

Os testes estatísticos de *Mann-Kendall* e *Sen Slope* foram adaptados para a elaboração desta pesquisa substituindo-se os valores do período sequencial anual pelas distâncias aproximadas de cada uma das 50 regiões fracionadas e consecutivas do reservatório da UHE Jirau, resultando em uma análise de tendências de CSS medianas de montante para jusante desde a formação do rio Madeira em direção à barragem da UHE.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos através da pesquisa após a aquisição e processamento de imagens de satélite das regiões definidas para as observações a respeito da reflectância da água nas regiões dos reservatórios das UHE's Santo Antônio e Jirau, no rio Madeira e das estimativas das Concentrações de Sedimentos em Suspensão na região dos reservatórios das UHE's.

### 5.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS REFLECTÂNCIAS DA ÁGUA E ESTIMATIVAS DE CSS A PARTIR DAS CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS GRS, MAJA E GRS E DADOS DOS SENSORES MODIS.

A primeira etapa desta pesquisa consistiu em utilizar três imagens dos satélites Sentinel-2 da região do reservatório da UHE Santo Antônio adquiridas em três períodos hidrológicos distintos, seca, enchente e cheia, para comparar os valores de reflectâncias da água após a aplicação das correções atmosféricas, GRS, MAJA e Sen2Cor. Realizou-se também a comparação com os valores das Rrs da água dos produtos do composto 8 dias MODIS. Em virtude da presença de nuvens e de diferentes resoluções espaciais, a comparação dos dados Sentinel-2/MSI x MODIS ocorreu para as datas mais próximas entre a disponibilidade das imagens em que as regiões de amostragem possibilitaram a extração de pixels puros de água. Além das comparações das diferenças entre os resultados de Rrs, foram verificadas também as diferenças nas estimativas de CSS realizadas pela aplicação de cada um dos produtos. As estimativas de CSS foram comparadas com amostras de sedimentos do rio Madeira, realizadas pela rede de monitoramento internacional SO HYBAM.

### 5.1.1 Comparação das reflectâncias a partir das correções atmosféricas MAJA, Sen2Cor e GRS em imagens Sentinel-2

Foram verificadas as respostas espectrais do sensor MSI do satélite Sentinel-2A nas bandas 4, centrada em 664.6nm, com resolução espacial de 10m e banda 8a, centrada em 864.7nm e resolução espacial de 20m. Para tanto, optou-se por trabalhar com a resolução espacial de 20 metros, conforme a resolução do produto oriundo do processamento GRS. Por isso, a banda 4 oferecida pelo processamento MAJA foi reamostrada para 20m, utilizando-se o método do pixel vizinho mais próximo através da função *raster calculator*, e padronizou-se o processamento da correção atmosférica Sen2cor para saída com a mesma resolução.

A comparação das respostas espectrais oferecidas pela banda 4 Sentinel-2/MSI (**Tabela 8**) de cada um dos processamentos de correções atmosféricas através da RMSEr mostrou que são mais semelhantes entre si os produtos das correções MAJA e Sen2Cor, quando comparados com os resultados do processamento GRS. Observando o resultado da RMSEr para as reflectâncias das imagens dos dias 28/06/2017, 19/01/2018 e 24/04/2018, processadas por cada uma das três correções, confirma-se a maior similaridade entre as reflectâncias MAJA e Sen2Cor, sendo, 1,75%, 5,68% e 3,12% respectivamente. Para a banda 4 foi constatada a maior diferença entre os produtos comparados, ocorrida em abril de 2018 entre Sen2cor e GRS (23,39%). Na data de 28/06/2017 constatou-se a maior semelhança entre todas as comparações, sendo o erro médio quadrático relativo de 1,75% entre os produtos MAJA e Sen2Cor.

No contexto geral analisado, as maiores RMSEr ocorrem quando comparados os produtos dos processamentos Sen2cor e MAJA com os produtos do processamento GRS, porém não superiores à 25%, fato possivelmente atrelado à remoção de *sunlint* pela correção GRS.

Para a banda 8a, as diferenças entre os produtos Sen2Cor e MAJA para o GRS continuam superiores 10%, acompanhando uma tendência geral, exceto para MAJA x Sen2Cor em abril de 2018, um dos meses em que os níveis do rio são os maiores. Nota-se, também na banda 8a, uma inversão da tendência de semelhança entre os produtos, já que são mais próximas os RMSEr's entre Sen2Cor e GRS (11,26%) e MAJA e GRS

(11,96%), enquanto a comparação MAJA/Sen2Cor apresenta maior RMSEr 21,98% em janeiro de 2019. Nesta banda, a absorção da luz pela água é mais intensa, o que pode aproximar os valores de MAJA e Sen2cor dos valores de GRS, reduzindo suas diferenças.

Data	RMSE'r reflectâncias (%)					
	B4			B8a		
	Sen2Cor x GRS	MAJA x GRS	MAJA x Sen2Cor	Sen2Cor x GRS	MAJA x GRS	MAJA x Sen2Cor
20170628	11,46	12,03	1,75	11,26	12,08	16,69
20180119	21,33	16,40	5,68	13,07	14,70	21,98
20180424	23,40	20,69	3,12	18,34	11,96	8,08

Tabela 8 - RMSEr's reflectâncias – RMSE (%) Reflectância região L1- com referências médias GRS e Sen2Cor

Os agrupamentos de pixels (**Figura 31**) obtidos pelos diagramas de dispersão mostram que as regiões de igarapés, representados pela cor verde, possuem menores valores de reflectância. Nestas regiões, encontram-se as águas mais escuras, com maior presença de CDOM, maior absorção e menor retroespalhamento da REM. Por outro lado, as regiões que acompanham o eixo do rio Madeira, na cor marrom, maiores valores de reflectância devido a maior presença de sedimentos suspensos, logo maior efeito de retroespalhamento da REM.

As melhores correlações quando comparadas as reflectâncias resultantes da aplicação das três diferentes correções atmosféricas em questão para as bandas 4 e 8a nas datas analisadas se deram para as reflectâncias Sen2Cor x MAJA, em correspondência com os RMSEr resultantes das comparações, porém, uma maior dispersão é observada para as reflectâncias mais altas medidas pela banda 4, acima de 3,5% (**Figura 32**). Deve ser levado em consideração que nessa região a diversidade de pixels é maior, abrangendo maior área amostral do reservatório. Essa característica se repete para as medidas entre as mesmas correções quando comparadas àquelas oferecidas pelo processamento GRS para a banda 4.

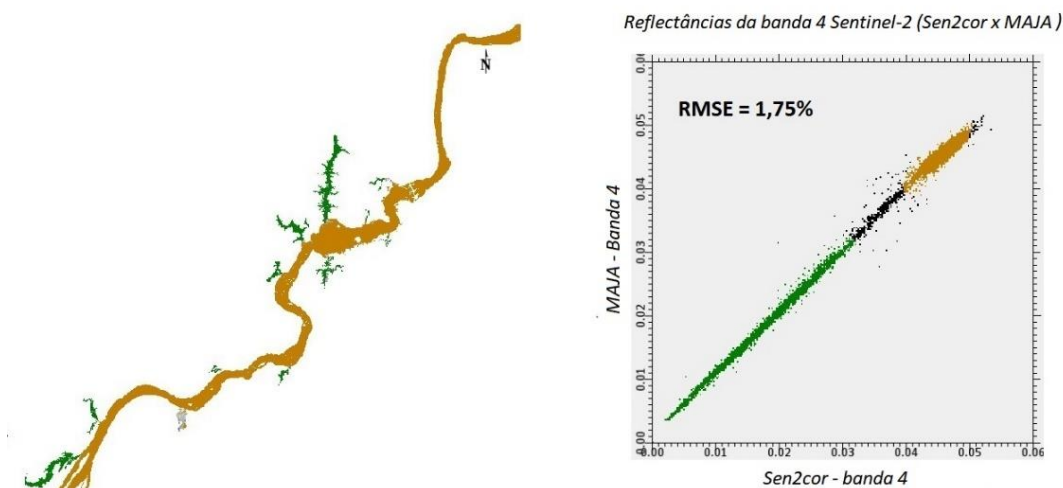


Figura 31 - Distribuição das reflectâncias da banda 4 para os produtos Sen2Cor e MAJA medidas no reservatório da usina de Santo Antônio pelo sensor MSI Sentinel-2 em 28/06/2017

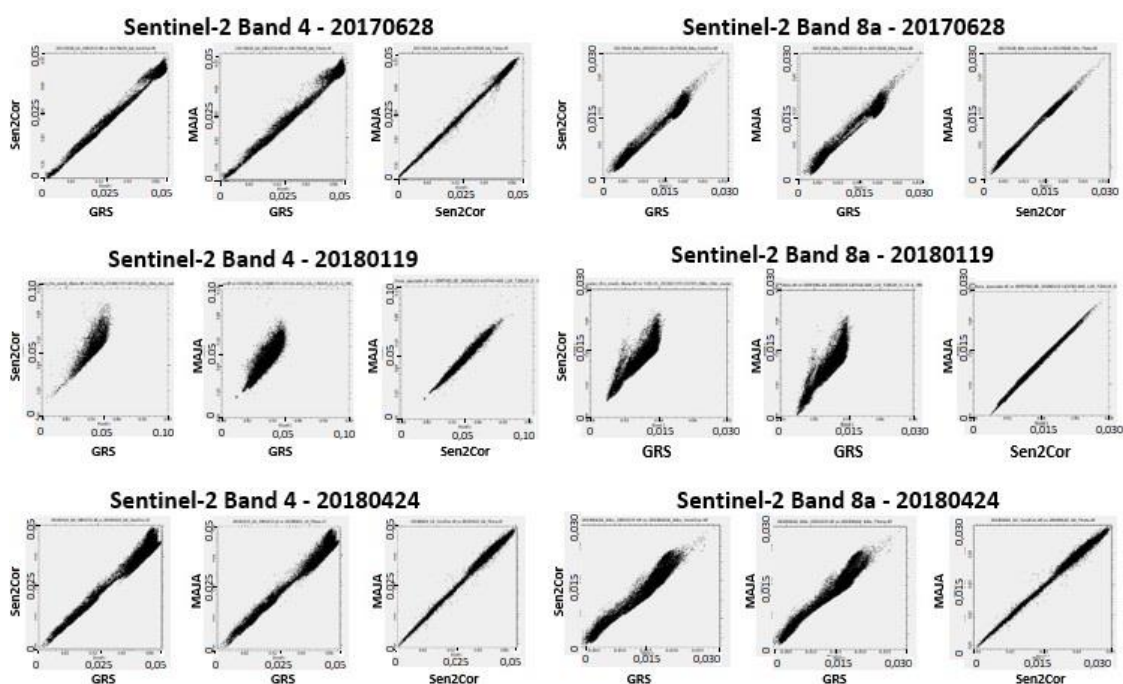


Figura 32 - Diagramas de dispersão das reflectâncias da banda 4 e 8a S-2 para as correções atmosféricas

Para a banda 8a, localizada em região espectral de maior absorção em relação à banda 4, nota-se uma redução da dispersão das reflectâncias mais altas para as mais baixas, principalmente para o mês de junho, e uma suave variação na inclinação das curvas nos diagramas de GRS x Sen2Cor e GRS x MAJA em todas as datas no intervalo

entre 0,5 e 1,5%.

Também foram comparadas as reflectâncias dos produtos Sentinel-2 estimadas após o processamento de cada uma das correções atmosféricas utilizadas nesse estudo, com aquelas medidas pelo sensor MODIS, produtos MOD09Q1 e MYD09Q1, nas datas mais próximas às passagens do satélite Sentinel-2. Neste caso, as áreas para estudo foram reduzidas às regiões amostrais denominadas M1 (Montante) e J1 (Jusante) e IGP (Igarapé) para tomadas das médias de reflectância conforme mostrado anteriormente pela **Figura 25, seção 4.2.1**. A localização das regiões de amostragem M1 e J1 se deve à maior fração de área com pixels puros de água, pela localização do barramento da UHE e pela proximidade da estação SO HYBAM de monitoramento de sedimentos.

Da comparação entre as reflectâncias reduzidas às máscaras M1, J1 e IGP, semelhante ao ocorrido quando a abordagem tratou da máscara L1, a contagem de pixels da imagem GRS na data de 19/01/2018 difere das outras duas correções, com 13.908 pixels na região amostral M1, 1.914 pixels na região amostral J1 e 3.111 pixels na região amostral IGP, enquanto os produtos Sen2Cor e MAJA somam 13.978, 1.909 e 3.114 pixels cada um, respectivamente para as mesmas regiões. Essa diferença em números de pixels amostrados não ultrapassa 0,5% do total.

As bandas do sensor MODIS utilizadas para as seguintes comparações foram as bandas do RED e do IR, centradas a 645nm e a 858,5nm, respectivamente, nas composições datadas de 26/06/2017 e 23/04/2018. Estas bandas são equivalentes do ponto de vista de região espectral às bandas 4 e 8a do Sentinel-2. Importante observar, que além das datas e resoluções espaciais, são diferentes também as larguras e centro de bandas entre os sensores destacados. Os valores médios de reflectância para cada uma delas em cada uma das regiões definidas pelas máscaras M1, J1 e IGP, bem como para os valores de reflectância das imagens Sentinel-2 nas bandas 4 e 8a segundo as correções atmosféricas aplicadas estão mostradas nas **Tabela 9**.

Quanto às diferenças apresentadas pelas reflectâncias da banda 4 Sentinel-2/MSI originadas a partir de cada correção atmosférica em relação às bandas RED do sensor MODIS, sendo estas medidas pelo resultado médio entre as reflectâncias dos produtos MOD09Q1 e MYD09Q1, constata-se que os resultados dos produtos GRS apresentam uma diferença média de 32,8%. No entanto os valores da diferença só ultrapassam 20% em janeiro de 2019 para M1 (23,3%) e J1 (60,8%) e em abril de 2018 para IGP (73,3%), inferiores às medidas MODIS. Já para os produtos MAJA e Sen2Cor apenas em abril de



2018 região IGP a diferença foi superior a 20%, respectivamente 31,3% e 28,9% subestimados em relação às medidas MODIS.

Contudo, olhados os resultados médios de reflectância, constata-se que os produtos da correção GRS resultam em valores inferiores aos das demais, na maioria dos casos, indicando novamente sua potencialidade para a remoção de sinal oriundo do efeito *sunlint*.

Observando as diferenças apresentadas pela banda 8a Sentinel-2/MSI em relação à banda IR do sensor MODIS verifica-se uma forte incoerência dos resultados em relação aos da banda 4 já que apenas em M1 se obteve diferenças inferiores a 20% para junho de 2017 e abril de 2018, e em janeiro de 2019 apenas o produto Sen2Cor resultou em valores semelhantes àqueles dos produtos MODIS. Foram constatadas diferenças com valores abruptos na região do infra-vermelho próximo entre as reflectâncias destes produtos, chegando em alguns casos a alcançar diferenças entre 500 e 1.000%. Na maioria dos casos os valores de reflectância dos produtos Sentinel-2 com as correções atmosféricas aplicadas ficaram subestimados em relação aos valores de reflectância MODIS.

Quando observados os resultados da banda 4 Sentinel-2, nas regiões M1 e J1 os valores de reflectância MAJA são os maiores entre os três produtos Sentinel-2 em junho, mas em abril os maiores valores de reflectância Sentinel-2 são os resultantes do processamento Sen2Cor. Na região IGP os valores de reflectância Sentinel-2 do processamento Sen2Cor são os maiores para ambas as datas. Os resultados de reflectância pela correção GRS são sempre menores (SANTOS, D, et. al, 2020).

Reflectância média MODIS x SENTINEL-2						
bRED / b4						
MONTANTE - M1						
Data / Produto	MODIS		S2-GRS	SENTINEL-2		
	MOD09Q1	MYD09Q1		S2-MAJA	S2-Sen2Cor	
20170626/20170628	0,042	0,043	0,043	0,047	0,046	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,042		1,2%	9,0%	8,0%	
20180117/20180119	0,059	0,049	0,044	0,052	0,055	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,054		-23,3%	-2,5%	2,0%	
20180423/20180424	0,037	0,036	0,035	0,040	0,040	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,037		-6,3%	7,9%	7,7%	
JUSANTE - J1						
Data / Produto	MODIS		S2-GRS	SENTINEL-2		
	MOD09Q1	MYD09Q1		S2-MAJA	S2-Sen2Cor	
20170626/20170628	0,039	0,041	0,041	0,046	0,046	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,040		3,5%	13,0%	12,6%	
20180117/20180119	0,064	0,000	0,040	0,056	0,059	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,064		-60,8%	-13,7%	-9,6%	
20180423/20180424	0,043	0,035	0,032	0,040	0,040	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,039		-19,2%	2,9%	2,9%	
Igarapé - IGP						
Data / Produto	MODIS		S2-GRS	SENTINEL-2		
	MOD09Q1	MYD09Q1		S2-MAJA	S2-Sen2Cor	
20170626/20170628	0,024	0,023	0,023	0,026	0,026	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,023		-2,7%	8,0%	9,5%	
20180117/20180119	0,046	0,000	0,046	0,054	0,057	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,046		0,8%	15,3%	19,5%	
20180423/20180424	0,038	0,023	0,018	0,023	0,024	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,031		-73,3%	-31,3%	-28,9%	

Tabela 9 - Reflectâncias médias nas regiões amostrais M1, J1 e IGP – banda 4

BIR / b8a						
MONTANTE - M1						
Data / Produto	MODIS		S2-GRS	SENTINEL-2		
	MOD09Q1	MYD09Q1		S2-MAJA	S2-Sen2Cor	
20170626/20170628	0,019	0,020	0,019	0,019	0,021	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,019		-3,3%	-3,0%	7,5%	
20180117/20180119	0,056	0,040	0,034	0,038	0,042	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,048		-38,2%	-24,3%	-12,3%	
20180423/20180424	0,018	0,018	0,017	0,019	0,020	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,018		-7,7%	2,9%	11,5%	
JUSANTE - J1						
Data / Produto	MODIS		S2-GRS	SENTINEL-2		
	MOD09Q1	MYD09Q1		S2-MAJA	S2-Sen2Cor	
20170626/20170628	0,026	0,026	0,019	0,016	0,020	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,026		-36,3%	-60,2%	-29,4%	
20180117/20180119	0,073	0,000	0,035	0,041	0,046	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,073		-106,6%	-77,1%	-59,2%	
20180423/20180424	0,043	0,025	0,020	0,023	0,022	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,034		-70,1%	-46,7%	-56,9%	
Igarapé - IGP						
Data / Produto	MODIS		S2-GRS	SENTINEL-2		
	MOD09Q1	MYD09Q1		S2-MAJA	S2-Sen2Cor	
20170626/20170628	0,017	0,014	0,005	0,001	0,006	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,016		-201,4%	-991,1%	-183,7%	
20180117/20180119	0,049	0,000	0,018	0,013	0,021	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,049		-166,1%	-268,9%	-130,0%	
20180423/20180424	0,047	0,018	0,005	0,005	0,004	
	média (MOD09Q1 + MYD09Q1)			Diferença MODIS-S2 (%)		
	0,033		-606,8%	-513,8%	-694,2%	

Tabela 10 - Reflectâncias médias nas regiões amostrais M1, J1 e IGP – banda 8a

### 5.1.2 Comparação das estimativas de CSS por imagens Sentinel-2 com as correções atmosféricas MAJA, Sen2Cor e GRS

Foram estimadas as CSS's (**Tabela 11**) em cada uma das regiões amostrais a partir dos dados de reflectância Sentinel-2 de cada um dos produtos de correção atmosférica através da aplicação das **Eq. (2) e (3)**, desenvolvidas especificamente para os dados de cada sensor e produzidos mapas (**Figura 33**) a partir de um recorte da máscara de nuvens do produto MAJA abrangendo a maior área possível conforme a região denominada L1. Posteriormente as estimativas de CSS foram comparadas entre si e cada uma comparada com as concentrações de sedimentos em suspensão obtidas pela estação *in situ* de monitoramento do SO HYBAM, localizada 5 quilômetros a jusante da UHE Santo Antônio, nas datas que mais se aproximaram das passagens dos satélites Sentinel-2 e da imagem com melhor nível de qualidade para tomada de reflectância da superfície da água da composição 8-dias MODIS.

A rede de monitoramento SO HYBAM oferece série histórica com medidas a cada 10 dias que mostram a variação das concentrações de sedimentos medidos pela estação 15400000, conforme **Figura 34**.

Montante - M1							
Data	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor	Data	MODIS	Data	HYBAM
20170628	191,1	163,7	206,6	20170626	104,1	20170623	378,0
20180119	598,1	513,6	572,4	20180117	714,8	20180120	723,2
20180424	228,5	211,8	254,7	20180423	124,2	20180420	145,4
Jusante - J1							
Data	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor	Data	MODIS	Data	HYBAM
20170628	206,5	123,3	188,4	20170626	282,7	20170623	378,0
20180119	745,4	512,2	586,8	20180117	1488,9	20180120	723,2
20180424	365,5	326,8	286,5	20180423	690,4	20180420	145,4
Concentração média M1 J1							
Data	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor	Data	MODIS	Data	HYBAM
20170628	198,8	143,5	197,5	20170626	193,4	20170623	378,0
20180119	671,8	512,9	579,6	20180117	1101,8	20180120	723,2
20180424	297,0	269,3	270,6	20180423	407,3	20180420	145,4

Tabela 11 - Estimativas de concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) por correção atmosférica x estação SO HYBAM

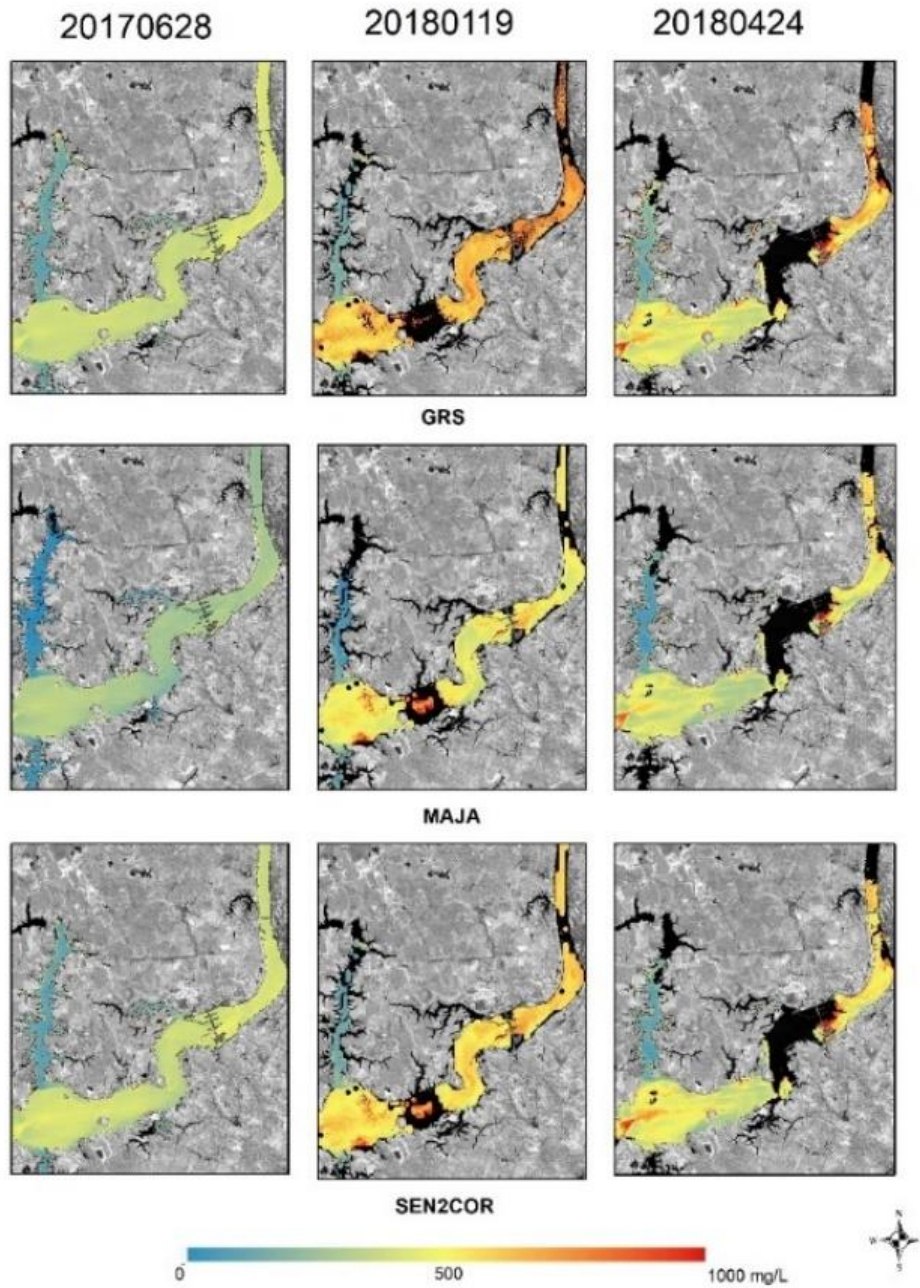


Figura 33 - Mapas de CSS em diferentes datas na região L1 a partir de dados Sentinel-2 com a utilização de produtos de três diferentes correções atmosféricas

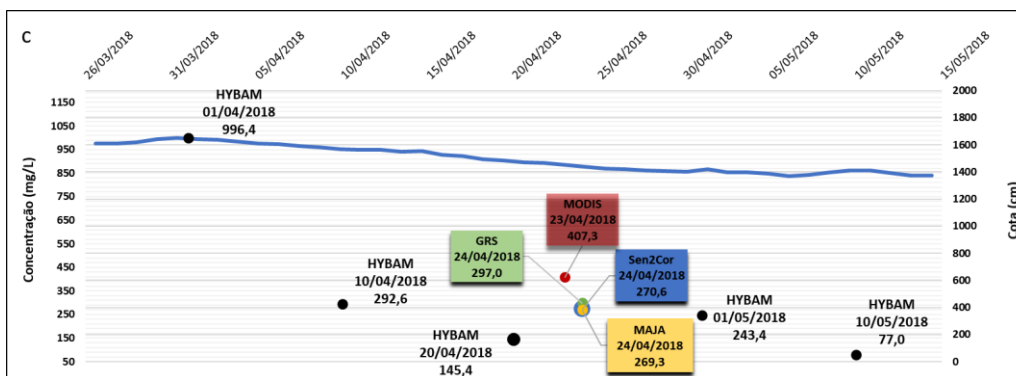
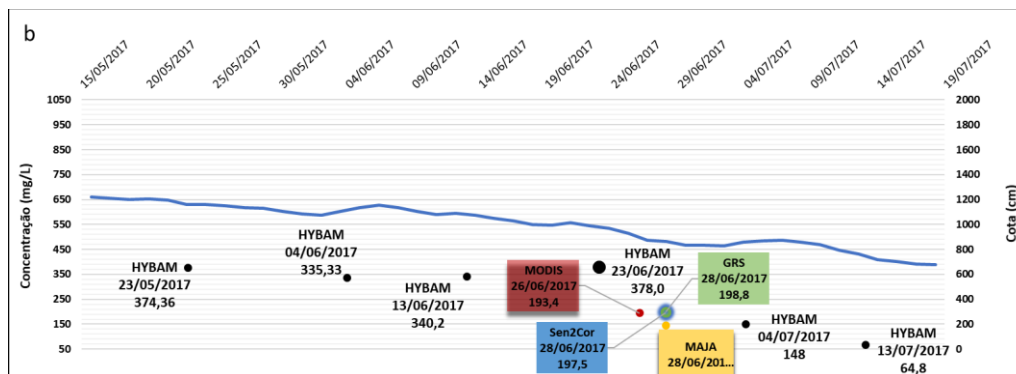
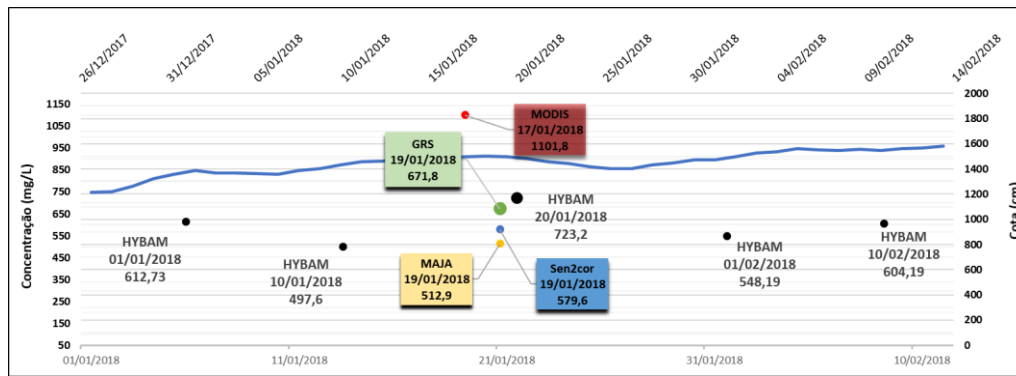


Figura 34 - Estimativas de CSS por satélite x medidas in situ SO HYBAM – a) CSS entre maio e julho 2017. b) CSS entre janeiro e fevereiro de 2018. c) CSS entre abril e maio de 2018

As estimativas de CSS com os resultados mais próximos aos medidos pela estação de monitoramento SO HYBAM 15400000, segundo os dados Sentinel-2, considerando a média M1 J1 ocorreram quando o cálculo utilizou a correção atmosférica GRS, em média 27,3% de diferença da medida SO HYBAM, exceto para o mês de abril, em que todos os valores estimados por satélite superaram aqueles medidos pelas amostras da estação de monitoramento. Deve-se levar em consideração a defasagem temporal entre a medida *in situ* e a passagem do satélite Sentinel-2, além da modificação do regime hidrossedimentar do rio Madeira em função da época do ano, principalmente entre março e abril, meses em que ocorrem os picos das cheias (Villar et. al. 2013), e que no período entre dezembro e

abril de 2018 apresentou variações irregulares no intervalo de 10 dias a cada coleta.

Uma comparação dos resultados das estimativas por cada um dos produtos de satélites entre si, mostra que os melhores resultados ocorreram para a estação M1 em janeiro de 2018, quando a diferença foi de 19,5%, com a estimativa a partir do produto GRS ficando subestimada em relação à estimativa feita com produtos MODIS, e a média M1 J1 em junho de 2017, que apresentou apenas 2,1% de diferença (**Tabela 12**).

	Montante - M1			Jusante - J1			Média M1-J1		
	HYBAM x MODIS								
20170623/20170626	72,5%			25,2%			48,8%		
20180120/20180117	1,2%			-105,9%			-52,4%		
20180420/20180423	14,6%			-374,8%			-180,1%		
	HYBAM x Sentinel-2 por correção atmosférica								
	Montante - M1			Jusante - J1			Média M1-J1		
	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor
20170623/20170628	49,4%	56,7%	45,4%	45,4%	67,4%	50,2%	47,4%	62,0%	47,8%
20180120/20180119	17,3%	29,0%	20,8%	-3,1%	29,2%	18,9%	7,1%	29,1%	19,9%
20180420/20180424	-57,2%	-45,6%	-75,2%	-151,4%	-124,8%	-97,1%	-104,3%	-85,2%	-86,1%
	Sentinel-2 por correção atmosférica x MODIS								
	Montante - M1			Jusante - J1			Média M1-J1		
	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor	S2-GRS	S2-MAJA	S2-Sen2Cor
20170626/20170628	45,5%	36,4%	49,6%	-36,9%	-129,3%	-50,0%	2,7%	-34,8%	2,1%
20180117/20180119	-19,5%	-39,2%	-24,9%	-99,7%	-190,7%	-153,7%	-64,0%	-114,8%	-90,1%
20180423/20180424	45,6%	41,3%	51,2%	-88,9%	-111,3%	-141,0%	-37,1%	-51,3%	-50,5%

Tabela 12 - Diferenças entre as estimativas de CSS x medidas SO HYBAM

## 5.2 MAPEAMENTO E ESTIMATIVAS DA CSS NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DA UHE JIRAU

A segunda etapa da pesquisa consistiu em realizar o mapeamento das CSS's na região do reservatório da UHE Jirau com a utilização dos produtos atmosféricamente corrigidos pela correção atmosférica GRS. Os resultados que serão apresentados a seguir referem-se à síntese e interpretação dos dados e informações que subsidiaram a pesquisa e às estimativas de CSS realizadas pelo autor no âmbito do Projeto SPECTROSED, a partir do processamento da série temporal de imagens de satélite entre abril de 2016 e abril de 2021.

### 5.2.1 Relação entre vazão x CSS estimada por satélite x CSS medida in situ

A **Figura 35** ilustra as relações entre as medidas e estimativas de descargas líquidas e sólidas no reservatório e estimativas de CSS realizadas através das imagens de satélites, medidas da CSS realizadas *in situ* pela ESBR (N=56) e a vazão média anual entre 2016 e 2020 com dados diários na estação Porto R4. O número de medidas de CSS realizadas na estação pela ESBR é inferior às estimativas por satélite na seção Jirau (N=111), já que ocorreram uma vez a cada mês, quando possível, a partir de abril de 2016, enquanto as imagens de satélite são disponibilizadas a cada cinco dias e as estimativas realizadas quando da não ocorrência de cobertura por nuvens sobre a região amostrada. As estimativas por satélite, quando realizadas para datas coincidentes com as datas de medição *in situ* mostraram-se consistentes com os resultados obtidos na estação, embora apenas quatro medições coincidiram com passagem de satélite na mesma data. Ressalta-se que para a medição de sedimento em suspensão na estação é utilizado o método de amostragem por integração na vertical por igual incremento de descarga que permite determinar a concentração média de forma mais representativa para a seção amostrada e que é, portanto, esperado que o resultado da medida *in situ* seja um pouco superior à medida de superfície estimada através das imagens de satélite.

O conjunto de dados que apresenta os resultados de CSS mostra que os maiores valores resultantes das medidas e estimativas se concentram-se entre dezembro e março, justamente nos períodos de enchente e cheia, quando se dá o incremento de vazão. Observa-se, junto aos períodos de vazante e seca a diminuição das CSS's. No período de seca, pode-se perceber que alguns resultados de CSS's não acompanharam o declínio da vazão sendo observadas cargas de sedimentos em suspensão com valores semelhantes àqueles dos períodos de enchente e cheia. Acredita-se, como descrito anteriormente, que essas estimativas com valores elevados de sedimentos suspensos no período de seca possam estar relacionadas com os processos erosivos de bordas ou atividades antrópicas como a prática de dragagem que levanta o sedimento de fundo, comumente observada na região, ou falhas na detecção de artefatos atmosféricos quando dos processamentos das imagens, principalmente por se tratar de uma época do ano com maior ocorrência de queimadas na região.

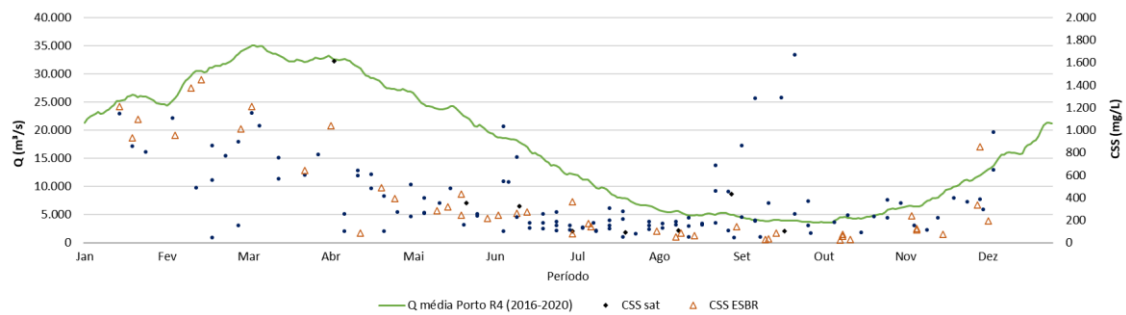


Figura 35 - Gráfico Vazão média 2016-2020 x CSS estimada por satélite x CSS medida in situ

## 5.2.2 Análises espaço-temporais das CSS's estimadas através de imagens de satélite no período 2016-2021 desde a região de Abunã até barragem da UHE Jirau

As análises espaço-temporais foram elaboradas a partir dos resultados obtidos através dos mapeamentos realizados a partir das imagens de satélite processadas nesta pesquisa. Os mapeamentos foram realizados para cada data disponível e detalham a CSS em todas as porções de pixels puros de água identificados pela máscara de água utilizada pelo processamento GRS. Com o conjunto de mapas de cada uma das datas, foram elaborados os mapeamentos das estatísticas de pixels sobrepostos, resultando nos mapeamentos espaço-temporais. As estimativas de CSS por imagens de satélite em séries temporais permitem fazer observações e analisar como foi a variação sazonal em cada período da série amostrada. Dessa forma, nas seções subsequentes, serão apresentadas as análises da dinâmica hidrossedimentar de todo o período analisado. A análise global considera todo o conjunto de imagens processadas retratando o comportamento no período 2016-2021 como um todo. Na sequência, as análises interanuais e anuais em relação à sazonalidade e ao regime hidrológico da região do reservatório da UHE.



### 5.2.2.1 Análise da variação global da CSS do período 2016-2021

No período analisado observa-se que a CSS apresentou consideráveis diferenças quando separadas a cada ano, com a maior diferença para as ocorrências de sedimentos suspensos no reservatório acontecendo entre 2016 e 2021. No ano de 2021, até a região do reservatório localizada nas proximidades da seção Velha Mutum, à aproximadamente 58Km a montante da barragem da usina, as medianas de CSS se apresentaram sempre acima de  $550\text{mg.l}^{-1}$  e geralmente estiveram entre 650 e  $750\text{mg.l}^{-1}$  passando a oscilar entre os 450 e  $550\text{mg.l}^{-1}$  a partir da região de Palmeiral localizada à aproximadamente 48Km da usina prevalecendo até aproximadamente 55Km a jusante da barragem. O ano de 2016, segundo os resultados das estimativas por imagens de satélites, foi o ano com a menor presença de sedimentos em suspensão no reservatório, com apenas dois picos acima dos  $250\text{mg.l}^{-1}$ , ocorridos a 173 e a 148km de distância do barramento. O ano de 2017 apresentou uma curva semelhante à do ano de 2021, embora com valores medianos de CSS menores, geralmente entre 450 e  $250\text{mg.l}^{-1}$  ao longo de todo o reservatório, exceto para o pico ( $576\text{mg.l}^{-1}$ ) ocorrido a aproximadamente 93Km do barramento, na região da seção Paredão. Os anos de 2018, 2019 e 2020 mostraram resultados que oscilaram entre 390 e  $148\text{mg.l}^{-1}$  ao longo do reservatório. Detalhe para os três picos de sedimentos na região da seção Paredão (**Figura 36**). Para esta análise é importante considerar que, do conjunto de imagens da série histórica (**Figura 37**), os anos de 2016 e 2021 foram os que apresentaram menor quantidade de imagens disponíveis. O ano de 2021 foi analisado com imagens que se concentraram em abril, no período de cheia, fato que pode ter resultado na curva com as concentrações mais acentuadas do período. Ao contrário, o ano de 2016 contou com 5 imagens a mais que 2021, com melhor distribuição entre elas ao longo do ano, no entanto se concentraram em sua maior parte entre os períodos de vazante e seca, onde historicamente se constata a menor presença de sedimentos suspensos na calha fluvial, o que pode ter resultado em uma curva com as menores concentrações. A maior quantidade de imagens disponíveis se concentra entre os anos de 2017 e 2020 oferecendo melhor representatividade para os períodos interanuais. Observa-se também que a maior disponibilidade de pixels puros de água das imagens ocorre nos períodos anuais com menor ocorrência de nuvens na região (**Tabela 6, Seção 4.4 e Figura 37**). Na **Figura 38**

são apresentados os mapas resultantes das estimativas de CSS através dos processamentos das imagens dos anos 2017, 2018, 2019 e 2020.

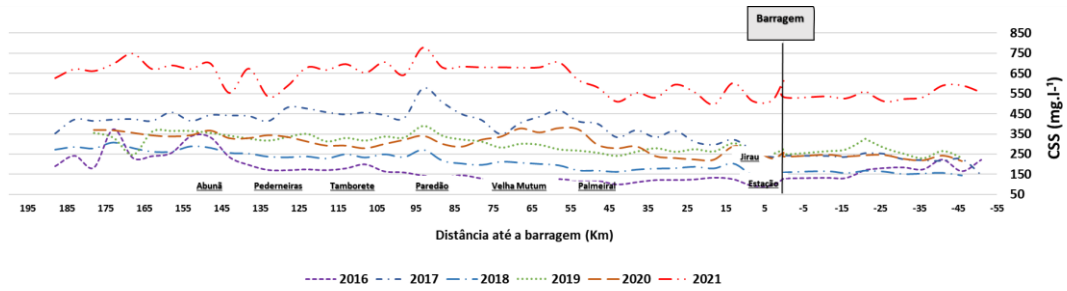


Figura 36 - Variação anual da CSS estimada através de imagens de satélite ao longo do reservatório entre 2016 e 2021 \*Valores negativos representam as regiões a jusante do barramento da UHE – \*O ano de 2021 contempla imagens apenas de janeiro e de abril.

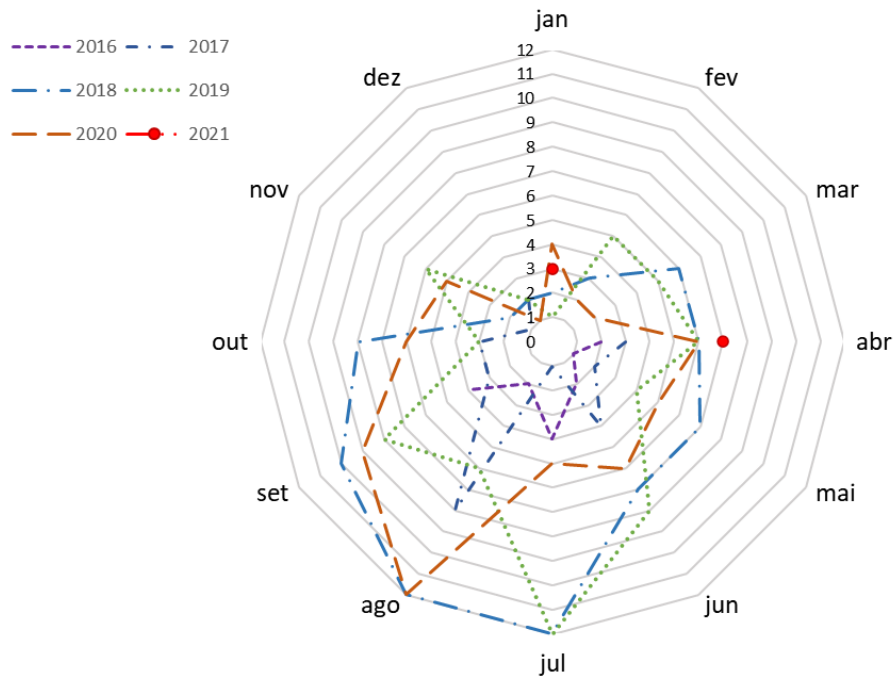


Figura 37 - Distribuição do conjunto de imagens da série temporal 2016 – 2021

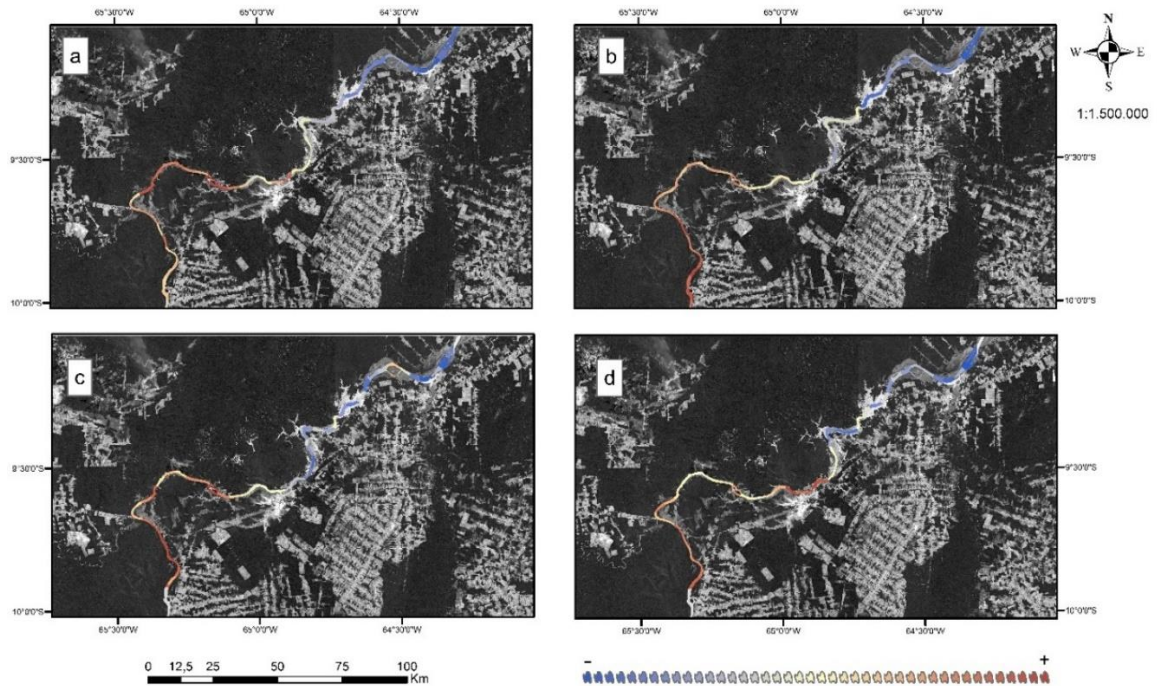


Figura 38 - Mapeamento anual das CSS's medianas da região do reservatório da UHE Jirau – a) 2017 - b)2018 - c)2019 - d)2020 – Elaborado pelo autor

### 5.2.2.2 Análises da variação global da CSS dos períodos hidrológicos no intervalo 2016-2021

Como descrito na seção 5.1, a dinâmica hidrossedimentar é influenciada pela sazonalidade. Para um detalhamento mais robusto sobre o comportamento das CSS's estimadas com imagens de satélite no desenvolvimento desta pesquisa, foram realizadas amostragens delimitadas por cada um dos períodos hidrológicos definidos na região do reservatório da UHE Jirau. A seguir, observações acerca dos quatro períodos sazonais entre os anos 2016 e 2021, quando da disponibilidade de dados de cada um dos períodos.

#### 5.2.2.2.1 *Análise da variação global da CSS nos períodos hidrológicos da série de imagens 2016-2021*

O levantamento dos dados de vazão (**Figura 17, seção 4.1.3.2**) do trecho do reservatório pesquisado possibilitou compreender as variações entre as descargas que definem o regime hidrológico do rio Madeira, desde a confluência entre os rios Beni e Mamoré até a região da barragem da UHE Jirau. O período de enchente começa com a subida das águas a partir de novembro, após terem abaixado ao seu volume mínimo em outubro. De novembro a janeiro, a vazão média do trecho no período pesquisado sobe de cerca de  $10.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  até cerca de  $20.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , passando ao período de cheia, a partir de fevereiro, com vazões atingindo em média  $36.500\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , com seus picos ocorrendo entre março e abril. O período de cheia é influenciado pelas altas precipitações que ocorrem na região Amazônica e sob a zona do sistema Alta da Bolívia, de onde é originada grande parcela da carga sedimentar do rio Madeira. O pico das cheias no trecho da pesquisa apresenta um lapso em relação à maior parte da precipitação da região Amazônica que ocorre entre dezembro e fevereiro com um deslocamento no sentido SE/NO, como visto anteriormente. Entre os meses de abril e maio as vazões médias regridem caindo dos  $20.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  até cerca de  $10.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , configurando o período de vazante, que se estende até o final de julho. O período de seca se inicia em agosto, quando as vazões abaixam de  $5.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  e atingem as mínimas observadas no período, girando em torno de  $2.000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ .

Através das observações das estimativas das medianas de CSS, considerando o conjunto de dados entre 2016 e 2021, foi possível observar que a variabilidade da carga sedimentar em suspensão presente na região do reservatório da UHE se relaciona com o regime hidrológico do rio Madeira. A **Figura 39** mostra que o período de vazante foi o que apresentou a menor variação da CSS e os menores valores estimados dentre os períodos do regime hidrológico. A distribuição da carga sedimentar em suspensão para o período de vazante é mais homogênea, mas é possível observar que a CSS decresceu em  $100\text{mg}.\text{l}^{-1}$  (40%) da região da formação do rio Madeira para a região do barramento da hidrelétrica. O período de vazante ocorre após a redução do fluxo das correntes das águas da cheia, quando provavelmente, com a perda da força para ressuspender os sedimentos,

ocorre a estabilização e a tendência para o depósito das partículas no fundo da calha fluvial. A CSS observada a jusante da barragem no período de seca equivale à do período de vazante até o limite da região mapeada. O período de seca se apresentou com carga de sedimentos em suspensão acima da CSS do período de vazante a montante do barramento. Na região localizada a aproximadamente a 5Km a montante da seção Abunã a CSS observada foi próxima a  $350\text{mg.l}^{-1}$  decrescendo a jusante até a região da seção Paredão, onde observa-se novamente cargas sedimentares próximas à  $350\text{mg.l}^{-1}$ , indicando a ressuspensão de sedimentos na região. A partir da região da seção Paredão em direção à barragem da UHE as CSS's diminuem e se equivalem às cargas sedimentares estimadas para o período da vazante, em torno de  $150\text{mg.l}^{-1}$  a jusante da barragem. Possivelmente, com a redução do nível das águas os sedimentos em suspensão presentes no rio possam advir de processos erosivos marginais (**Figura 40**), ou pela presença de dragas que levantam os sedimentos do fundo do rio (**Figura 41**). Na enchente os valores estimados de CSS aumentam consideravelmente em relação aos períodos de seca e principalmente o de vazante, com diferenças em torno de 250 a  $350\text{mg.l}^{-1}$ . Até a região de Palmeiral, no período de enchente, os valores de CSS oscilaram entre 450 e  $550\text{mg.l}^{-1}$  quando sofrem uma redução que atinge o menor valor de CSS para o período ( $368\text{mg.l}^{-1}$ ) a cerca de 23Km a montante do reservatório.

O período de cheia atinge as maiores CSS com diferenças estimadas em relação ao período de seca em até  $500\text{mg.l}^{-1}$  observados na região do barramento da UHE, embora tenha apresentado valores semelhantes aos do período de enchente em algumas partes do reservatório. No período de cheia foram observados os maiores valores de CSS, até a região da seção Paredão, giraram em torno de  $550\text{mg.l}^{-1}$ . Para aquela região observou-se um pico que atingiu as maiores estimativas de CSS para toda a série temporal, atingindo o valor de  $680\text{mg.l}^{-1}$ .

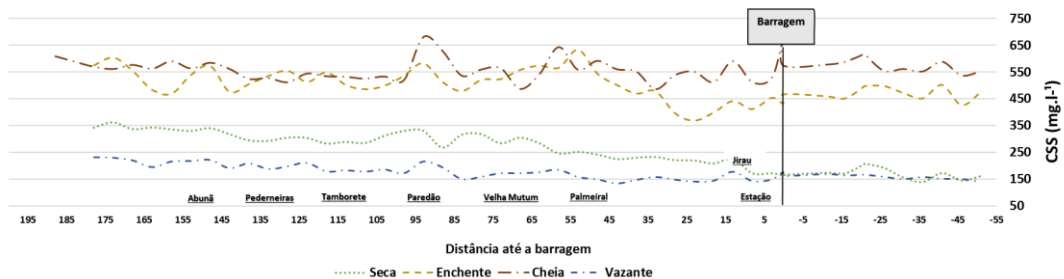


Figura 39 - Variação da carga sedimentar estimada por satélite ao longo da região do reservatório da UHE Jirau entre 2016 e 2021 por período hidrológico



Figura 40 - Régua para amostragem do nível da água no início do período de seca e processos erosivos marginais – Elaborada pelo autor



Figura 41 - Draga para garimpo no rio Madeira na região da seção Abunã – Elaborada pelo autor

#### 5.2.2.2.2 *Análise da variação da CSS interanual por períodos hidrológicos da série de imagens 2016-2021*

Observando a variação da CSS em relação a cada um dos meses que compõem os períodos hidrológicos do rio Madeira no trecho do reservatório da UHE, nota-se que no período de vazante, o mês de maio apresentou as maiores CSS's estimadas ficando com valores sempre superiores aos dos meses de junho e julho. Essa alta carga sedimentar suspensa observada no mês de maio em relação a junho e julho, pode ser ter sido influência pelos sedimentos que ainda se encontram suspensos após o período de cheia. O mês de junho apresentou valores de CSS mais próximos àqueles medidos em julho, indicando que a variação da carga sedimentar suspensa já não sofre tanta influência do período de cheia, permitindo caracterizar o período em duas épocas distintas bem definidas, com o limiar em  $250\text{mg.l}^{-1}$  até a região próxima à seção Palmeiral, local a partir de onde a CSS's ficaram sempre abaixo deste valor e as diferenças entre os três meses do período foram reduzidas. É possível observar que a CSS decresce conforme o período hidrológico avança, atingindo em julho, mês que precede o período de seca, as menores CSS's do período de vazante (**Figura 42**).

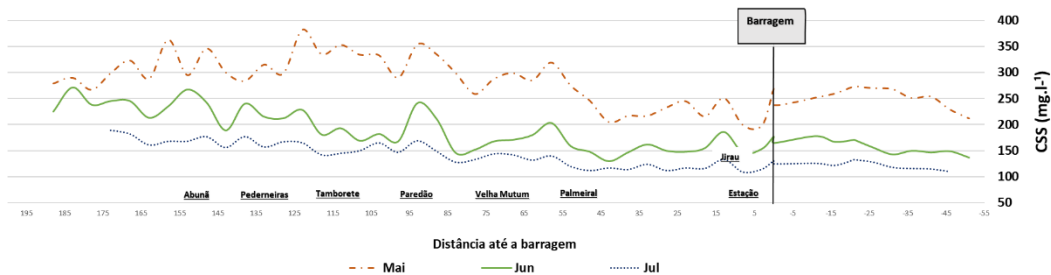


Figura 42 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de vazante

No início do período de seca, em agosto, ocorreram as menores cargas de sedimentos suspensos e observou-se a partir das estimativas que, na medida em que a vazão diminui, os sedimentos se levantam. Em grande parte do trecho do reservatório a CSS estimada para os meses de agosto entre 2016 e 2021 fica abaixo dos  $300\text{mg.l}^{-1}$ . Até o barramento, em grande parte do trecho, este valor fica abaixo dos valores mínimos dos meses de setembro e outubro (**Figura 43**).

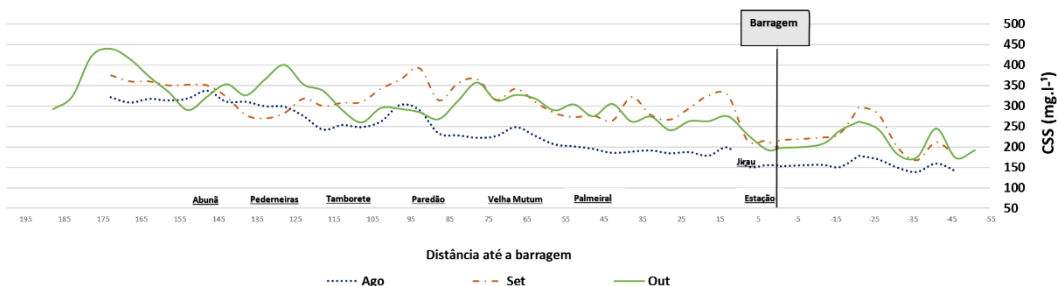


Figura 43 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de seca

Com a mudança do período hidrológico, acarretado pelo aumento das vazões a partir de novembro, após o fim do período de seca e início das precipitações na região Amazônica, nota-se que as CSS's abaixo dos  $350\text{mg.l}^{-1}$  ocorrem apenas em novembro e a partir da região próxima à estação Palmeiral, aproximadamente à 48Km do barramento da UHE. Neste período, o fluxo e o volume das águas, embora ainda não tenha atingido o seu maior nível, já se mostra suficiente para influenciar na ressuspensão e transporte dos sedimentos. A montante da região da seção Palmeiral, as estimativas de CSS ficaram em grande parte do trecho acima dos  $550\text{mg.l}^{-1}$  e no mês de janeiro, nas regiões próximas às seções Abunã, Tamborete e Paredão, ultrapassaram  $850\text{mg.l}^{-1}$ . A CSS mínima a montante do barramento da usina ocorreu em novembro na região da seção Jirau e seu

valor foi de 289mg.l<sup>-1</sup> (**Figura 44**).

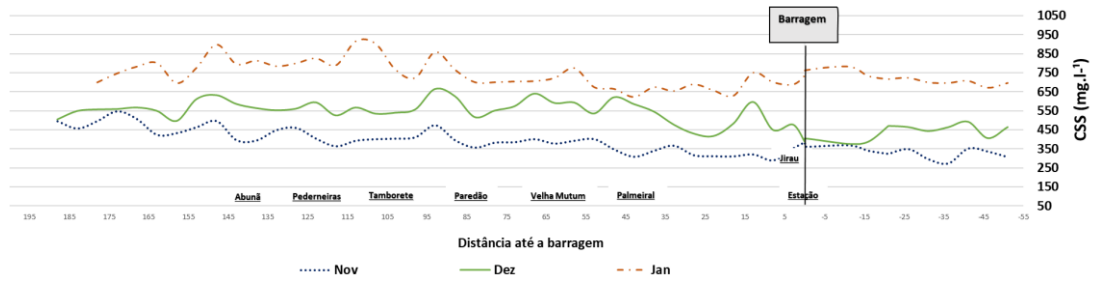


Figura 44 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de enchente

O período de cheia, caracterizado como o de mais altas concentrações de sedimentos em suspensão, teve seu valor mínimo a montante da barragem da usina observado em março, com uma estimativa de carga de sedimentos em suspensão de 445mg.l<sup>-1</sup> próxima a região da seção Palmeiral. Os meses de março e abril apresentaram valores de CSS semelhantes, com algumas alternâncias a montante da região Palmeiral, quando a jusante a concentração de março passa a permanecer acima da CSS de abril, até alcançar o barramento. Fevereiro foi o mês que apresentou as maiores CSS's do período em todas as regiões do reservatório atingindo a máxima concentração estimada em 1.037mg.l<sup>-1</sup> (**Figura 45**). Assim como no período de vazante, no período de cheia a força e o volume das águas oriundas das precipitações ocorridas na região Amazônica e na Cordilheira dos Andes abastecem o rio Madeira com alta carga sedimentar transportada através de sua bacia, como pode ser observado através das curvas que representam as estimativas de CSS para o reservatório da UHE Jirau.

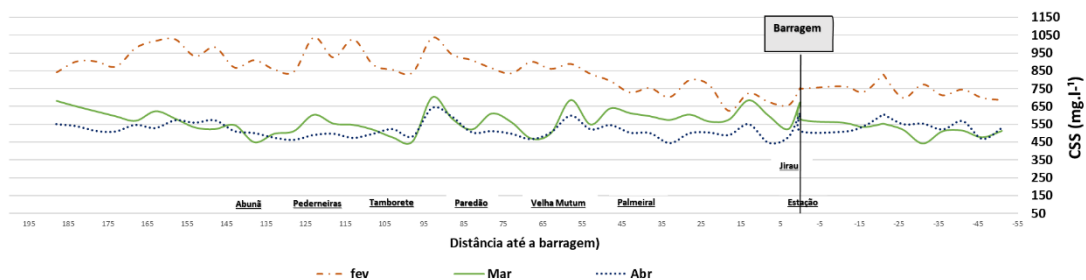


Figura 45 - Variação da CSS estimada por satélite na região do reservatório da UHE Jirau nos meses do período de cheia



#### 5.2.2.2.3 *Análise da variação da CSS anual por períodos hidrológicos da série de imagens 2016-2021*

O conjunto de dados processados para a aquisição das estimativas de CSS contempla imagens datadas a partir de abril de 2016 indo até abril de 2021, e, deste conjunto, no ano de 2016, além das imagens anteriores a abril, não foi possível obter imagens de novembro e dezembro. Por conta dessa escassez de dados no intervalo citado, não foi possível realizar a completa amostragem dos períodos hidrológicos de enchente nos anos 2015/2016 e 2016/2017 e dos períodos de vazante e seca do ano de 2021. No entanto, o fato de falta de imagens em determinadas datas não impede a amostragem da variabilidade sazonal em cada um dos anos com os dados disponíveis. As análises globais, descritas anteriormente são o resultado composto da análise segmentada pelos períodos hidrológicos em cada ano da série histórica, descrita a seguir.

Analisando os resultados da amostragem anual dos períodos hidrológicos (**Figura 46**), nota-se que, de 2016 a 2021 o período de cheia se apresentou como o período que prevalece ao longo do reservatório com a maior carga de sedimentos suspensos na região do reservatório da UHE, em média entre  $439\text{mg.l}^{-1}$  (2019) e  $628\text{mg.l}^{-1}$  (2018). Este cenário só não ocorreu no ano de 2019, ano em que a CSS média ao longo da região do reservatório na enchente foi de  $558\text{mg.l}^{-1}$  e apenas nas proximidades do barramento o período de cheia mostrou CSS's mais elevadas que o período de enchente. Embora o período de cheia tenha se apresentado com maiores valores medianos de CSS's nos anos analisados, as máximas concentrações identificadas ocorreram no período de enchente, atingindo  $1.454\text{mg.l}^{-1}$  a aproximadamente 188Km da barragem da usina no ano de 2019 e no mesmo ano,  $1.160\text{mg.l}^{-1}$  a 158Km da barragem da UHE. Olhando as curvas de vazão (**Figura 17, seção 4.1.3.2**) é possível averiguar que a enchente 2018/2019 foi maior que nos outros anos do intervalo, sugerindo que as máximas CSS ocorridas em 2019 estão relacionadas ao volume e à força das águas deste período. As CSS's médias no período de cheia ficaram entre  $439\text{mg.l}^{-1}$  em 2019 e  $703\text{mg.l}^{-1}$  em 2016, as mínimas entre  $45\text{mg.l}^{-1}$  em 2017 e  $615\text{mg.l}^{-1}$  em 2016 e as máximas entre  $588\text{mg.l}^{-1}$  em 2021 e  $915\text{mg.l}^{-1}$  em 2016. As estimativas para o período de enchente ficaram em média, entre  $396\text{mg.l}^{-1}$  na estação 2020/2021 e  $599\text{mg.l}^{-1}$  na estação 2017/2018, com mínimas entre 305 na estação

2018/2019 e  $423\text{mg.l}^{-1}$  em 2017/2018 com máximas entre  $588\text{mg.l}^{-1}$  em 2020/2021 e  $1.454\text{mg.l}^{-1}$  em 2018/2019.

Em relação aos períodos com as menores cargas sedimentares em suspensão, o período de vazante prevaleceu como o período que apresentou as menores estimativas de CSS a partir de 2018, com médias entre  $129\text{mg.l}^{-1}$  e  $221\text{mg.l}^{-1}$ . Em 2016 os valores de CSS do período de vazante foram semelhantes aos da seca e giraram em torno de  $155\text{mg.l}^{-1}$ . O ano de 2017 foi o único do intervalo em que as concentrações na vazante foram superiores às CSS's estimadas na seca. Neste ano, a máxima concentração estimada foi de  $332\text{mg.l}^{-1}$ , a montante da barragem da UHE, nas proximidades da região da seção Paredão, abaixando para cerca de  $140\text{mg.l}^{-1}$  na região da barragem. No geral, as concentrações médias ao longo da região do reservatório no período de vazante ficaram entre  $129\text{mg.l}^{-1}$  em 2018 e  $369\text{mg.l}^{-1}$  em 2017 e entre  $155\text{mg.l}^{-1}$  em 2016 e  $328\text{mg.l}^{-1}$  em 2019, as mínimas entre  $95\text{mg.l}^{-1}$  em 2016 e  $252\text{mg.l}^{-1}$  em 2017 e máximas entre  $183\text{mg.l}^{-1}$  em 2018 e  $505\text{mg.l}^{-1}$  em 2017. No período de seca, as médias ao longo do reservatório ficaram entre  $155\text{mg.l}^{-1}$  em 2016 e  $328\text{mg.l}^{-1}$  em 2020, as mínimas entre  $67\text{mg.l}^{-1}$  em 2016 e  $181\text{mg.l}^{-1}$  em 2020 e as máximas entre  $30\text{mg.l}^{-1}$  em 2018 e  $551\text{mg.l}^{-1}$  em 2019. Das oscilações nas curvas de CSS para o trecho analisado, nota-se um pico de sedimentos suspensos na região da seção Paredão, em todos os anos do período, mais evidente nos períodos de maiores vazões. A partir dessa região, outras elevações nas curvas são visualizadas até a região de Palmeiral, quando voltam a cair até a região do barramento. Nos períodos de vazante e seca as oscilações da CSS ao longo do reservatório são menos intensas, mas no ano 2020 as concentrações no período de seca alcançaram valores próximos aqueles estimados dos períodos de enchente e vazante nas regiões entre a seção Paredão e Palmeiral.



Figura 46 - Variação anual da CSS por período hidrológico no intervalo 2016 – 2020. a)2016 - b)2017 - c)2018 d)2019 - e)2020 - f)2021

#### 5.2.2.2.4 Análise da variação da CSS por períodos hidrológicos no intervalo 2016-2021

A análise a seguir, subsidiada pelos resultados mostrados pelas **Figura 47**, Figura 48, Figura 49 e **Figura 50**, permitem visualizar como foi a variação da CSS de um mesmo período hidrológico em relação a cada ano do intervalo pesquisado. Entre os períodos hidrológicos da série temporal analisada, a maior diferença absoluta ( $264\text{mg.l}^{-1}$ ) entre as médias ao longo da região do reservatório ocorreram no período de cheia. Essa diferença foi influenciada pelas menores concentrações de sedimentos suspensos para o período ocorrida no ano de 2019, ano em ocorreram as maiores vazões do período (**Figura 17, seção 4.1.3.2**), indicando que o maior volume de águas pode ter diluído a carga sólida presente no reservatório. Neste mesmo ano, no período de cheia, foram constatadas CSS's abaixo dos  $450\text{mg.l}^{-1}$  até a região entre as seções Palmeiral e Jirau, a aproximadamente 25Km da barragem da UHE. Os anos de 2016 a 2018 e os anos de 2020 e 2021 apresentaram concentrações entre  $450\text{mg.l}^{-1}$  e  $650\text{mg.l}^{-1}$  em grande parte do reservatório e especificamente o ano de 2016 apresentou valores próximos a  $850\text{mg.l}^{-1}$  nas proximidades da seção Paredão até a região da seção Palmeiral. Em relação à 2016 a relação entre a menor quantidade de imagens ocasionando menor representatividade para o período e as menores vazões entre os anos do período para diluir a carga sedimentar presente no rio pode ter influenciado nas estimativas que levaram aos valores mais elevados constatados no período de cheia, atingindo o pico de  $915\text{mg.l}^{-1}$ .

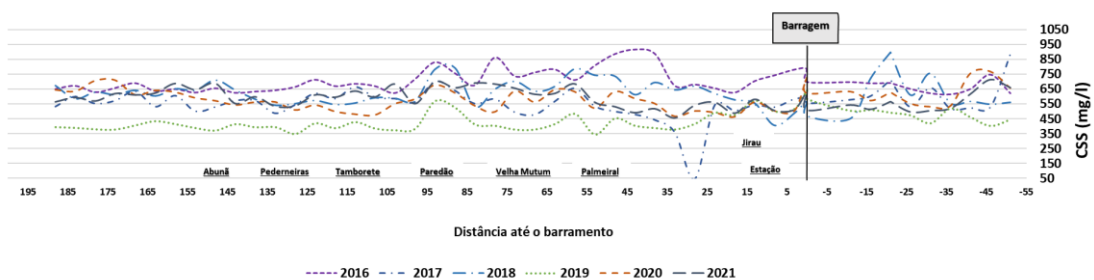


Figura 47 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de cheia entre 2016 e 2021

Para o período de vazante, evidenciou-se que o ano de 2017 esteve sempre acima dos demais em relação à concentração de sedimentos suspensos. As vazões medidas no ano de 2017 no período da vazante foram próximas àquelas medidas em 2018 e 2019, a

parir da metade do mês de maio. Retornando à **Figura 36 na seção 5.2.2.1** visualiza-se que o ano de 2017 mostrou mais elevadas CSS em relação aos outros anos da série, com valores inferiores apenas ao ano de 2021, no entanto, para o último ano da pesquisa as estimativas de CSS foram realizadas apenas nos períodos de enchente e cheia, o que provavelmente fez com que 2021 tivesse os mais elevados valores de CSS ao longo do reservatório. Ao contrário, o ano de 2018 foi um ano com baixa concentração de sedimentos em suspensão frente ao demais, ficando com CSS acima apenas daquelas estimadas em 2016. Neste sentido, com maiores vazões e maior quantidade de sedimentos presentes no reservatório em 2017, supõe-se que a diferença absoluta entre as CSS médias ao longo do reservatório ( $240\text{mg.l}^{-1}$ ) que se deu entre 2017 e 2018 deve-se a relação vazão  $\times$  CSS  $\times N_{\text{amostragem}}$ . Exceto no ano de 2017, o período de vazante apresentou no intervalo, cargas sedimentares em suspensão sempre abaixo dos  $300\text{mg.l}^{-1}$  em 2020 e abaixo dos  $250\text{mg.l}^{-1}$  em 2019, ambos até a região próxima à seção Paredão, quando, a jusante, abaixam de  $200\text{mg.l}^{-1}$ . Os anos de 2016 e 2018 apresentaram CSS sempre abaixo dos  $200\text{mg.l}^{-1}$  até a mesma região, e abaixo dos  $150\text{mg.l}^{-1}$  a jusante, no entanto, o ano de 2016 apresentou elevação da CSS quando se aproximou da barragem da UHE, alcançando valores semelhantes àqueles estimados em 2019 e 2020 na região do barramento e se equivalendo à 2017 cerca de 55Km a jusante da barragem. No período de vazante, ainda pelos maiores volumes de água no reservatório, diluindo os sedimentos, os valores de CSS ficaram abaixo daqueles estimados no período de seca.

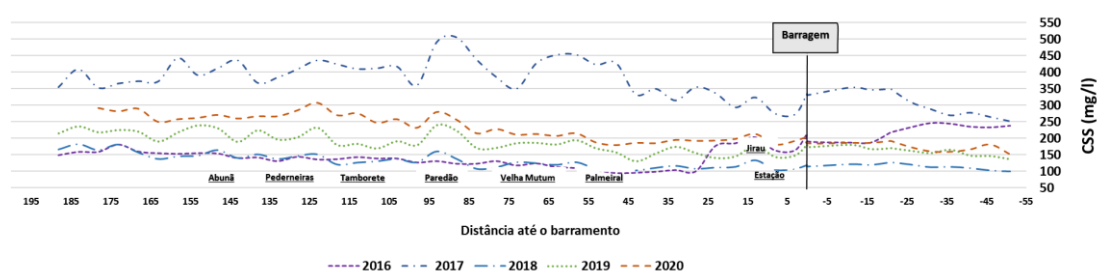


Figura 48 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de vazante entre 2016 e 2020

O período de seca se caracterizou por apresentar as menores diferenças absolutas ( $125\text{mg.l}^{-1}$ ) entre os anos da série analisada em relação às médias de CSS ao longo da região do reservatório da UHE, no entanto, como visto anteriormente, os valores de CSS são superiores aos valores estimados no período de vazante. Supõe-se que o menor volume de água neste período possui menor potencial para diluição da carga sedimentar

presente no reservatório, além dos menores níveis de água contribuírem para que os sedimentos se aproximem da superfície com maior intensidade. No período de seca, o ano de 2019 se apresenta com as maiores concentrações na região da formação do rio Madeira, com valores de CSS superiores à  $450\text{mg.l}^{-1}$  até as proximidades da seção Abunã, a partir de onde os valores decresceram até a barragem da usina. A partir da região da seção Paredão, as estimativas do ano de 2020 passam a mostrar os maiores valores de CSS entre o intervalo. Entre as regiões da seção Paredão e Palmeiral, os valores de CSS no ano de 2020 se aproximam daqueles estimados próximo a Abunã em 2019, com dois picos que ultrapassaram os  $450\text{mg.l}^{-1}$ . Entre 2016 e 2018, as estimativas de CSS oscilaram entre  $350$  e  $250\text{mg.l}^{-1}$ , de montante para jusante no reservatório em direção ao barramento da UHE. Em relação às vazões, visualiza-se que o período de seca é o que apresenta as menores variações entre as descargas líquidas no reservatório (**Figura 17, seção 4.1.3.2**), no entanto em 2020, entre agosto e setembro houve uma elevação na descarga de água, o que pode ter levantado os sedimentos que resultaram na maior média de CSS ( $328\text{mg.l}^{-1}$ ) ao longo do reservatório para o período analisado.

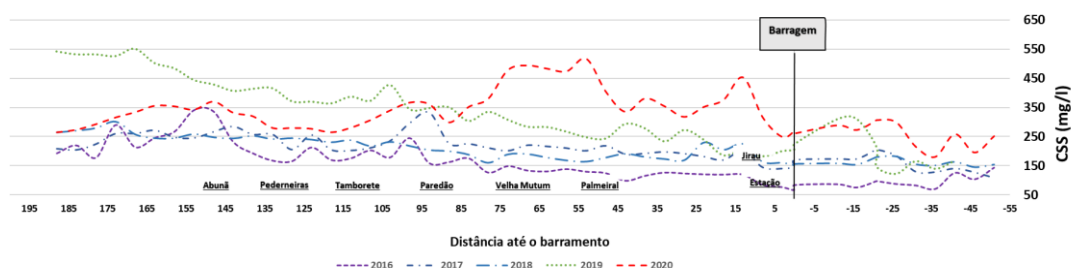


Figura 49 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de seca entre 2016 e 2020

No período de enchente, no intervalo analisado, exceto para o período 2020/2021, os valores se mostraram acima de  $450\text{mg.l}^{-1}$  de montante para jusante, até a região da seção Palmeiral. A estação 2018/2019 apresentou os maiores valores medianos de CSS do período, com picos de sedimentos suspensos em quatro regiões, com estimativas de  $1.454\text{mg.l}^{-1}$  próximo à formação do Madeira,  $1.160\text{mg.l}^{-1}$  próximo à região de Abunã,  $874\text{mg.l}^{-1}$  entre Abunã e Pederneiras e  $865\text{mg.l}^{-1}$  entre Pederneiras e Tamborete, o que levou a estação à maior média de CSS ( $599\text{mg.l}^{-1}$ ) ao longo do reservatório entre as enchentes do intervalo. A menor média de CSS ao longo do reservatório se deu no período

de enchente 2020/2021, quando o valor estimado ficou em  $396\text{mg.l}^{-1}$ . As vazões no período que se inicia a partir de novembro de 2018 e são completadas pelas águas de janeiro de 2019 mostraram-se acima das medidas nos outros anos da série e os meses de novembro e dezembro de 2020 mostraram-se com menores vazões (**Figura 17, seção 4.1.3.2**), reforçando a relação descarga líquida x descarga de sedimentos. A partir da região da seção Tamborete, Entre a região da seção Paredão e a da seção Palmeiral, os valores de CSS do período oscilam em torno dos  $500\text{mg.l}^{-1}$ . No geral, a partir da região de Tamborete, os valores decresceram de  $650\text{mg.l}^{-1}$  a  $250\text{mg.l}^{-1}$  em direção ao barramento da UHE.

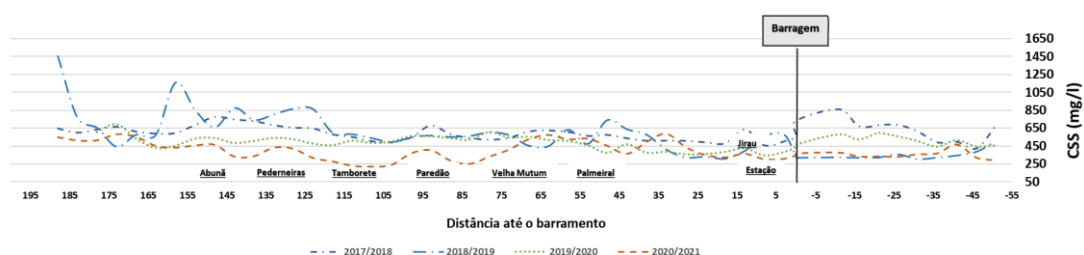


Figura 50 - Variação da CSS ao longo do reservatório no período de enchente entre 2016 e 2020

### 5.2.3 Análise das tendências hidrossedimentares na região do reservatório

A análise dos resultados possibilitou verificar as oscilações da CSS ao longo da região do reservatório da UHE Jirau, onde, de montante para jusante, em direção à barragem da usina, percebe-se geralmente a diminuição dos valores estimados, embora note-se também através das curvas de CSS que algumas regiões apresentam elevações nas concentrações de sedimentos suspensos. Observando os parâmetros e curvas resultantes dos testes estatísticos de *Mann Kendall* e *Sen's Slope* (**Tabela 13, Figura 51 e Figura 52**), confirmou-se que, de fato há uma tendência de redução de sedimentos suspensos de montante para jusante. Os resultados a seguir referem-se aos testes aplicados para o conjunto de dados separados a cada mês, separados por período hidrológico e em relação as imagens processadas no intervalo 2016-2021. No contexto geral, a tendência comum da dinâmica hidrossedimentar observada no reservatório, é de redução dos

valores de CSS, visto que a hipótese nula do teste estatístico foi rejeitada após o teste Z resultar no valor -7,34. A magnitude da tendência (Q) de redução da CSS de montante para jusante em direção ao barramento da UHE foi de -2,88. Quando os testes foram aplicados a cada conjunto de imagens separadas por mês, resultou em tendência não existente no mês de abril, quando o resultado do teste Z ficou em 0,07. Entre todos os outros meses do conjunto de imagens, março apresentou maior incerteza na interpretação no teste de hipótese, com níveis de significância  $\alpha=0,1$ , no entanto, a adoção de nível de significância que aponta menor probabilidade para a hipótese nula ser verdadeira não resultou na aceitação da hipótese nula e o resultado para esse mês foi de tendência decrescente de montante para jusante em direção ao barramento da usina com magnitude Q de -1,18. Ressalta-se novamente na interpretação destes resultados que os meses de março e abril são os meses com as maiores vazões medidas na região do reservatório (**Figura 17, seção 4.1.3.2**) e este fato pode impactar na ressuspensão de sedimentos depositados no fundo do leito. Os meses de janeiro e fevereiro e de maio até dezembro, além dos períodos sazonais e o composto global resultaram nas mais altas probabilidades de acerto na rejeição da hipótese nula, com nível de significância  $\alpha=0,001$  e tendências de decréscimo de CSS em direção à barragem da usina com magnitude média Q = -2,67.

Parâmetro	Período																
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	2016-2021	Seca	Enchente	Cheia	Vazante
Z	-3,41	-5,96	-1,72	0,07	-4,44	-5,90	-6,21	-8,18	-5,06	-6,58	-6,69	-3,94	-7,34	-7,55	-5,00	-4,60	-6,10
Q	-2,30	-5,54	-1,18	0,00	-1,81	-2,00	-1,43	-4,33	-3,32	-3,74	-3,50	-2,82	-2,88	-3,72	-2,78	-2,19	-1,90

Tabela 13 - Valores resultantes dos parâmetros Z de Mann Kendall e Q de Sen's Slope para as análises de tendência



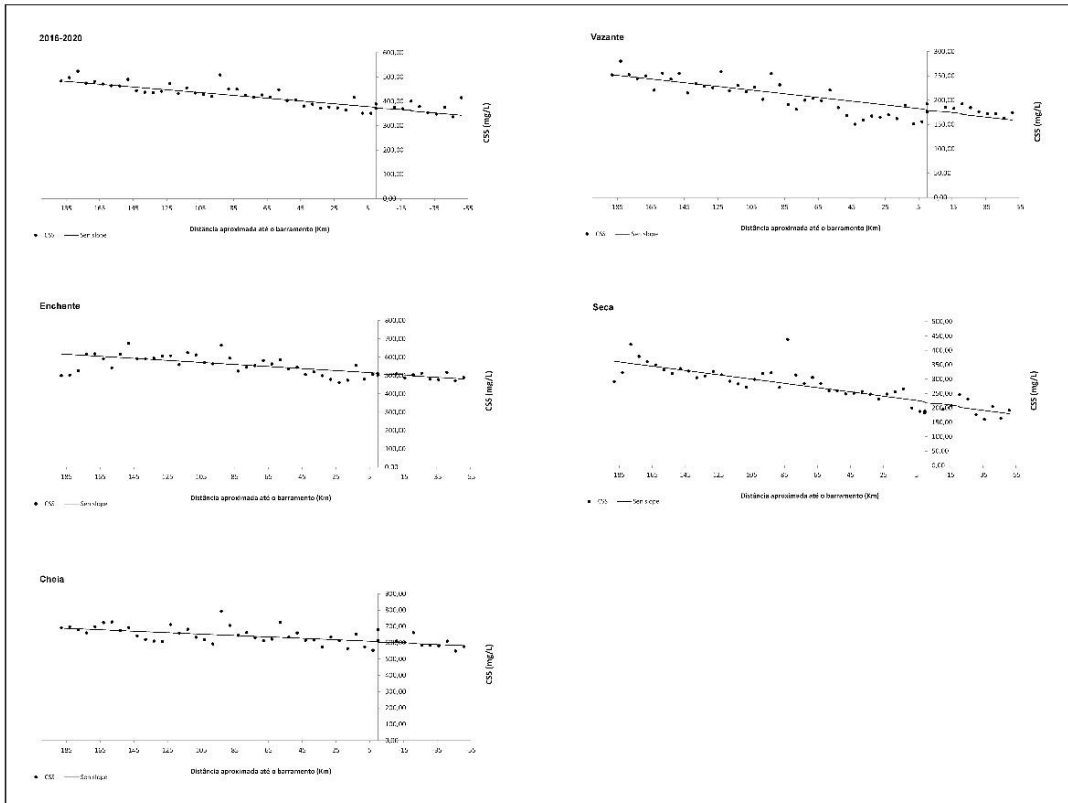


Figura 51 - Gráficos das séries anual e sazonal resultantes das estatísticas de tendências

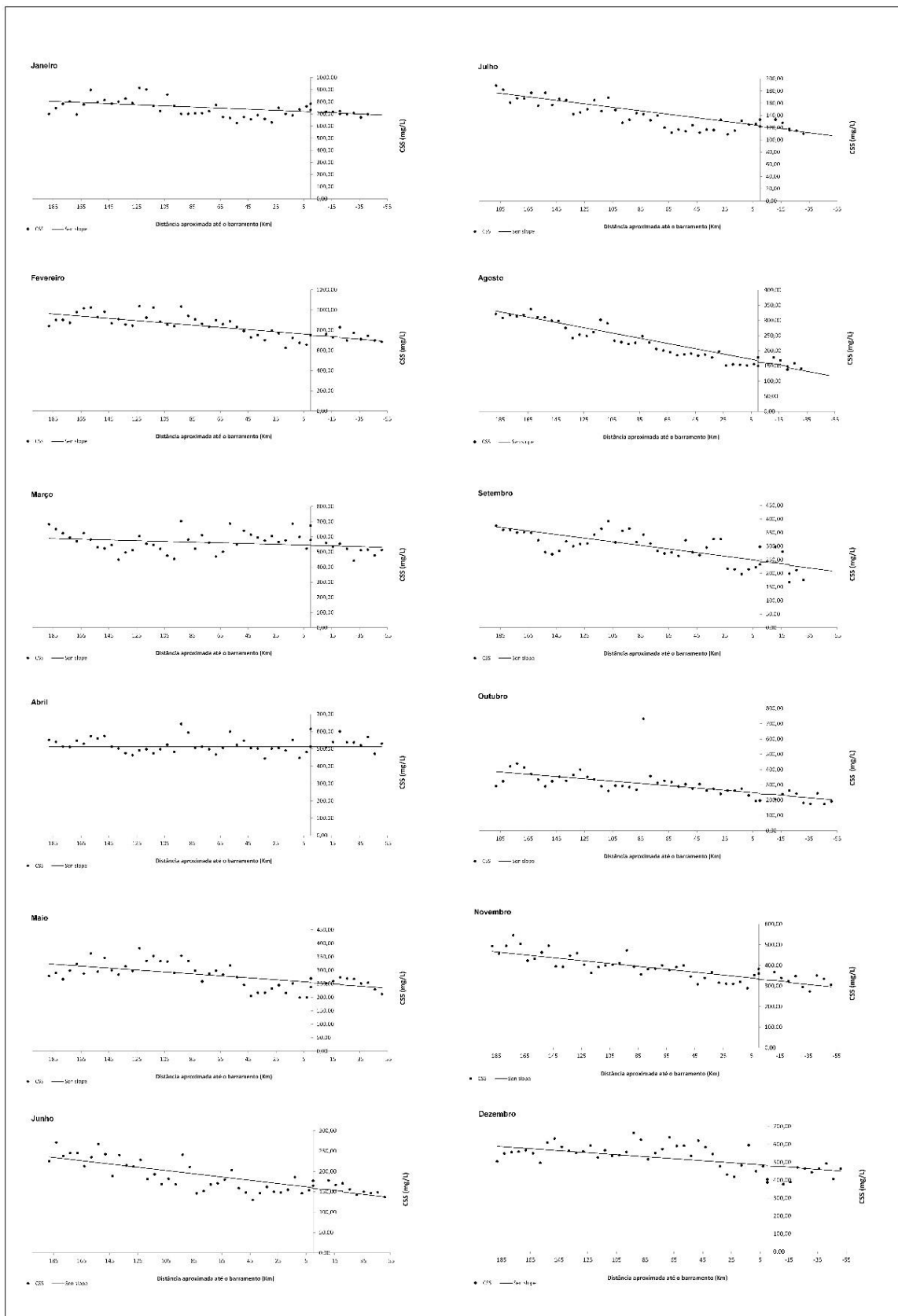


Figura 52 - Gráficos das séries mensais resultantes das estatísticas de tendências

A tendência à diminuição na concentração de sedimentos suspensos finos também foi encontrada por Rivera, et. al (2019) utilizando informações sobre as descargas na estação Porto Velho e Cachuela Esperanza (**Figura 53**), comparando dados sobre as descargas entre 2003 e 2017, antes (2003-2008) e depois (2015 – 2017) da construção das barragens das hidrelétricas no rio Madeira, nos meses de dezembro a março. Os autores identificaram uma redução de cerca de 30% na concentração de sedimentos finos suspensos na estação Porto Velho após a construção das barragens e de 36% na estação Cachuela Esperanza com descargas líquidas sem alterações significativas no período. Essa observação foi semelhante também ao que constataram Latrubesse, et. al. (2019), mostrado pela **Figura 6, seção 3.1.2**.

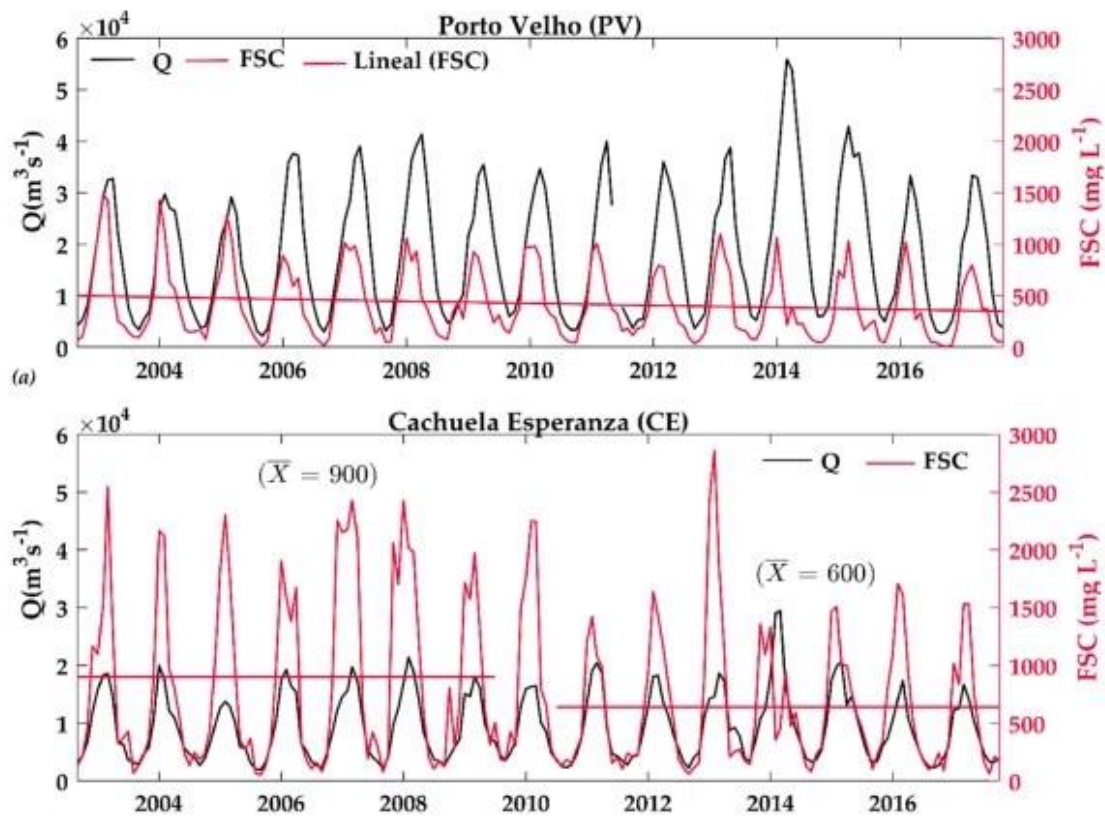


Figura 53 - Séries temporais de médias mensais das vazões e sedimentos finos em suspensão nas estações Porto Velho e Cachuela Esperanza antes e depois da construção dos barramentos das UHE's Jirau e Santo Antônio (2003-2017) – Fonte: Rivera, et. al, 2019

#### **5.2.4 Análises espaço-temporais das CSS's estimadas através de imagens de satélite no período 2016-2021 nas seções amostrais SPECTROSED**

Conforme visto, o número de imagens disponíveis para a realização da pesquisa pode influenciar nos resultados que apontam as variações da CSS ao longo das regiões do reservatório. Além do número de imagens disponíveis, há também que se ater ao fato de que, em épocas com maior nebulosidade na região do reservatório da UHE a quantidade de pixels puros de água é inferior, o que eleva ainda mais a necessidade de que se trabalhe com o maior número de imagens, quando disponíveis, a fim de que se possa alcançar a maior cobertura possível da região pesquisada. Neste sentido, optou-se por analisar a variação da CSS nas seções amostrais SPECTROSED no período em que se obteve a melhor distribuição de imagens ao longo de cada ano e a maior cobertura das regiões do reservatório, dessa forma, os resultados a seguir referem-se ao período de 2018 a 2020, analisado ano a ano, intervalo em que foi possível mostrar o regime hidrológico completo com seus quatro períodos distintos, e ao resultado global da totalidade de imagens processadas no trabalho.

A seção Abunã foi tomada como referência para verificar as diferenças relativas de CSS de montante para jusante em direção ao barramento da usina. As **Figura 54**, **Figura 55**, **Figura 56 e Figura 58** ilustram a variação da CSS no intervalo analisado bem como nos quatro períodos hidrológicos que compõem o regime do rio Madeira na região do reservatório de Jirau.

Nos períodos de seca e vazante a redução da CSS de Abunã para Estação é mais notória. Nestes períodos hidrológicos o fluxo e volume de água são menores, o que contribui para que os sedimentos suspensos presentes na água se depositem.

No período da vazante de 2018 observou-se que a seção Abunã apresentou os maiores valores medianos de CSS ( $179\text{mg.l}^{-1}$ ). De montante para jusante, até a seção Estação, as diferenças relativas mostraram que a carga sedimentar em suspensão foi sempre inferior, e a maior diferença em relação à Abunã ocorreu na seção Palmeiral, com 50% a menos de sedimentos em suspensão. Nas seções Paredão e Jirau, foram identificadas elevações nas CSS, indicados pelo menor valor de diferença relativa em relação às seções respectivamente a montante embora tenham apresentado menor

quantidade de sedimentos em suspensão. No mesmo período hidrológico, no ano de 2019 o comportamento de CSS foi semelhante, onde foi possível observar queda nas concentrações entre Abunã e Tamborete, elevação de Tamborete para Paredão e nova queda até Palmeiral, quando a jusante, na seção Jirau a CSS se mostra novamente mais elevada. Em 2019 a concentração estimada na vazante na seção Abunã ( $221\text{mg.l}^{-1}$ ) foi superior à de 2018 e as diferenças relativas inferiores, o que pode indicar processos de erosão e deposição de sedimentos menos acentuados. Assim como as concentrações de sedimentos suspensos, as vazões do ano de 2019 também foram superiores às de 2018, indicando que as menores diferenças relativas possam estar associadas à maior diluição dos sedimentos presentes na água. Destaca-se, porém, na seção Palmeiral, assim como em 2018, a maior diferença (42%) na CSS em relação à Abunã. O ano de 2020, no período da vazante, apresentou as maiores diferenças relativas em relação à seção Abunã nas seções Pederneiras e Tamborete, no entanto, assim como nos anos anteriores, essas seções sempre apresentaram menores valores de diferenças relativas em relação às diferenças das seções seguintes até a seção Velha Mutum, mesmo assim, destaca-se que em 2020, na vazante, as seções Pederneiras e Tamborete sofreram a maior redução de sedimentos suspensos em relação à Abunã. Olhando para as vazões, verifica-se que a vazante de 2020 teve os menores volumes do período analisado. Em relação às seções Palmeiral, Jirau e Estação, constatou-se no período de vazante de 2020 as menores diferenças relativas em relação à Abunã, mas entre as três seções, novamente, Palmeiral se caracterizou como uma região propícia à deposição de sedimentos.

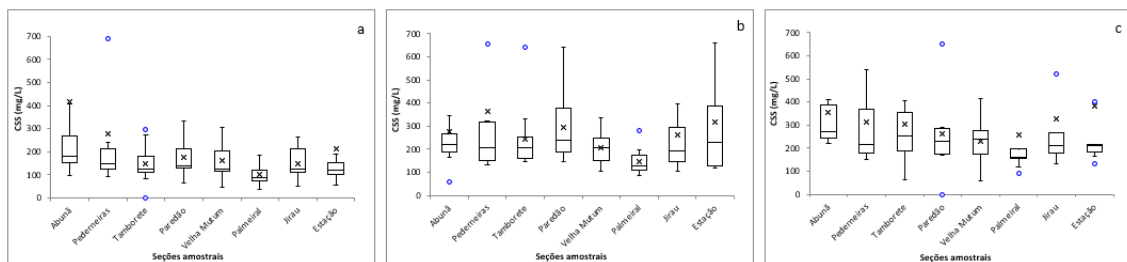


Figura 54 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de vazante. a)2018 b)2019 c)2020

No período de seca, assim como no de vazante, a redução da carga de sedimentos suspensos em direção ao barramento é mais visível. Em 2018 a CSS mediana em Abunã foi de  $318\text{mg.l}^{-1}$  e maiores diferenças relativas resultantes ocorreram a partir da seção Palmeiral, onde a CSS mediana foi de  $251\text{mg.l}^{-1}$ , 32% inferior à CSS mediana em Abunã.

Na seca de 2018 a maior redução de sedimentos suspensos de montante para jusante ocorreu na seção Estação, que é a seção mais próxima ao barramento, que apresentou CSS mediana de 169mg.l<sup>-1</sup>, resultado inferior em 47% em relação à seção Abunã. Nos períodos de seca dos anos 2018 e 2019 as concentrações foram mais homogêneas e o conjunto de dados agrupados só ultrapassaram o terceiro quartil na seção Abunã em 2019. Neste ano, a maior diferença relativa (55%) ocorreu novamente entre a seção Estação com 193mg.l<sup>-1</sup> e Abunã 430mg.l<sup>-1</sup>. No ano de 2019, no período de seca, as diferenças relativas de montante para jusante foram sempre crescentes indicando que a carga de sedimentos suspensos sempre diminuiu em relação à seção a montante da seção seguinte. Em 2020 ocorreu nova oscilação nas estimativas que mostraram uma elevação significativa de CSS em Velha Mutum, com CSS de 568mg.l<sup>-1</sup>, a maior carga estimada para os períodos de vazante e seca entre todas as estações, quando esta foi superior em 45% em relação à Abunã. Neste período, esta foi a única evidência de que a CSS não diminuiu de Abunã para uma seção a jusante. Embora tenha sido constatada uma elevação na carga sedimentar em Velha Mutum, na seção Estação ficou evidenciada novamente a redução da CSS, quando a estimativa resultou em 248mg.l<sup>-1</sup>, que foi a maior estimativa de CSS para o período de seca na Estação, frente a 393mg.l<sup>-1</sup> estimada para Abunã, resultando em uma diferença de 37%.

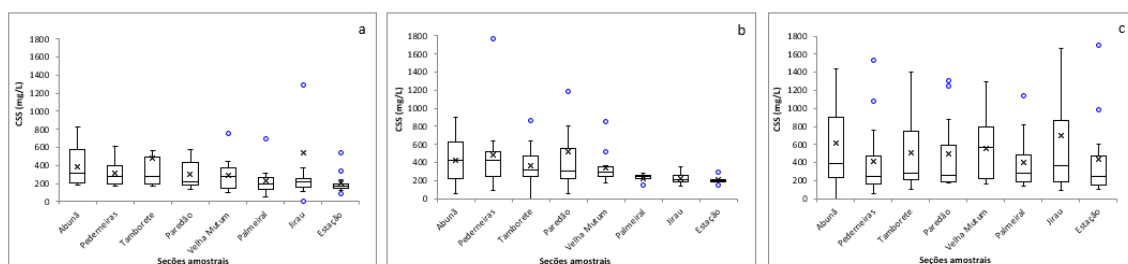


Figura 55 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de seca. a)2018 b)2019 c)2020

A partir do período de enchente, passou a se observar que os resultados mostraram oscilações nas CSS estimada entre as seções. Na enchente 2017/2018, a CSS da seção Pederneiras foi significativamente superior à da seção Abunã, aumentada em 79%, quando passou de 436mg.l<sup>-1</sup> a 781mg.l<sup>-1</sup>. Já, na seção Tamborete a estimativa mostrou que a CSS foi reduzida em 25% em relação à Abunã, quando a mediana ficou em 327mg.l<sup>-1</sup>, mostrando uma queda acentuada em relação à seção Pederneiras, a montante e a jusante uma elevação da CSS discreta até a seção Paredão e nova elevação que ultrapassou os

600mg.l<sup>-1</sup> na seção Velha Mutum, onde a diferença relativa em relação à Abunã foi de 54% com CSS estimada em 669mg.l<sup>-1</sup>. A CSS sofreu nova queda seguida por elevação em direção às seções Jirau e Estação. No período analisado a diferença relativa da seção Estação em relação à Abunã foi de 67% e sua carga de sedimentos em suspensão atingiu o maior valor entre as seções detalhadas, com 726mg.l<sup>-1</sup>.

No período de enchente de 2018/2019 a CSS da seção Abunã apresentou os maiores valores estimados no período, ficando com 643mg.l<sup>-1</sup>. Neste período, diferente dos demais, na seção Pederneiras foi constatada uma redução da CSS em 88% em relação à seção Abunã, sendo ainda a maior diferença relativa entre as seções na enchente 2018/2019. O resultado em Tamborete foi semelhante, com carga sedimentar suspensa 86% inferior à Abunã. Neste período a CSS foi maior em nas seções Palmeiral e Estação, quando apresentaram diferenças relativas positivas, 19% e 3% respectivamente. Notou-se, portanto, que embora a CSS na seção Estação tenha sido superior à de Abunã, os valores foram muito semelhantes, levando o balanço de CSS a praticamente zero. Ao contrário dos períodos anteriores, a seção Estação no período de enchente 2019/2020 apresentou redução na CSS em relação à seção Abunã, indicando que neste período houve deposição de sedimentos no local. Este resultado converge com os levantamentos batimétricos realizados na seção ESBR SJ01 entre setembro de 2019 e fevereiro de 2020 (**Figura 57**), quando ficou demonstrada a redução da profundidade da calha fluvial. Neste período as oscilações que elevaram a CSS em relação à seção Abunã ocorreram nas seções Pederneiras, Paredão e Palmeiral, com cargas de sedimentos em suspensão superiores em 37%, 41% e 38% respectivamente. No período de enchente a seção Paredão mostrou sempre CSS superiores à seção Tamborete, o que pode indicar que o período influencia na ressuspensão de sedimentos. Embora exista uma cachoeira submersa o processo de ressuspensão devido ao desnível de profundidade no local não foi observado nos períodos de vazante e seca.

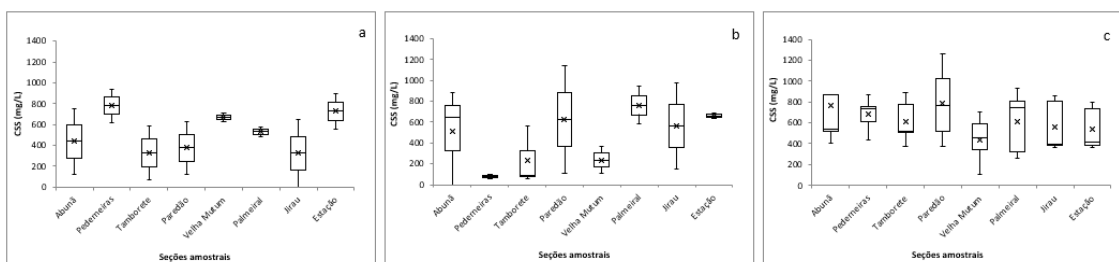


Figura 56 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de enchente. a)2018 b)2019 c)2020

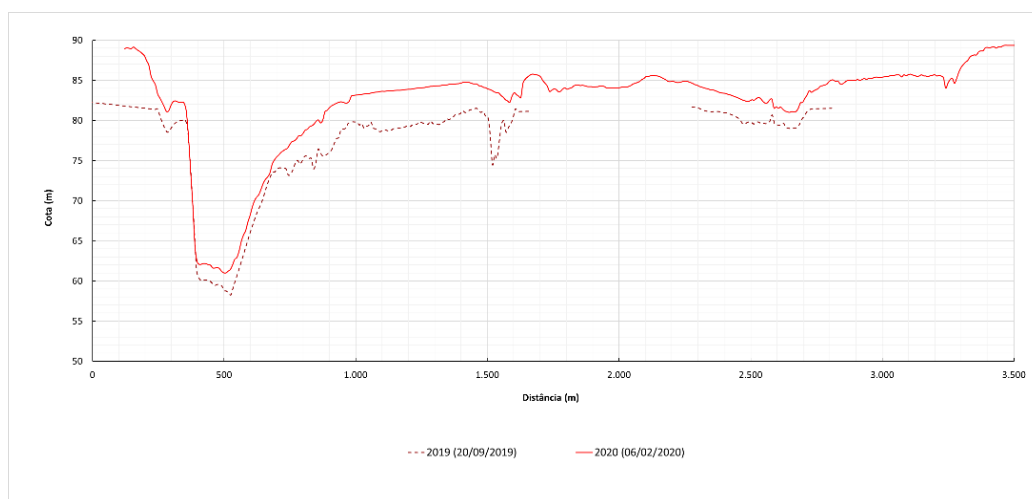


Figura 57 - Levantamentos batimétricos na seção SJ01 entre setembro de 2019 e fevereiro de 2020 – Adaptado de ESBR

Os valores medianos de CSS resultantes das amostragens nas seções do reservatório no período de cheia também evidenciaram as oscilações de montante para jusante com elevações e quedas nos valores de sedimentos em suspensão desde a seção Abunã até a seção Estação. No período analisado observou-se um padrão de elevação de CSS de Abunã para Pederneiras, de decréscimo de CSS de Pederneiras para Tamborete e nova elevação até a seção Paredão seguida novamente por queda até Velha Mutum nos três anos analisados. A partir de Velha Mutum, houve aumento nos valores de CSS para Palmeiral em 2018 e, ao contrário, decréscimo em 2019 e 2020. O valor estimado de CSS em Palmeiral no ano de 2019 foi o menor para todo o período, com  $57\text{mg.l}^{-1}$  que representou uma diferença relativa em relação à Abunã de 84%, este resultado junto a diferença observada indicou que a maior deposição de sedimentos neste período pode ter ocorrido nesta seção. A maior diferença constatada ocorreu em 2020 de Abunã para Pederneiras, com incremento na estimativa de CSS de 134%, quando a carga sedimentar passou de  $354\text{mg.l}^{-1}$  para  $828\text{mg.l}^{-1}$ . Em relação à seção Estação, no período de cheia apresentou CSS superior à da seção Abunã para todos os anos do período, o que sugere que o efeito de remanso imediatamente após o impacto das águas com o barramento pode ressuspender os sedimentos presentes no local.



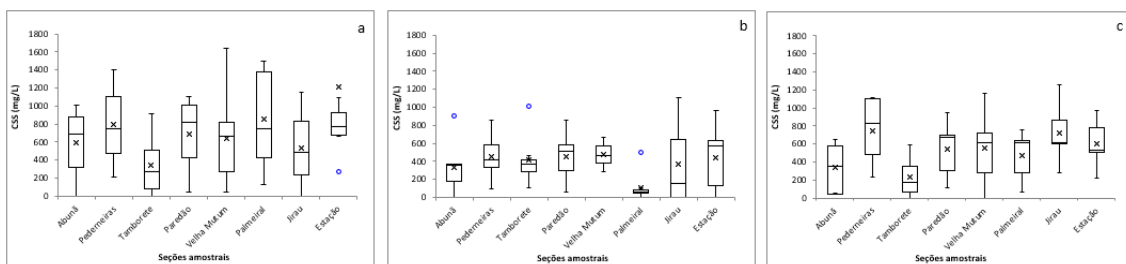


Figura 58 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais no período de cheia. a)2018 b)2019 c)2020

Observando os diagramas resultantes dos períodos hidrológicos anuais entre os anos de 2018 e 2020 (**Figura 59**) nota-se que nos períodos de vazante e seca, em que o nível de águas do reservatório diminui o número de outliers aumenta, sugerindo novamente os efeitos de mistura de pixels, ações antrópicas levantando sedimentos, queimadas na região ou falhas na discriminação dos pixels de água pela correção atmosférica. Nestes dois períodos do regime anual, também se observa através dos diagramas, que a carga de sedimentos suspensos sofre redução de Abunã para Pederneiras e ressuspensão em Tamborete e Paredão, locais onde existem cachoeiras submersas. Nota-se também nestes mesmos períodos a diminuição mais clara da CSS em direção à barragem da UHE. Nos períodos de enchente e cheia, com a subida das águas, ao mesmo tempo em que são trazidos para o reservatório novos sedimentos, o volume de descarga contribui com a diluição e ressuspensão dos sedimentos que já se encontravam depositados na calha do rio, este fato é evidenciado pelas maiores concentrações estimadas, principalmente nas regiões mais próximas à barragem. A seção estação apresenta tanto na enchente quanto na cheia, concentrações de  $557\text{mg.l}^{-1}$ , que são mais elevadas que na região de formação do rio Madeira, localizada próxima a Abunã com CSS estimada em  $547\text{mg.l}^{-1}$ . Para os dois últimos períodos, a seção Paredão mostrou novamente concentrações mais elevadas em relação à Tamborete, evidenciando a presença da cachoeira que ressuspensa os sedimentos na região.

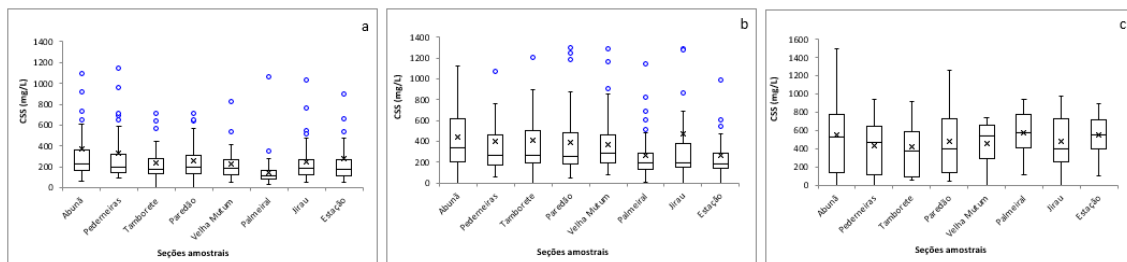


Figura 59 - Diagramas de caixas resultantes nas seções amostrais do regime anual. a)2018 b)2019 c)2020

A **Tabela 14** apresenta a síntese das diferenças relativas resultantes entre as seções amostrais e a seção Abunã.

		CSS(mg/L)	Abunã	Pederneiras	Tamborete	Paredão	Velha Mutum	Palmeiral	Jirau	Estação
Vazante	2018	Mediana	178,5	148	125	141	124,5	89,5	127	120,5
		Dif. Relativa		-17%	-30%	-21%	-30%	-50%	-29%	-32%
	2019	Mediana	220,5	205,5	204	238	205,5	128	191	229
		Dif. Relativa		-7%	-7%	8%	-7%	-42%	-13%	4%
	2020	Mediana	271	214	254	229,5	239	162	210	210
		Dif. Relativa		-21%	-6%	-15%	-12%	-40%	-23%	-23%
Seca	2018	Mediana	318	284	283	226	278,5	199	215	169
		Dif. Relativa		-11%	-11%	-29%	-12%	-37%	-32%	-47%
	2019	Mediana	429,5	424	316,5	309,5	291	224,5	208	193
		Dif. Relativa		-1%	-26%	-28%	-32%	-48%	-52%	-55%
	2020	Mediana	393	243,5	284,5	261	568	282	368	248
		Dif. Relativa		-38%	-28%	-34%	45%	-28%	-6%	-37%
Enchente	2018	Mediana	435,5	780,5	327	376	668,5	529,5	323,5	725,5
		Dif. Relativa		154%	-29%	-10%	135%	84%	-41%	132%
	2019	Mediana	643	74	92	624	235	762	566,5	660
		Dif. Relativa		-80%	-77%	13%	-47%	109%	12%	101%
	2020	Mediana	541	740	516	765	461	748	396	416
		Dif. Relativa		18%	-2%	-1%	-35%	-37%	-25%	-26%
Cheia	2018	Mediana	688	750	271	822	663	748	483	768
		Dif. Relativa		9%	-61%	19%	-4%	9%	-30%	12%
	2019	Mediana	355	412	372	515	459,5	57	152	571
		Dif. Relativa		16%	5%	45%	29%	-84%	-57%	61%
	2020	Mediana	354	828	178	669	616	608	609	531
		Dif. Relativa		134%	-50%	89%	74%	72%	72%	50%
Regime 2016-2021	CSS(mg/L)	341,5	298	266,5	284,5	290	167,5	229,5	225	
	Mediana		-13%	-22%	-17%	-15%	-51%	-33%	-34%	

Tabela 14 - Síntese das CSS medianas e Diferenças relativas entre as seções amostrais com referência na seção Abunã

Em relação às tendências de deposição de sedimentos na direção do barramento da UHE, os diagramas de caixas mostraram que o fenômeno é mais evidente no período de seca e de vazante, e, que nos períodos de enchente e cheia o impacto do barramento hidráulico é mais claro, evidenciado pela ressuspensão de sedimentos, efeito visualizado principalmente nas seções Jirau e Estação. Embora se comente da existência de cachoeira submersa na região do Paredão, o seu efeito nem sempre é o de ressuspensão de

sedimentos, como pôde ser observado principalmente nos resultados do período de seca, quando a seção Paredão apresentou CSS inferiores às da seção Tamborete. No entanto o efeito de ressuspensão foi evidenciado pelas amostragens na maioria dos resultados analisados.

Ressalta-se que o agrupamento de resultados nos primeiros e terceiros quartis podem influenciar nas diferenças relativas observadas, como no caso da seção Palmeiral durante a cheia de 2019, que apresentou um intervalo menor em relação aos demais, quando olhados os diagramas de caixas, efeito provável da reduzida quantidade de imagens com pixels disponíveis para estimar a CSS no local.

No período de cheia e de vazante, somente na enchente 2019/2020 a seção Estação não apresentou maior carga sedimentar suspensa em relação à região Abunã, que é a mais distante do barramento. Já, nos períodos de vazante e seca, os resultados mostraram que a CSS na seção Estação estiveram sempre abaixo da CSS em Abunã, exceto na vazante de 2019. Os resultados sugerem que ocorre uma inversão na dinâmica de ressuspensão e deposição em função do período hidrológico. O aumento da deposição de sedimentos na região do barramento da UHE parece ocorrer junto à redução do fluxo e vazão, o que sugere que, o efeito do remanso, no que se refere à capacidade para ressuspender sedimentos é reduzido. Já nos períodos de enchente e cheia o impacto das águas com o barramento ocorre com maior energia, gerando maior turbulência e ressuspensão dos sedimentos anteriormente depositados no fundo. Os períodos de enchente e cheia, por apresentarem maior energia no fluxo de águas ocasionam maiores oscilações nos valores de CSS. Embora os resultados de CSS do período de enchente dos anos 2018 e 2019 e de 2018 a 2020 na seção Estação tenham sido superiores, não foram significativos a ponto de aceitar a hipótese nula do teste de tendência. Outra observação acerca dos resultados é que a seção Tamborete sempre teve sua CSS reduzida em relação à Abunã em todos os períodos analisados, podendo, portanto, ser uma região propícia ao depósito de sedimentos.

Nos períodos de seca e vazante a seção Palmeiral se destacou como a seção que sofre a maior redução na CSS entre todas. Esta seção encontra-se á montante de um acentuado meandro do rio Madeira, que, junto aos efeitos de remanso provocados pelo barramento hidráulico, parece exercer forte influência na deposição de sedimentos nesta região. A redução de CSS na seção Palmeiral não ocorre com a mesma magnitude nos períodos de enchente e cheia. No período de enchente não ficou evidenciada a menor

concentração de sedimentos suspensos na seção Palmeiral, ao contrário, a CSS estimada foi incrementada de Velha Mutum para Palmeiral em 2019 e 2020. Acredita-se que, no período de enchente, com o incremento das vazões, aliado ao efeito de remanso provocado pela barragem da usina e à geomorfologia fluvial da região, os sedimentos de fundo possam ter sido levantados e identificados através do mapeamento por satélite. A **Figura 60** retrata um banco de sedimentos na região próxima à seção Estação, efeito de um processo de deposição de carga sedimentar.



Figura 60 - Depósito de sedimentos visualizado no período de vazante na região da UHE Jirau –  
Elaborada pelo autor

### 5.2.5 Relação entre os perfis batimétricos x mapeamento de CSS por satélite

Para analisar as relações entre os processos erosivos e deposicionais e os valores de CSS estimados por satélite, após o processamento da série temporal de imagens, foram comparados os resultados dos transectos de batimetria elaborados pela ESBR entre os anos de 2017 e 2020 na seção Velha Mutum com os valores resultantes dos mapeamentos elaborados durante esta pesquisa.

Diante dos perfis da calha fluvial na seção Velha Mutum, pode-se observar que as alterações de profundidade do canal para esta seção foram mais acentuadas entre a margem esquerda e o centro da seção, principalmente no primeiro terço, entre 110 e 285m

da margem esquerda, onde foram identificadas as mais intensas oscilações. Tais variações de profundidade estão atreladas aos processos erosivos e deposicionais do sedimento de fundo de calha e transportados a montante, além dos efeitos de remanso ocasionados pelo barramento da UHE. A **Figura 61** retrata as relações encontradas entre os resultados das amostragens batimétricas e as estimativas de CSS realizadas junto ao mapeamento através das imagens de satélites. Analisando as oscilações identificadas no período observa-se que entre setembro de 2017 e março de 2018 a profundidade do canal aumentou, indicando a ocorrência de processo erosivo na seção. Observando o mapeamento entre datas aproximadas, é possível visualizar o incremento da CSS estimada. Acredita-se que este fato possa estar relacionado à identificação na superfície carga sedimentar erodida do fundo da calha. Entre agosto de 2018 e março de 2018 a diferença relativa entre as médias estimadas por satélite na seção Velha Mutum foi de 18%. No período seguinte, principalmente na região da margem esquerda da seção, a profundidade do canal é diminuída, o que indica o depósito de sedimentos no local e diminuição da CSS na superfície da água, conforme visualizado pelo mapeamento realizado por satélite. A diferença relativa entre as médias de CSS na seção entre março de 2018 e outubro de 2018 foi de 52%. De outubro de 2018 a março de 2019 notou-se, através do levantamento batimétrico, que até cerca de 280m da margem esquerda, ocorreu novo processo de erosão de fundo, lançando sedimentos ao corpo d'água. No entanto, entre 280 e 600m da margem esquerda, os sedimentos foram depositados. Possivelmente, essa quantidade de sedimentos desprendidos da margem ao primeiro terço da largura total, foi suficiente para elevar a CSS estimada por satélite, no entanto, em função da ocorrência de depósito no fundo na parte central da seção a diferença relativa medida entre outubro de 2018 e março de 2019 foi de 32%, diferença inferior àquela medida no período anterior. Os resultados observados em relação aos processos erosivos e deposicionais em função da batimetria no período entre março de 2019 e setembro de 2019, mostraram que houve uma inversão em relação ao período anterior, em que, no primeiro terço em relação a margem esquerda da seção ocorreu a redução na profundidade do canal, que pode ser explicado pelo processo de deposição de sedimentos, enquanto na região central da seção identificou-se a ocorrência de processos erosivos aumentando a profundidade do canal. Entre este ciclo, as observações através de imagens de satélite mostraram que houve redução da CSS, com uma diferença relativa entre as médias para a seção entre março de 2019 e setembro de 2019 de 37%, neste sentido, levando a uma interpretação de que a carga sedimentar

depositada no centro da seção foi mais significativa para o mapeamento que acarretou em menor CSS, tendo em vista que a erosão dos sedimentos mais próximos à margem esquerda não foi suficiente para mitigar a diferença constatada entre as datas das observações. Entre setembro de 2019 e março de 2020 a profundidade da calha fluvial não oscilou significativamente entre o centro e a margem direita da seção, no entanto, a dinâmica de sedimentos nas proximidades da margem esquerda continuou movimentada. Neste intervalo a CSS estimada aumentou em 152%, no entanto, para esta comparação, a única imagem de satélite com pixels de água disponíveis para amostragem foi do mês de fevereiro, quando foram constatadas as maiores CSS do período de cheia no intervalo 2016-2020 (**Figura 47, seção 5.2.2.2.4**) com lapso temporal de 36 dias para a data do levantamento batimétrico. Desta forma interpreta-se que, a diferença entre as estimativas do período, foram influenciadas tanto pela erosão visualizada no primeiro terço da seção e pela sazonalidade que acarreta em altas cargas sedimentares. Por fim, as curvas batimétricas mostraram que de março de 2020 para agosto de 2020 a profundidade da calha fluvial diminuiu, sugerindo a ocorrência de processos deposicionais, porém, as CSS estimadas em cada período apresentaram uma diferença de apenas 8%. Neste período, embora o perfil batimétrico tenha mostrado a redução da profundidade do canal as estimativas de CSS em agosto de 2020 ficaram acima das estimativas de março de 2020, no entanto, analisando a **Figura 49 da seção 5.2.2.2.4**, verifica-se que a estação seca do ano de 2020 deteve as maiores estimativas de CSS entre o mesmo período hidrológico de todos os anos do intervalo analisado. Importante ressaltar, portanto, tendo em vista as variadas diferenças no tempo entre as estimativas por satélite e as campanhas batimétricas, que, embora esta análise tenha seu foco nas relações entre os processos erosivos e deposicionais que contribuem para a variação da carga sedimentar em suspensão na seção detalhada, os valores das CSS estimadas também são influenciados pela sazonalidade, como detalhado nas seções anteriores deste trabalho.

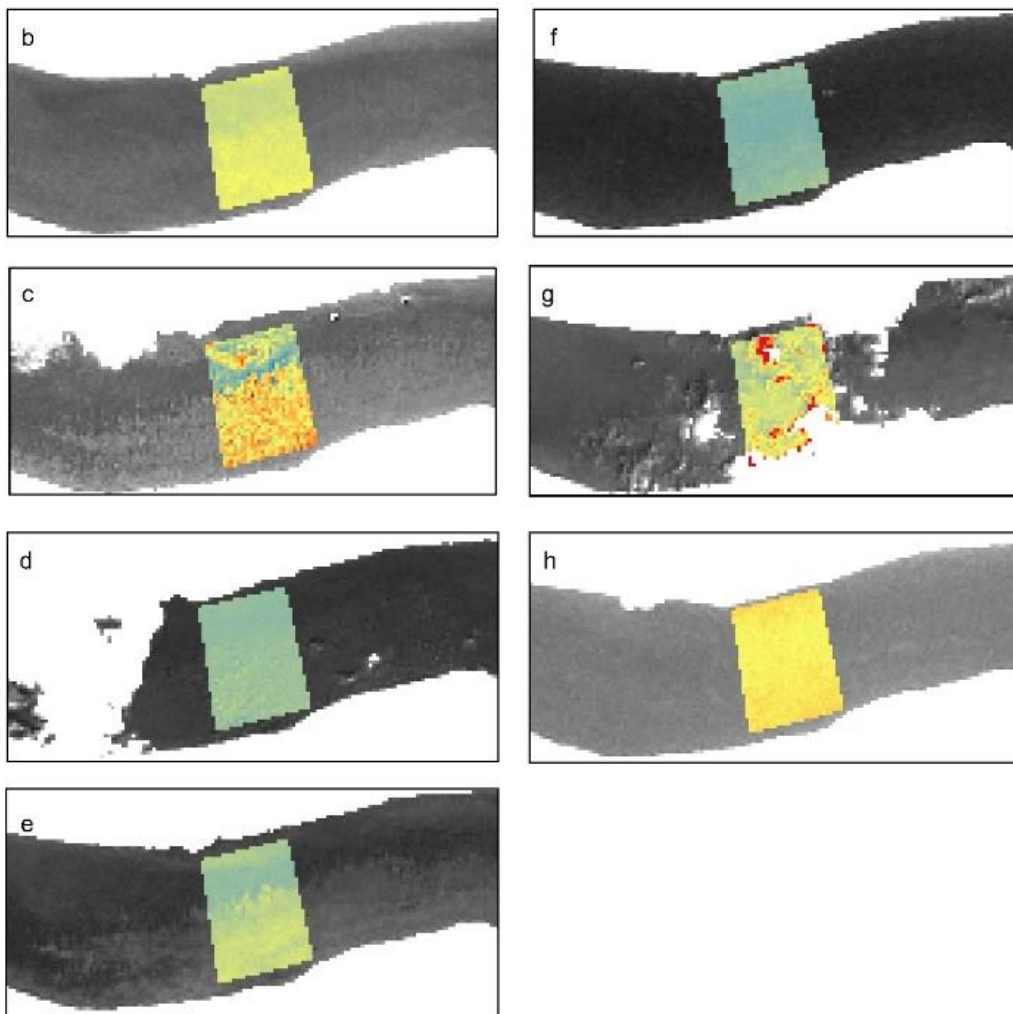
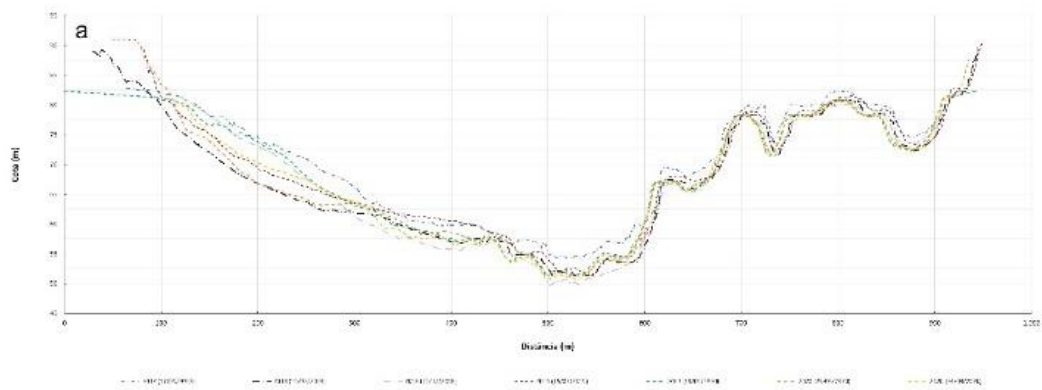


Figura 61 - a) Perfis batimétricos na seção Velha Mutum – b) CSSsat 17/09/2017 – c) CSSsat 19/03/2018 – d) CSSsat 22/10/2018 – e) CSSsat 15/03/2019 – f) CSSsat 19/09/2019 – g) CSSsat 25/03/2020 – h) CSSsat 24/08/2020

## 6 CONCLUSÕES

A pesquisa demonstrou ser viável a utilização de imagens de satélites para realizar o mapeamento da concentração de sedimentos em suspensão em corpos aquáticos possibilitando monitorar em larga escala a dinâmica hidrossedimentar na extensão da calha fluvial do rio Madeira e as imagens Sentinel-2 permitiram visualizar com melhor detalhamento a variabilidade que antes eram tratadas como uma média a partir das composições MODIS.

As diferenças das estimativas de CSS, entre aquelas realizadas pelo produto Sentinel-2 com a correção GRS e pelos produtos MODIS foram em média de 34,6%. No geral, as estimativas de CSS a partir das imagens corrigidas pelo GRS se mostraram mais próximas do que foi medido pela estação HYBAM (27,3%), indicando ser esse o produto para correção atmosférica com maior eficiência para estimar sedimentos em suspensão na área estudada, já que é capaz de retirar também o sinal da reflexão solar na água. Os valores de reflectância dos produtos Sentinel-2 adquiridos para cada uma das correções atmosféricas e MODIS nas datas analisadas são em média 11,4% diferentes entre banda4/RED e 36,3% entre a banda 8a/IR. A região do vermelho apresenta maior congruência e resultados com maior equivalência entre si. Os produtos das correções MAJA e Sen2Cor são os mais semelhantes entre si, com MAJA apresentando valores de reflectância em média 6% mais baixos que os do processamento Sen2Cor, e a correção GRS a mais distinta entre as três analisadas, removendo em média, 13,4% e 20,2% de sinal a mais que MAJA e Sen2Cor, respectivamente, demonstrando sua maior eficiência para a correção do efeito *sunglint*.

A região da pesquisa situou-se sob área com predominância de nebulosidade durante grande parte do ano, situação que implicou em menor amostragem da superfície da água nos meses mais chuvosos. Sobre este aspecto, a boa resolução temporal dos satélites Sentinel-2, junto a ferramentas estatísticas auxiliaram na descrição do contexto hidrossedimentar da região estudada como um todo.

O mapeamento por satélite pode auxiliar na identificação de processos erosivos e deposicionais que ocorrem no reservatório. Sobre a dinâmica dos processos



hidrossedimentares ao longo do reservatório da UHE Jirau, a pesquisa mostrou evidências de que ocorre uma tendência de redução da CSS em direção a seu barramento, o que sugere a acelerada alteração da morfologia fluvial pelo incremento na deposição de sedimentos no leito do. A carga sedimentar suspensa decresce de montante, desde a formação do rio Madeira para jusante, em direção à barragem da usina.

Os meses com as maiores vazões mostraram maior quantidade de sedimentos na superfície da água, indicando processos de ressuspensão de sedimentos no reservatório. Nos meses de seca, com o menor nível d'água, os sedimentos chegam com maior facilidade à superfície, resultando em concentrações mais elevadas que no período de vazante, que possui ainda volume de água suficiente para diluir os sedimentos, mas com menor energia, favorecendo a deposição. No período de enchente, as águas provenientes da bacia do rio Madeira, em grande parte oriunda da cordilheira dos Andes, são responsáveis pela alta carga de sedimentos transportados ao longo do reservatório. Além dos sedimentos provenientes de toda a bacia do rio Madeira, o fluxo de águas no reservatório, com maior volume e energia, acentua o processo de ressuspensão dos sedimentos que já se encontram depositados na calha fluvial. O período de cheia conta com o maior volume de águas e a mais alta carga de sedimentos em suspensão no reservatório, e recebe entre março e abril a maior parcela das águas da bacia que são provenientes da maior parcela de precipitações do período chuvoso ocorridas na região Amazônica e Andina, entre dezembro e fevereiro.

A utilização de imagens de satélite permite abranger áreas mais extensas do reservatório, inclusive alcançar regiões de difícil acesso seja por fatores logísticos ou de segurança, em função das cachoeiras, correntes, matacões e rochas que apresentam risco às embarcações.

Em relação às comparações entre as estimativas de CSS por satélite e os levantamentos batimétricos, embora identificadas convergências nos resultados em algumas ocasiões, percebeu-se que, ora os processos erosivos podem ocorrer simultaneamente aos processos deposicionais em um mesmo transecto da calha fluvial, portanto, estudos que possam estimar o balanço entre a carga sedimentar erodida e depositada poderão auxiliar na interpretação dos resultados das estimativas por satélites.

Foi possível definir uma metodologia para o processamento da série temporal de imagens desde a obtenção do dado bruto até a estimativa de CSS e a caracterização dos padrões de transporte de sedimentos suspensos na área do reservatório da UHE Jirau.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMY, A. Dinâmica fluvial do rio Madeira. **Porto Velho: cultura, natureza e território**, 2016.

ANA/ANEEL. Resolução conjunta nº 03 ANA/ANEEL, de 10 de agosto de 2010. Disponível em:<[http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/ResolucaoConjunta\\_n\\_003-2010.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/ResolucaoConjunta_n_003-2010.pdf)>.

ASWAD, F. K, et. al. Trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test for annual and monthly rainfall for Sinjar District, Iraq. **Journal of University of Duhok**, 2020

BANDEIRA, I. C. N, et. al. Terras caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon? **Environmental Earth Sciences**, 2018

BERNINI, H. et al. Descarga Sólida em Suspensão e dinâmica fluvial na bacia do rio Madeira: um perfil no período de cheia hidrológica. IX seminário latino-americano e v seminário ibero-americano de geografia física, 2016.

CABALLERO, I. et at. Evaluation of the First Year of Operational Sentinel-2A Data for Retrieval of Suspended Solids in Medium- to High-Turbidity Waters. **Remote Sensing**, 2018.

CARPIO, J. M. Hidrologia d Sedimentos. **Águas Turvas: Alertas sobre as consequências de barrar o maior afluente do Amazonas**, 2008.

CARVALHO, N. O e STRASSER, M. **Curso de Hidrossedimentologia**. Organização do Tratado de Cooperação Amazônica – OTCA, Agência Nacional de Águas – ANA, Agência Brasileira de Cooperação – ABC, 2019

CARVALHO, N. O. et. al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000

CAVALLI, M. et al. Mapping water and sediment connectivity. **Science of the Total Environment**, 2019

CURRAN, P. J. e NOVO, E.M.M. The Relationship Between Suspended Sediment Concentration and Remotely Sensed Spectral Radiance: A Review. **Journal of Coastal Research**, 1988

DAMASCENO, J. A. Caracterização do Regime Hidrológico do Rio Madre de Dios utilizando Altimetria Espacial. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, 2017

DÖRNHÖFER, K e OPPELT, N. Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. **Ecological Indicators**, 2016.

DÖRNHÖFER, K, et al. Water Constituents and Water Depth Retrieval from Sentinel-2A—A First Evaluation in an Oligotrophic Lake. **Remote Sensing**, 2016.

DOXARAN, D. et al. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 2008.

DOXARAN, D. et al. Spectral signature of highly turbid Waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. **Remote Sensing of Environment**, 2002.

FASSONI-A, A.C., E PAIVA, R. C.D. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. **Remote Sensing of Environment**, 2019  
FEARNSIDE, P. Impacts of Brazil's Madeira River Dams: Unlearned Lessons for hydroelectric development in Amazonia. **Environmental Science and Policy**, 2014.

FILIZOLA, N e GUYOT, J. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. **Hydrological Process**, 2009

FILIZOLA, N. et al. The Significance of Suspended Sediment Transport Determination on the Amazonian Hydrological Scenario. **Sediment Transport in Aquatic Environments**, 2011.

FISCH, G. et al. Uma revisão geral sobre o clima da Amazonia. **ACTA AMAZÔNICA**, 1998

FRANCA, R. R. Climatologia das chuvas em Rondônia – período 1981-2011. **Geografias – Artigos Científicos**, 2015

GHOLIZADEH, M. H, et al. A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. **Sensors**, 2016.

GIBBS, R. J. Suspended Solids in Water. **Plenum Press**, 1974.

GORDON, H. R. e BROWN, O. B. A theoretical model of light scattering by sargasso sea particulates. **Limnology and Oceanography**, 1972.

GORDON, H. R. et al. A Semianalytic Radiance Model of Ocean Color. **Journal of Geophysical Research**, 1988.

GOVERNO DO BRASIL, Infraestrutura. Potencial hidrelétrico brasileiro está entre os cinco maiores do mundo, **Portal do Brasil**, 2011. Disponível em:<<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/potencial-hidreletrico-brasileiro-esta-entre-os-cinco-maiores-do-mundo>>

GURLIN, D. et al. Remote estimation of chl-a concentration in turbid productive waters — Return to a simple two-band NIR-red model? **Remote Sensing of Environment**, 2011.

GUYOT, J. L. Hydrogéochimie Des Fleuves De L’Amazonie Bolivienne. **Collection ÉTUDES et THÈSES**, 1993

HAGOLLE, M. H, et. Al. MAJA ATBD – Algorithm Theoretical Basis Document, 2017

HAN, B. et al. Development of a Semi-Analytical Algorithm for the Retrieval of Suspended Particulate Matter from Remote Sensing over Clear to Very Turbid Waters. **Remote Sensing**, 2016.

HARMEL, T, et. al. Sunglint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. **Remote Sensing**

**of Environment**, 2018

HELSEL, D. R. and FRANS, L. M. regional Kendall Test for Trend. **Environmental Science & Technology**, 2006

JUNK, W. J, et al. A classification of the major habitats of Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. **Wetlands Ecology and Management**, 2015.

JUNK, W. J e MELLO, J. A. S. N. Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. **Estudos Avançados** 1990

KALLIO, K. et al. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. **Science of the Total Environment**, 2001.

KOPONEN, S. et al. A case study of airborne and satellite remote sensing of a spring bloom event in the Gulf of Finland. **Continental Shelf Research**, 2007.

KUHN, C. et al. Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. **Remote Sensing of Environment**, 2019.

LABADESSA, A. P. “Terras caídas”, as causas naturais e antrópicas: uma ocorrência na comunidade de São Carlos – Médio Madeira/RO, **Revista do Programa de Pós Graduação em Geografia PGE/UEM**, 2012

LATRUBESSE, E. M. et. al Damming the rivers of the Amazon Basin. **Nature**, 2017.

LIU, H. et al. Application of Sentinel 2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake. **Remote Sensing**, 2017.

MACHADO, L. A. T, et. al. Seasonal and diurnal variability of convection over the Amazonia: A comparison of different vegetation types and large scale forcing. **Theoretical and Applied Climatology**, 2004

MARINHO, R. R, et. al. Spatiotemporal Dynamics of Suspended Sediments in the Negro River, Amazon Basin, from In Situ and Sentinel-2 Remote Sensing Data. **International Journal of Geo-Information**, 2021

MARINHO, T, et. al. Suspended Sediment Variability at the Solimões and Negro Confluence between May 2013 and February 2014. **Geosciences**, 2018

MARTINEZ, J. M, et al. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. **CATENA**, 2009.

MARTINEZ, J. M. et. al. Monitoring of surface water quality in large rivers with satellite imagery – Application to the Amazon basin. **13<sup>th</sup> World Water Congress**, 2008

MARTINEZ, J. M. et. Al. Surface water quality monitoring in large rivers with MODIS data. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, 2007

MARTINEZ, J. M. et. al, The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 2015

MARTINEZ, J. M. et. al. Amazon basin water quality monitoring using MERIS and MODIS data. **ENVISAT and ERS Symposium**, 2004.

MARTINS, V. S. Sistemas orbitais para monitoramento de ambientes aquáticos. Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos – Princípios e Aplicações. **LabISA INPE**, 2019.

MEAL, D. W, et. al. Statistical Analysis for Monotonic Trends. **TechNOTES**, 2011

MILLER, R. e McKEE. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal Waters. **Remote Sensing of Environment**, 2004.

MISHRA, D. R. et al. Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters. **Elsevier**, 2017

MOBLEY, C. D. Light and water: radiative transfer in natural waters. **Academic press**, 1994.

MOLINIER, M. et al. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. L 'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris) **IAHS**, 1996

MONTANHER, O. C, et al. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. **International Journal of Applied Observation and Geoinformation**, 2014.

MOREL, A e PRIEUR, L. Analyses of Variations in Ocean Color. **Limnology and Oceanography**, 1977

MOREL, A. Y. e GORDON, H. R. Report of the Working Group on Water Color. **Boundary-Layer Meteorology**, 1980.

MÜLLER-W, U. Sentinel-2 MSI – Level-2A Prototype Processor Installation and User Manual. **S2PAD-VEGA-SUM-0001**, 2016

NOVO, E. M. M, et al. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 1989.

NOVO, E. M. M. Results of a Laboratory Experiment Relating Spectral Reflectance to Total Suspended Solids. **Remote Sensing of Environment**, 1991.

ODERMATT, D. et al. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, 2011.

ODERMATT, D. et al. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, 2011.

OGASHAWARA, I. et al. Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters. **Elsevier**, 2017

OGASHAWARA, I. Terminology and classification of biooptical algorithms. **Remote Sensing Letters**, 2015.

OGASHAWARA, I. Terminology and classification of biooptical algorithms. **Remote**

**Sensing Letters**, 2015.

ONDERKA, M e PEKÁROVÁ, P. Retrieval of suspended particulate matter concentrations in the Danube River from Landsat ETM data. **Science of the Total Environment**, 2008.

PALMER, S. C.J, et al. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. **Remote Sensing of Environment**, 2014.

PETUS, C. et al. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. **Continental Shelf Research**, 2009.

PREISENDORFER, R. W. Hydrologic Optics. U.S. Department of Commerce. National Oceanic & Atmospheric Administration. **Environment Research Laboratories**, 1976.

RIVERA, I. A. et al. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin (2003–2017). **Water**, 2019

SALMI, T. et. al. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates – the excel template application Makesens. **Publications on Air Quality**, 2002

SANTOS, A.L.M.R, et al. Purus River suspended sediment variability and contributions to the Amazon River from satellite data (2000-2015). **Comptes Rendus Geoscience**, 2017

SANTOS, D. R.A e, et. al, 2020. Evaluation of Sentinel-2/MSI imagery products level-2A obtained by three different atmospheric corrections for monitoring suspended sediments concentration in Madeira River, Brazil. **2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)**, 2020

SANTOS, V. O. Identificação e análise de tendências das variáveis hidrológicas e mudanças no uso e ocupação das terras no alto curso da bacia hidrográfica do rio Uberaba, em minas gerais. **Dissertação de mestrado** – Universidade Federal de Uberlândia - UFU 2016.



SHI, W. et. al. The Annual cycle and Variability of Precipitation in Brazil. **NECP/Climate Prediction Center ATLAS No. 9**, 2000

STEAVAUX, J. C e LATRUBESSE, E. M. Geomorfologia fluvial. **Coleção Geografia** – Oficina de textos, 2017.

TOMING, K. et al. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. **Remote Sensing**, 2016

TRINDADE, A. L. C, et al. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Eng. Sanit Ambient**, 2017

TYLER, A. N, et al. Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modeling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. **International Journal of Remote Sensing**, 2006.

VAUCHEL, P. et al. A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River Basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme, **Journal of Hydrology**, 2017

VERGASTA, L. A. et al. Avaliação do Balanço de Água na Bacia do Rio Madeira Simulado Pelo Modelo Regional Climático Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2021

VILLAR R. E. et al. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **Journal of South American Earth Sciences**, 2013.

VILLAR R. E. et al. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. **Journal of Hydrology**, 2012

YACOBI, Y. F. et. at. NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophylla estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study. **Water Research**. 2011