

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

OBTENÇÃO DE NÍVEIS E DECLIVIDADE DA
LINHA D'ÁGUA A PARTIR DE ALTIMETRIA
POR SATÉLITE NO RIO SÃO FRANCISCO

Luana Kessia Lucas Alves Martins

Belo Horizonte

2021

Luana Kessia Lucas Alves Martins

OBTENÇÃO DE NÍVEIS E DECLIVIDADE DA LINHA D'ÁGUA A PARTIR DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE NO RIO SÃO FRANCISCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de processos hidrológicos

Orientador: Eber José de Andrade Pinto

Coorientador: Philippe Maillard

Belo Horizonte

2021

M386o

Martins, Luana Kessia Lucas Alves.

Obtenção de níveis e declividade da linha d'água a partir de altimetria por satélite no Rio São Francisco [recurso eletrônico] / Luana Kessia Lucas Alves Martins. - 2021.

1 recurso online (xiv, 182 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Éber José de Andrade Pinto.

Coorientador: Philippe Maillard.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 171-182.

Bibliografia: f. 158-170.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Cursos de água - Fluxo - Teses. 4. Altitudes - Levantamento - Teses. 5. São Francisco, Rio - Teses. I. Pinto, Éber José de Andrade. II. Maillard, Philippe. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

**["OBTENÇÃO DE NÍVEIS E DECLIVIDADE DA LINHA DE ÁGUA A PARTIR DE ALTIMETRIA
POR SATÉLITE NO RIO SÃO FRANCISCO"]**

[Luana Kessia Lucas Alves Martins]

Tese de Doutorado] defendida e aprovada, no dia [08 de setembro de 2021], pela Banca Examinadora designada pelo [Colegiado do Programa de Pós-Graduação **EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**] da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

[Prof. Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho] - Membro Externo]

[UFRJ]

[Prof^a. Dr^a. Talita Fernanda das Graças Silva] - Membro Interno]

[UFMG]

[Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva] - Membro Externo]

[UFRGS]

[Prof. Dr. Philippe Maillard - Coorientador]

[UFMG]

[Prof. Dr. Eber José de Andrade Pinto - Orientador]

[UFMG]

APROVADA PELO COLEGIADO DO PPG SMARH

Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima - Coordenadora

Belo Horizonte, 08 de setembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Talita Fernanda das Gracas Silva, Professora do Magistério Superior**, em 09/09/2021, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eber Jose de Andrade Pinto, Professor do Magistério Superior**, em 09/09/2021, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Usuário Externo**, em 15/09/2021, às 18:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Philippe Maillard, Professor do Magistério Superior**, em 16/09/2021, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Otto Corrêa Rotunno Filho, Usuário Externo**, em 17/09/2021, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 25/10/2021, às 09:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0949500** e o código CRC **83C4BB5E**.

À Sonia Maria Lucas

(in memoriam)

Obrigada por me escolher e cuidar tantas vezes mãe. Te amo para sempre.

AGRADECIMENTOS

Obrigada meu Deus por me permitir chegar até aqui. Agradeço a Nossa Senhora Aparecida por me proteger e guiar quando eu já não tinha mais forças.

Esse Doutorado para mim é ciclo. Foi ciclo. Mas não o hidrológico. Ciclo de vida mesmo, morte e nascimento. Iniciei em 2017 e jamais imaginaria tudo que estava por vir. Perdi minha mãe com um câncer fulminante em poucos meses logo no meu primeiro ano de Doutorado. Posso dizer que as aulas e me agarrar à meta de concluir o que tinha começado me ajudaram a seguir em frente. Não foi nada fácil, empecilhos que nunca imaginei no meu caminho. Mas agora, do lado de cá no final, fecho esse Doutorado com meu primeiro filho em meu ventre, a poucas semanas de seu nascimento. Não tem tristeza nem alegria que dure para sempre. Tudo nessa vida é ciclo.

Agradeço a meu marido Juninho, por todo o apoio e paciência ao longo desses quase cinco anos entre o projeto inicial e minha defesa. Muito mais que meu suporte técnico de TI, você foi meu porto seguro e a calma que muitas vezes me faltava.

Ao Eber, obrigada por aceitar minha proposta de fazer um Doutorado lá em 2016 e me orientar nestes longos anos.

Ao Philippe, muito obrigada por me acolher em seu laboratório como se fosse um de seus orientandos e me ensinar tanto sobre satélites, altimetria, programação e até mesmo redação acadêmica.

A minha irmã Ana, meus primos Douglas e Iara, com quem sigo partilhando as dores e as delícias de estudar na UFMG, vocês são um pedaço de mim, obrigada por estarem sempre perto e me ajudando.

As minhas tantas e amadas tias, a Ro e a Nati, obrigada por se preocuparem sempre comigo.

A todos os colegas com quem dividi laboratório no IGC, especialmente Fernanda e Evelyn, obrigada por dividirem o espaço, os conhecimentos, os anseios e conquistas.

As minhas amigas, Camilla e Rúbia sempre me escutaram e ajudaram, cada uma a sua maneira, a enfrentar esse Doutorado.

A Bela, Cris e Fred, Pri, Dê e Michele, obrigada pelos incentivos de sempre.

Aos colegas de CPRM, que mesmo nos meus períodos de afastamento se fizeram presentes, em especial Edilson, Mônica, Juliani agradeço o carinho; a Cris Melo obrigada pelas partilhas minha irmã; a Mariana pela atenção e ajuda com a burocracia nessa reta final e Daniel por todo apoio técnico e acolhimento.

A Liliam, Lilian, Patrícia e Gisele, muito obrigada, pois cada uma na sua profissão me fez enxergar quando estava turvo e me fortaleceram muito além dos limites de suas supostas funções.

À CPRM, pela aprovação e liberação para eu concluir este Doutorado.

RESUMO

Mediante os desafios da produção de dados hidrológicos convencionais, a utilização de informações obtidas por sensoriamento remoto na Hidrologia já é considerada uma fonte complementar e/ou alternativa. A altimetria por satélite (AS) é uma das técnicas que fornece dados com potencial uso em estudos hidrológicos e hidráulicos. As missões espaciais com radar altimétrico ainda hoje têm foco na obtenção dos níveis dos oceanos, calotas polares e gelo de mar, entretanto inúmeros estudos vêm demonstrando ao longo de quase três décadas a viabilidade de seu uso em águas continentais, sobretudo em rios de grande porte. A consolidação de dados de altimetria em cursos d'água de médio e pequeno porte permanece como desafio, pois à medida que se trabalha com cursos d'água mais estreitos (largura inferior a 1 km) há uma série de limitações inerentes às características de operação do altímetro e processamento dos dados que impactam na acurácia do dado obtido. Contudo, os avanços tecnológicos nos altímetros e o bom número de missões previstas tornam o uso de dados de AS ainda mais promissor. Nesse contexto, a presente pesquisa objetiva avaliar a performance da AS multimissão num rio tropical de médio porte (Rio São Francisco) e seu potencial uso na obtenção de variáveis hidráulicas. Foram utilizadas cinco missões altimétricas (Envisat, Saral, Jason, Sentinel-3 e Cryosat) e dados *in situ* de doze estações fluviométricas (EFs) com nivelamento altimétrico (WGS84) num trecho de 1400 km do Rio São Francisco. O fato das EFs estarem niveladas viabilizou a comparação direta de suas séries às séries de satélite, ou seja, uma análise estatística dos desvios em termos absolutos, raramente encontrada na literatura. Ademais, os dados *in situ* foram interpolados de forma a produzir dados sincronizados ao local e horário de passagem do satélite sobre o rio, chamadas de EVs (estações virtuais), o que reduziu em 0,29 m o RMSE (*Root mean square error* – raiz do erro quadrático médio). Ao todo foram analisadas 76 EVs para os satélites de órbita fixa e 850 pontos do satélite Cryosat (órbita derivativa). A partir dos dados destas EVs foi feita a análise de desempenho para os diferentes satélites e estimado o viés característico de cada um deles, algo inédito para um rio tropical de médio porte. Outras conclusões puderam ser extraídas: as características ambientais do entorno das EVs determinam o nível dos erros para diferentes satélites ocasionando grande amplitude dos desvios; os satélites Sentinel-3 apresentam performance superior aos demais, o que é atribuído a tecnologia SAR (radar de abertura sintética) aliada ao modelo de operação que usa informação prévia da altitude do alvo (*open loop tracking mode*) e, por fim, há uma tendência geral dos satélites em superestimar os níveis d'água. A declividade da linha d'água é uma variável de grande valia em estudos hidrológicos e hidráulicos, porém de difícil obtenção com níveis de precisão aceitáveis. Na ausência de dados locais disponíveis,

tipicamente se utilizam dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 90 m. Nesse contexto, os dados consistidos de EFs niveladas e os dados livres de vieses das dezenas de EVs analisadas foram utilizados na obtenção de perfis longitudinais e de declividade da linha d'água, em diferentes escalas temporais, de forma separada e em conjunto. Os resultados obtidos, especialmente pelo modelo conjunto de EFs com EVs, foram compatíveis aos valores mencionados na literatura para o trecho do Médio Rio São Francisco, mas com uma resolução espacial superior ao SRTM.

PALAVRAS-CHAVE: séries de nível d'água; declividade da linha d'água; altimetria por satélite; Rio São Francisco; acurácia.

ABSTRACT

Given the challenges of producing conventional hydrological data, remote sensing data are a complementary and/or alternative source of information in hydrology. Satellite altimetry (SA) is one of the techniques that provides data with potential use in hydrological and hydraulic studies. Altimetric space missions are still focused on obtaining ocean levels, ice caps and sea ice, however numerous studies have demonstrated over almost three decades the viability of its use in continental waters, especially in large rivers. The consolidation of altimetric data in medium/small watercourses remains a challenge, as working with narrow watercourses (width less than 1 km) implies a series of limitations, due to the characteristics of altimeter operation and data processing. However, technological advances in altimeters and the good number of planned missions make the use of SA data even more promising. In this context, this research aims to evaluate the performance of multimission SA in a medium-sized tropical river (São Francisco River) and its potential use to obtain hydraulic variables. Five altimetric missions (Envisat, Saral, Jason, Sentinel-3 and Cryosat) and *in situ* data from twelve fluviometric stations (FS or EF in Portuguese) with altimetric leveling (WGS84) in a 1400 km stretch of the São Francisco River were used, which enabled a statistical analysis in absolute terms, rarely found in the literature. Furthermore, the *in situ* data were interpolated in order to produce data synchronized to the location and time of the satellite's passage over the river, called VSs (virtual stations or EV in Portuguese), which reduced the RMSE by 0.29 m. In all, 76 EVs were analyzed for the fixed orbit satellites and 850 points for the Cryosat satellite (derivative orbit). Based on the data from these EVs, the performance analysis for the different satellites was conducted and the characteristic bias of each of them was estimated, something unprecedented for a medium-sized tropical river. Other conclusions could be drawn: the environmental characteristics of the surroundings of the EVs determine the level of errors for different satellites causing great amplitude of the deviations; the Sentinel-3 satellites present superior performance to the others, which is attributed to the SAR (synthetic aperture radar) technology combined with the operation model that uses previous information on the target's altitude ("open loop tracking mode") and, finally, there is a general tendency for satellites to overestimate water levels. The slope of the waterline is a very valuable variable in hydrological and hydraulic studies, but it is difficult to obtain with acceptable levels of precision. In the absence of available local information, data from the SRTM mission (Shuttle Radar Topography Mission) are typically used, but its spatial resolution is 90 m. In this context, the consisted data of leveled EFs and bias-free data from dozens of analyzed EVs were used to obtain longitudinal and slope profiles of the waterline, in different temporal scales, separately

and together. The results achieved, especially by the model of EFs merged with EVs, were compatible with the values mentioned in the literature for the Middle RSF stretch, but with a better spatial resolution than SRTM.

KEY WORDS: water level series; slope of the waterline; satellite altimetry; São Francisco River; accuracy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estações e histórico da RHN (Base de dados da ANA, 2021).....	31
Figura 2.2 – Fluxograma simplificado da obtenção das séries de vazão.....	32
Figura 2.3 – Réguas instaladas na estação São Romão – Rio São Francisco.....	33
Figura 2.4 – Alturas geoidal (H), elipsoidal (h) e ondulação geoidal (N) (Fonte: IBGE, 2019)	36
Figura 2.5 – Funcionamento de (a) um radar imageador (b) radar altimétrico (Fonte: CRISP, 2020 e adaptado de ESA, 2021a)	38
Figura 2.6 – Princípio de funcionamento dos radares altimétricos (adaptado de CNES por Moreira, 2016).....	40
Figura 2.7- (a) Transição das formas de onda recebidas pelo altímetro do mar para o continente	41
Figura 2.8 – Exemplos da complexidade das formas de onda no continente que demandam a execução do “retracking”.....	42
Figura 2.9 – Ajuste realizado pelo <i>retracking</i> para determinação do <i>waveform ramp mid-point</i> numa forma de onda típica de mar (Fonte: Rosmorduc <i>et al.</i> 2018).....	43
Figura 2.10 – Diferenças na operação em modo LRM a esquerda e modo SAR ou Doppler ilustrado a direita (Fonte: adaptado de ESA, 2021a).....	44
Figura 2.11 – Principais missões de AS ao longo do tempo (as cores identificam as famílias de satélite)	45
Figura 2.12- Representação das faixas KaRIN (ou InSAR) e central do SWOT (adaptado de NASA/JPL, CNES, https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/swot).....	49
Figura 2.13 – Variáveis envolvidas na medida altimétrica (Fonte: adaptado de SARAL/AltiKa Products Handbook - CNES, 2013).....	50
Figura 2.14 – Séries altimétricas disponíveis no Hydroweb (Fonte: http://hydroweb.theia-land.fr/ , acesso em: 25 jan 2020).....	51
Figura 2.15 – Exemplo de nomenclatura de arquivo NetCDF da missão Sentinel-3B	52
Figura 2.16 – Variação do RMSE com o nível de tolerância a outliers para algumas estações no Rio São Francisco (Fonte: Maillard e Calmant; 2013).....	57
Figura 2.17 –Exemplo de fenômeno de <i>hooking</i> na margem esquerda para os perfis circulados	63
Figura 3.1 – Etapas metodológicas da pesquisa	65
Figura 3.2 – Regiões fisiográficas da bacia do Rio São Francisco.....	67
Figura 3.3 – Precipitações médias anuais e vazões específicas médias de longo termo nas áreas de drenagem dos principais afluentes e no São Francisco (estação Traipu, localizada próxima a foz) (Fonte: Pereira <i>et al.</i> , 2007)	68
Figura 3.4 – Etapas para obtenção das séries das EFs consistidas e com nivelamento altimétrico (<i>*Função acumulada de probabilidades</i>)	70
Figura 3.5 – <i>Tracks</i> dos satélites utilizados na área de interesse do RSF: (a) Satélites de órbita fixa (b) Cryosat.....	75
Figura 3.6 – Fluxo esquemático e módulos principais do SWG (versão 2021)	77
Figura 3.7 – Tela principal do SWG.....	79
Figura 3.8 - Etapas adotadas para o processamento dos dados de AS no SWG	81
Figura 3.9 –Telas do SWG: (a) Produção de múltiplas EVs (b) Remoção de outliers (c) Interpolação	81
Figura 3.10 – Fluxograma das etapas executadas para interpolação dos dados <i>in situ</i>	83
Figura 3.11 – Fluxograma das etapas realizadas para obtenção dos perfis longitudinais e de declividades com dados de EFs e EVs em separado e em conjunto.....	89
Figura 3.12 – Série de nível do S-3B no km 884 do RSF interpolada pelo método spline.....	91
Figura 4.1 – Séries temporais de nível d’água médio diário das estações fluviométricas niveladas nos trechos: Três Marias a Sobradinho e Sobradinho a Santa Maria a Boa Vista ...	95

Figura 4.2 Função Acumulada de Probabilidades da oscilação de níveis das EFs de interesse no RSF	98
Figura 4.3 – Seções transversais medidas no RSF para as EFs no trecho entre Pirapora e Carinhanha.....	99
Figura 4.4 – Área de estudo e articulações 1 a 4 com as EVs (VHSs- <i>Virtual hydrological stations</i>) e EFs (ISHS – <i>in situ hydrological stations</i>) em detalhe.....	101
Figura 4.5 – Trechos do RSF utilizados na validação dos dados	102
Figura 4.6 – Fluxograma dos grupos de EVs e tipos de análise executadas (IT=interpolação temporal e ITE=interpolação no tempo e espaço).....	103
Figura 4.7 – Otimismo da análise relativa em relação as demais análises por EV (otimismo = $(RMSE_{analise} - RMSE_{relativa})/RMSE_{analise}$ *análises = IT, ITE, absoluta).....	109
Figura 4.8 – RMSE e AME para os diferentes tipos de análise (*2 EVs do Saral ocultadas).....	110
Figura 4.9 - Coeficiente de correlação das 33VHS para cada tipo de análise.....	111
Figura 4.10 – RMSE das 43 EVs do grupo 2 para IT e para ITE.....	114
Figura 4.11 – RMSE das 43 EVs do grupo 2 para IT e para ITE.....	114
Figura 4.12 – Coeficiente de correlação das 43 EVs do grupo 2 para IT e para ITE.....	115
Figura 4.13 – Regressão linear entre as cotas interpoladas e cotas <i>in situ</i> monitoradas para as EFs.....	116
Figura 4.14 – Taxa de eficiência amostral por satélite	120
Figura 4.15 – Métricas resumidas por satélite (a) RMSE (b) AME (*3 outliers do Saral ocultados)	121
Figura 4.16 - ME por satélite (*3 outliers do Saral ocultados).....	121
Figura 4.17 - Métricas resumidas por satélite (a) ME (b) R (*3 outliers do Saral ocultados).....	123
Figura 4.18 – Variação de erros ao longo do RSF: (a) RMSE (b) AME (c) ME (d) R.....	127
Figura 4.19 – Dados da EV 54 do S-3A e dados <i>in situ</i> : (a) Níveis d’água <i>in situ</i> x S-3A (b) Níveis d’água ao longo do tempo	128
Figura 4.20 – Série temporal multimissão de níveis d’água nas proximidades da EF São Romão com dados <i>in situ</i> originais (linha contínua) e interpolados por EV (pontos em cinza)	128
Figura 4.21 – Cobertura do solo nas proximidades de EFs do RSF: (a) São Romão (b) São Francisco (c) Pedras de Maria da Cruz (d) Juazeiro a Santa Maria da Boa Vista.....	131
Figura 4.22 – Série temporal de níveis d’água nas EVs 45/52 do J-2 e J-3 e dados <i>in situ</i> interpolados (ITE).....	131
Figura 4.23 – Variação do ME para o Cryosat (a) entre as EFs Pirapora e CManteiga (b) entre as EFs Juazeiro e SMBVista (* 4 outliers superiores a 15m).....	133
Figura 4.24 – Histograma dos erros médios das 850 EVs do Cryosat	134
Figura 4.25 – Perfil longitudinal do RSF para diferentes modelos geoidais no trecho entre as EFs Pirapora e Carinhanha para as médias de nível d’água de 2002 a 2020	138
Figura 4.26 – Perfil de declividades da linha d’água do RSF para diferentes modelos geoidais no trecho entre as EFs Pirapora e Carinhanha para as declividades médias do período de 2002 a 2020	138
Figura 4.27 – Perfis diários de declividades da linha d’água do RSF para alguns anos hidrológicos	139
Figura 4.28 – Perfis de linha d’água do RSF a partir de cotas altimétricas <i>in situ</i> no trecho da EF Pirapora a EF Carinhanha (a) Médias mensais (2002 a 2020) (b) Médias mensais - detalhe da EF Pirapora a EF São Francisco (c) Médias mensais - detalhe da EF São Francisco a EF Carinhanha (d) Médias do período seco e chuvoso	141
Figura 4.29 – Perfis de declividade linha d’água do RSF a partir de cotas altimétricas <i>in situ</i> no trecho da EF Pirapora a EF Carinhanha para o período de 2002 a 2020 (a) Por mês (b) Para o período seco e chuvoso.....	142
Figura 4.30 – Dados de satélite disponíveis e dados de EFs (interpolados pela ITE e médios para período seco/chuvoso) ao longo do RSF para o período de 2002 a 2020.....	144

Figura 4.31 – Perfil da linha d’água para o período seco e chuvoso a partir de dados de todas as EVs <i>versus</i> EFs	144
Figura 4.32 – Valores de declividade diárias a partir de EVs dos satélites (a) Missões de órbita fixa (b) Satélite Cryosat.....	145
Figura 4.33 – Interpolação dos dados originais das EVs (pontos vermelhos) para o nível diário (linha preta contínua) (a) Interpolação linear - Envisat-X km 689 (b) Interpolação spline de Akima - Envisat-X km 689 (c) Interpolação linear - Jason-3 km 806 (d) Interpolação spline de Akima - Jason-3 km 806.....	147
Figura 4.34 – Valores de declividade mensais a partir de dados das EVs interpolados para nível diário.....	148
Figura 4.35 – Perfis de declividade mensais a partir de dados das EVs interpolados para nível diário sem outliers	148
Figura 4.36 – Perfil da linha d’água com dados do Cryosat para período seco e período chuvoso.....	149
Figura 4.37 – Janelas espaciais de 100 km para o mês 1 e sobreposição de 0%.....	150
Figura 4.38 – Janelas espaciais de 50 km para o mês 1 e sobreposição de 0%.....	151
Figura 4.39 – Perfis de declividade mensais para janela espacial de 100 km antes e depois da remoção de outliers e diferentes opções de sobreposição	152
Figura 4.40 – Perfis de declividade mensais com diferentes sobreposições para as janelas espaciais de 50 km (a, b, c) e 25km (d, e, f).....	155
Figura 4.41 – Perfis de declividade por período do ano hidrológico para as regressões RL, RP1 e RP2 (janela espacial de 100 km, sobreposição de 50%).....	156
Figura 4.42 – Perfis de declividade por período seco/chuvoso para diferentes janelas espaciais	159
Figura 4.43 – Modelo de declividades para o período seco/chuvoso a partir de dados de EVs e EFs e SRTM para o trecho	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais missões espaciais com altímetro a bordo e respectivas características de ciclo.....	46
Tabela 2.2 – Principais ferramentas existentes para processamento de dados de AS.....	53
Tabela 2.3 – Amostra de estudos recentes de AS em rios e lagos e erros relativos obtidos (<i>*únicos estudos que consideraram RMSE absoluto</i>).....	56
Tabela 2.4 – Vieses estimados para dados de AS em diferentes estudos (em negrito os estudos feitos em rios).....	59
Tabela 3.1 – Características hidroclimáticas das regiões hidrográficas do Rio São Francisco	66
Tabela 3.2 – Estações fluviométricas de interesse no Rio São Francisco e oscilação de nível entre leituras diárias.....	70
Tabela 3.3 – Dados das missões altimétricas utilizadas na pesquisa.....	73
Tabela 3.4 – Tempos de escoamento e velocidade média estimados para algumas estações no Rio São Francisco (baseado na série histórica de medições completa das estações).....	82
Tabela 3.5 – Pesos adotados por tipos de regressão testados.....	93
Tabela 4.1 – Estações com nivelamento altimétrico no Rio São Francisco (WGS84).....	94
Tabela 4.2 – Estatísticas das séries de nível d’água das EFs de interesse no RSF de 2000 a 2020 em metros.....	96
Tabela 4.3 – Estatísticas das séries parâmetros medidos nas EFs de interesse para cálculo de declividades no RSF.....	100
Tabela 4.4 -Número de EVs de cada satélite por grupo de análise.....	103
Tabela 4.5 – Estatísticas de erros para o grupo 1: 33 EVs (D<15 km).....	105
Tabela 4.6 – Estatísticas de erros para o grupo 2: 43 EVs (D>15 km).....	112
Tabela 4.7 – Erros para as cotas interpoladas (ITE) comparadas às cotas <i>in situ</i> monitoradas no local da EF.....	115
Tabela 4.8 - Estatísticas médias por satélite (melhores valores em destaque).....	117
Tabela 4.9 – Erros e correlação para as 76 EVs agrupadas por satélite.....	117
Tabela 4.10 – Erros e correlação por trechos ao longo do RSF.....	125
Tabela 4.11 – Taxa de eficiência amostral do Cryosat.....	132
Tabela 4.12 – Estatísticas médias das EVs do Cryosat a menos de 15 km das EFs e dos demais satélites para comparação (<i>*desconsiderando 2 outliers de PMCruz</i>).....	134
Tabela 4.13 – ME e AME discrepantes para algumas EVs entre Juazeiro e SMBVista.....	135
Tabela 4.14 – Vieses estimados por missão para o RSF.....	136
Tabela 4.15 – Declividades médias mensais por trecho estudado no RSF obtidas a partir de dados das EFs (vermelho indica declividades mais elevadas e verde mais baixas).....	143
Tabela 4.16 – Informações sobre as EVs utilizadas no cálculo das declividades diárias por satélite.....	146
Tabela 4.17 – Opções de seleção e análise dos dados testadas para o modelo de declividades.....	149
Tabela 4.18 – Resoluções espaciais dos perfis de declividade.....	149
Tabela 4.19 – Declividades mensais obtidas com resolução de 50 km a partir de dados de EVs e EFs (vermelho indica declividades mais elevadas e verde mais baixas).....	155
Tabela 4.20 – Diferenças percentuais entre as regressões RL, RP1 e RP2.....	157
Tabela 4.21 - Modelo de declividades para o período seco/chuvoso a partir de dados de EVs e EFs.....	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP - *Acoustic doppler current profiler*
ALOS - *Advanced Land Observing Satellite*
AME - *Absolute Mean Error* (erro médio absoluto)
ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ARP- *Antenna Reference Point*
AS - Altimetria por satélites radar
AVISO - *Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques.*
BRAT - *Broadview Radar Altimetry Toolbox*
cal/val – calibração/validação
CNES - *Centre National d'Études Spatiales*
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTOH - *Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere*
DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
Doris - *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*
EF - estação fluviométrica
EGM96 - *Earth Gravity Model*
EIGEN - *European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*
ESA - *European Space Agency*
EV - estação virtual
FAP - Função Acumulada de Probabilidades
FIQ - Faixa Interquartil
GDR - Geophysical Data Records
GNSS - *Global Navigation Satellite System*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS- *International Earth rotation and Reference Systems Service*
IRD - *Institut de recherche pour le développement*
ISPRS - *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*
ISRO - *Indian Space Research Organization*
IT – interpolação temporal
ITE - interpolação no tempo e espaço
J-2 – Jason-2
J-3 – Jason-3
LEGOS - *Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales*
LRM - *Low Resolution Mode*
ME – *Mean Error* (erro médio)
MDE - Modelo Digital de Elevação
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
 η_{eff} - Taxa de eficiência de amostragem
NetCDF - *Network Common Data Form*
NRCan - *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada*
OLTC - *Open loop tracking comand*
OLTM - *Open loop tracking mode*
PCD - Plataforma de coleta de dados
Radar - *Radio Detection and Ranging*
RHN - Rede Hidrometeorológica Nacional
RL – Regressão linear
RMSE – *Root Mean Square Error* (raiz do erro quadrático médio)
RP – Regressão ponderada
RRMSE - *Relative Root Mean Square Error* (raiz do erro quadrático médio relativo)
RSF – Rio São Francisco

SAR - *Synthetic Aperture Radar*
SARin - SAR interferométrico
SLR - *Satellite Laser Ranging*
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
SWG - *Satellite Water Gauging*
SWOT - *Surface Water and Ocean Topography*
S-3A- Sentinel-3A
S-3B- Sentinel-3B
VALS - *Virtual Altimetry Station*
XGM - *Gravity Field Model*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	21
1.2	RELEVÂNCIA E ORIGINALIDADE DA PESQUISA	24
1.3	OBJETIVOS	27
1.4	ESTRUTURA PROPOSTA PARA A TESE	28
2	REVISÃO DA LITERATURA	30
2.1	MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO	30
2.1.1	Rede de monitoramento nacional	30
2.1.2	Medição de variáveis hidrológicas	31
2.1.3	Uso de dados de sensoriamento remoto na Hidrologia	37
2.2	ALTIMETRIA POR SATÉLITE - AS	38
2.2.1	Princípio de funcionamento do radar altimétrico	38
2.2.2	Breve histórico das missões altimétricas	44
2.2.3	Obtenção e processamento dos dados de AS	49
2.3	APLICAÇÕES DA AS À HIDROLOGIA FLUVIAL	54
2.3.1	Estudos de validação de séries de AS	54
2.3.2	Estimativa de viés dos dados de AS	57
2.3.3	Obtenção de variáveis hidrológicas a partir de AS	60
2.3.4	Limitações em rios de médio e pequeno porte	62
3	MATERIAL E MÉTODOS	65
3.1	ÁREA DE ESTUDO: RIO SÃO FRANCISCO	65
3.2	SÉRIES DE DADOS IN SITU	69
3.3	VALIDAÇÃO DOS DADOS DE AS	72
3.3.1	Caracterização das missões altimétricas	72
3.3.2	Obtenção e processamento dos dados no SWG	75
3.3.3	Interpolação dos dados in situ (EFs)	81
3.3.4	Análise de qualidade das séries das estações virtuais (EVs)	84
3.4	VIÉS DAS MISSÕES ALTIMÉTRICAS	86
3.5	DECLIVIDADE DA LINHA D'ÁGUA	87
3.5.1	Construção de perfis a partir das séries de EFs	89
3.5.2	Construção de perfis a partir das séries de EVs	90
3.5.3	Modelo de declividades a partir de dados de EVs e EFs	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
4.1	ANÁLISE DAS SÉRIES DE DADOS IN SITU	94
4.2	INTERPOLAÇÃO DOS DADOS IN SITU	100
4.2.1	Grupo 1: 33EVs com $D < 15$ km de EFs	103
4.2.2	Grupo 2: 43EVs com $D > 15$ km de EFs	111
4.2.3	Validação da metodologia ITE	115
4.3	PERFORMANCE DOS SATÉLITES COM ÓRBITA FIXA	116
4.3.1	η_{eff} – taxa de eficiência amostral	119
4.3.2	RMSE e AME	120
4.3.3	Erro médio - ME	121
4.3.4	Coefficiente de correlação – R	122
4.3.5	Análise geral da performance	123
4.4	ANÁLISE DOS ERROS AO LONGO DO RIO SÃO FRANCISCO	124
4.5	INTERPOLAÇÃO E PERFORMANCE DO CRYOSAT	131
4.6	ESTIMATIVA DE VIÉS	135
4.7	DECLIVIDADE DA LINHA D'ÁGUA	137
4.7.1	Análise dos modelos geoidais	137
4.7.2	Declividade com dados das EFs	138
4.7.3	Declividade com dados das EVs	143
4.7.4	Modelo de declividades a partir de dados de EVs e EFs	149
4.8	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	160
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	165

5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
5.2	CONCLUSÕES	166
5.3	RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	168
REFERÊNCIAS		171
APÊNDICE 1 – Artigo apresentado no XXIII SBRH		184
APÊNDICE 2 – Artigo publicado na Revista Brasileira de Recursos Hídricos		185
APÊNDICE 3 – Artigo em análise no Journal of Hydrology.....		186
APÊNDICE 4 – Perfis de Declividade diários por Ano Hidrológico.....		187

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A geração de dados hidrológicos básicos como séries históricas de níveis e de chuva, medições de vazão e cálculo de declividades são essenciais para acompanhar a situação da bacia hidrográfica, assim como para elaboração de estudos que permitam aprimorar sua compreensão e representação. Conforme Roux *et al.* (2008), a instalação e manutenção de uma rede de monitoramento convencional é uma atividade complexa e que envolve elevados custos. É necessária a atuação de equipes bem treinadas, utilização de equipamentos especializados e calibrados, bem como aquisição de dados numa frequência e período adequados visando à geração de dados de qualidade.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) é responsável pelo gerenciamento da rede Hidrometeorológica Nacional que envolve várias entidades públicas e privadas, sendo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) a operadora de maior parte das estações em território nacional (CPRM, 2019). A realidade brasileira envolve os desafios de manutenção e operação de uma rede com vários atores, num país de escala continental. Atualmente, há regiões com baixa densidade de estações, como a Amazônia, por exemplo, e o dado hidrológico pode levar até um ano para ser disponibilizado (Silva J. *et al.*, 2014).

A utilização de dados obtidos por sensoriamento remoto na Hidrologia já é considerada uma fonte complementar e/ou alternativa (Lettenmaier *et al.*, 2015). A informação propiciada por satélites de observação da Terra permite uma visualização da superfície em escala continental, de forma homogênea, contínua e frequente, sobretudo com cobertura espacial diferenciada em relação às redes de monitoramento convencionais (Tarpanelli *et al.*, 2013).

A altimetria por satélite (AS) é uma das técnicas capaz de fornecer dados valiosos para estudos hidrológicos e hidráulicos (Domeneghetti *et al.*, 2021). As missões espaciais com radar altimétrico ainda hoje têm foco principal na obtenção dos níveis dos oceanos, calotas polares e gelo de mar, entretanto estudos vêm demonstrando ao longo de quase três décadas a viabilidade de seu uso em águas continentais, sobretudo em lagos e rios de grande porte (Chen *et al.*, 2021). Em particular, a Bacia Amazônica se consolidou como celeiro de validação de dados altimétricos em decorrência de sua importância mundial, dificuldade de acesso e a magnitude da sua extensão e largura dos cursos d'água, o que viabilizou grandes faixas de aquisição de dados fluviométricos via sensoriamento remoto (Getirana, 2009; Moreira, 2016).

Uma mesma missão de AS pode ser composta por satélites subsequentes no tempo ocupando a mesma órbita (por exemplo, a família Jason) ou que operam simultaneamente em órbitas complementares (por exemplo, a família Sentinel-3). Os satélites com radar altimétricos sobrevoam o mesmo traço em intervalos fixos, chamados ciclos repetitivos ou tempo de revisita, que são tipicamente entre 10 a 35 dias. Os ciclos dependem dos parâmetros pré-definidos pela órbita em função dos objetivos centrais da missão (Aviso, 2021). Assim, a frequência de obtenção dos dados de altimetria espacial pode ser apontada como uma desvantagem, considerando que nas estações *in situ* a obtenção do dado de nível é diária, através de observador (duas leituras por dia, às 7h e às 17h) ou sensores automáticos (leitura contínua). Tal limitação pode ser minimizada utilizando uma abordagem multimissão através da construção de séries temporais com dados de várias missões altimétricas que possuem traços que cobrem uma mesma seção transversal ou suas proximidades (Jarihani *et al.*, 2013; Tourian *et al.*, 2016).

As seções do rio que são interceptadas por um traço do satélite constituem potenciais estações virtuais (EV). De forma a estimar a precisão das séries de altimetria espacial (referência altimétrica absoluta), elas são tipicamente comparadas às séries das estações fluviométricas (EF) próximas, que possuem apenas uma referência de elevação local. Essa proximidade reduz os erros causados pela declividade da linha d'água. Procede-se então a um ajuste das duas referências altimétricas a partir de medidas de tendência central das séries. Assim é apenas o erro relativo que pode ser analisado, o que resulta em uma visão otimista dos desvios absolutos entre as séries (Bercher, 2008; Jarihani *et al.*, 2013). Considerando a análise de erro relativo, a precisão dos níveis d'água obtidos pelos altímetros está na ordem de decímetros, mesmo com a evolução destes instrumentos nos últimos anos (Tourian *et al.*, 2016; Normadin *et al.*, 2018). Nos raros estudos que consideram desvios absolutos, os erros atingem a ordem de algumas unidades ou até dezenas de metros, como em Biancamaria *et al.* (2017) e Pereira (2018). É válido ressaltar que uma parcela dos erros de altimetria se refere a um erro sistemático (viés), que pode ser estimado pela atividade de calibração, na qual tipicamente se comparam dados de AS a níveis d'água obtidos independentemente, por estações de maré ou GPS acoplados a boias (Bosch *et al.*, 2014). A atividade de calibração é largamente realizada em lagos e oceanos, havendo uma lacuna desta informação para rios a despeito da importância da estimativa do viés, especialmente em trabalhos que combinam séries multimissão (Calmant *et al.*, 2013; Tourian *et al.*, 2016; Quartly *et al.*, 2021).

O emprego dos dados de satélite gera economia dos gastos de aquisição e instalação de novos equipamentos, bem como dos custos operacionais de leituras diárias ou deslocamento de

equipes para realização de medições, sendo que em alguns locais o acesso é complicado e perigoso ou até mesmo inviável (Sichangi *et al.*, 2018; Calmant *et al.*, 2013). Assim, trechos de cursos d'água que não podem ser monitorados por estações *in situ* podem ser observados por satélite. Outro ponto diferencial é o fato de que as estações fluviométricas são niveladas utilizando uma referência local, já as informações obtidas com satélite fornecem dados altimétricos com referência a um sistema único e global de elipsoides, tal como o WGS84. Tal fato viabiliza o cálculo da declividade da linha d'água entre pontos de um curso d'água, conforme realizado por Getirana *et. al* (2009) e Leon *et al.* (2006).

Tipicamente, os arquivos de dados de AS são disponibilizados gratuitamente nos sites e plataformas das Agências espaciais no formato *Network Common Data Form* (NetCDF). A altimetria por satélite exige que muita informação seja levada em consideração antes de ser possível usar os dados, sendo o processamento destes uma parte importante do processo de obtenção dos níveis d'água. Vários dados auxiliares são utilizados, sobretudo para obter as correções necessárias para gerar dados de mais alta qualidade (Rosmorduc *et al.*, 2018). O profissional apto a gerar e analisar séries nível d'água a de AS em águas continentais, além dos conhecimentos de Hidrologia, precisa saber programar, conhecer ferramentas de geoprocessamento e se aprofundar em conhecimentos de altimetria espacial. Alguns *softwares* e plataformas online foram desenvolvidos ao longo dos anos visando facilitar o processamento de dados pelo usuário final, entretanto são poucas opções disponíveis e a maioria envolve processamento manual dos dados para cada EV. Considerando as limitações dos métodos manuais e necessidade de processos mais automatizados de obtenção das séries, Maillard e Calmant (2013) propuseram o *Satellite Water Gauging* (SWG). Trata-se de uma ferramenta disponibilizada gratuitamente na página da UFMG, de código aberto, o que viabiliza a implementação de novas rotinas conforme necessidade do usuário. Frequentemente, em trabalhos que utilizam os dados de AS (Paiva *et al.* (2013 b), Paris *et al.* (2016), Moreira (2016), Possa (2020)), as séries de nível d'água são obtidas prontas de outros estudos ou base de dados, especialmente na Amazônia onde inúmeras pesquisas foram desenvolvidas (Fassoni-Andrade *et al.*, no prelo). No caso de rios de médio porte, como o Rio São Francisco (RSF), usualmente não há série de dados multimissão disponíveis. Este é um dos desafios da AS, tornar o produto final (séries de nível d'água) ampla e diretamente disponível ao usuário (Markert *et al.*, 2019).

Outro aspecto relevante na análise de qualidade das séries altimétricas é o aproveitamento de dados para uma dada EV. Isto porque em algumas passagens o satélite pode não obter informações adequadas sobre o nível d'água em decorrência de uma série de fenômenos como deriva da órbita nominal, reinicialização do altímetro por perda de ancoragem ou qualquer

anomalia que comprometa seu funcionamento. Para a missão Saral, por exemplo, há relatos de perda significativa de dados, sobretudo para vales de rios estreitos e encaixados. Um dado acurado, mas numa frequência muito baixa pode não ser muito útil. A típica resolução temporal dos satélites já é relativamente baixa quando comparada aos dados *in situ* e pode piorar caso haja uma taxa de perda de amostragem elevada (Bercher, 2008; Maillard *et al.*, 2015; Biancamaria *et al.*, 2017).

A largura dos cursos de água representa outro fator limitante para uso de dados de altimetria por satélite. A maior parte dos estudos de altimetria por radar consolidados nas últimas décadas focam em grandes sistemas hídricos. A influência da largura do curso d'água para utilização dos dados de altimetria espacial tem sido uma questão bastante discutida nas últimas duas décadas (Calmant e Seyler, 2006; Maillard *et al.*, 2015; Biancamaria *et al.*, 2018; Coss *et al.*, 2020), devido às limitações inerentes ao tamanho do *footprint* (pegada) dos altímetros operando no modo de baixa resolução (*Low Resolution Mode* - LRM). Isto limita o potencial de se obter dados acurados para rios de menor porte (abaixo de 1 km). Entretanto, o recente desenvolvimento e lançamento de altímetros com melhor capacidade de obtenção de dados em águas continentais devem ser vistos como propulsores de uma nova fase do uso de dados de satélite na Hidrologia: precisões e acurácias cada vez melhores em rios cada vez mais estreitos (Lettenmaier *et al.*, 2015). Ademais, a resolução temporal das séries de EFs aliada à referência altimétrica global dos dados de satélite permite ganhos importantes de cobertura espacial que seriam impensáveis para a rede de monitoramento *in situ* convencional (Bjerklie *et al.*, 2003).

A recente missão Sentinel-6 (também chamada de Jason-CS) e a futura missão SWOT (lançamento em 2022) apresentam configurações dos altímetros e parâmetros de operação que devem prover melhorias significativas na acurácia dos dados altimétricos para cursos d'água de menor porte. Especialmente o satélite SWOT, promete revolucionar a aquisição de dados hidrológicos por satélite, à medida que proverá diretamente estimativas de vazão a partir de medições simultâneas de nível d'água, largura e declividade. (Aviso, 2021; Biancamaria *et al.*, 2016).

1.2 Relevância e originalidade da pesquisa

As dificuldades inerentes à geração de dados hidrológicos de maneira tradicional refletem na baixa densidade e má distribuição de estações fluviométricas no Brasil (Silva J., 2010). Assim, o uso de tecnologias que forneçam gratuitamente dados hidrológicos é de interesse direto de

toda a comunidade de Hidrologia e, indiretamente, daqueles que são afetados por estudos e projetos que usem esses dados.

A utilização de dados de sensoriamento remoto para monitoramento de rios e lagos vem numa crescente desde a década de 70 (Mertes *et al.*, 2004; Lettenmaier *et al.*, 2015). Entretanto o uso de dados de radares altimétricos é um tema relativamente novo, data de 1993 o estudo pioneiro desenvolvido por Koblinsky *et al.* com dados do Geosat na Amazônia. A AS provou ser uma fonte complementar e, por vezes, alternativa aos dados *in situ* ao longo das últimas décadas (Markert *et al.*, 2019). No contexto mundial, há um número significativo de estudos sobre o uso de radar altimétrico aplicado a rios, especialmente direcionados a Bacia Amazônica. Entretanto, a AS é recente na Hidrologia brasileira, sendo até mesmo desconhecida para alguns dos atores envolvidos na gestão de recursos hídricos em nosso país. Os estudos pioneiros de autoria nacional têm pouco mais de uma década (Getirana, 2009; Silva J., 2010).

Tal realidade está sendo modificada aos poucos, com a inclusão da temática em lugar de destaque em importantes eventos na área de Recursos Hídricos, como o Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ocorrido em nov/2019 em Foz do Iguaçu e o que ocorrerá em Belo Horizonte em nov/2021. Cita-se também o *South America Water from Space II*, uma conferência internacional realizada em nov/2019, em Manaus, sobre Hidrologia espacial. Vem crescendo também a realização de seminários e palestras no contexto de parcerias firmadas entre o IRD (*Institut de recherche pour le développement*) e instituições diversas.

O grupo de pesquisa do laboratório de Geoprocessamento do Instituto de Geociências da UFMG (UFMG, 2020) é pioneiro na consolidação de estudos de altimetria espacial fora da bacia Amazônica. O foco do trabalho tem sido a bacia do Rio São Francisco, mais especificamente sua calha principal. É importante ressaltar que apesar da sua magnitude e importância socioeconômica, na maioria dos trechos o Rio São Francisco pode ser considerado como um rio estreito ou de médio porte para aplicações de AS em Hidrologia. Os trabalhos de Maillard *et al.* (2015) e Pereira (2018) avaliaram as limitações de se trabalhar no São Francisco e quantificaram os desvios de algumas EVs das missões Envisat, Saral e Sentinel 3-A em relação às EFs. Os resultados obtidos foram compatíveis aos descritos na literatura (erros decimétricos) até mesmo para rios de grande porte. Pereira (2018) é um dos poucos autores que procedeu à análise do erro absoluto das séries altimétricas, mas se limitou a três estações virtuais.

É necessário exaurir ao máximo o potencial da aplicabilidade dos dados de satélite à Hidrologia e difundir seu uso. Há inúmeros estudos de consolidação de séries altimétricas de diferentes missões e comparação com dados de estações *in situ*, mas majoritariamente são dedicados a grandes sistemas hídricos e a análise de qualidade utiliza o erro relativo devido à ausência da referência altimétrica absoluta (Biancamaria *et al.*, 2017). A maioria dos estudos utiliza uma missão altimétrica ou missões consecutivas (ocupam a mesma órbita) na estimativa de níveis d'água (Schwatke *et al.*, 2015). Além disso, não se encontra referência de vieses para missões de AS em rios de médio/pequeno porte (Tourian *et al.*, 2016). Outro ponto crítico do uso de dados de AS é o tempo gasto com o *download* e processamento dos dados, especialmente para múltiplas EVs com os aplicativos disponíveis (Markert *et al.*, 2019).

Considerando a realidade brasileira de produção de dados *in situ* e face ao contexto dos estudos de AS, bem como o lançamento de missões altimétricas com novas tecnologias e potencialidades, é de suma importância conhecer ampla e profundamente os produtos que a AS pode propiciar. O uso de informações de satélite na Hidrologia, em sinergia ou não com dados *in situ*, passa pelo conhecimento amplo e detalhado dos erros característicos destes dados, seus níveis de acurácia e precisão, e possíveis falhas.

Neste contexto, a presente pesquisa visa contribuir no preenchimento de algumas lacunas da AS acima mencionadas, a começar pela seleção da área de estudo, um rio tropical brasileiro de médio porte, o Rio São Francisco, passando por uma ampla caracterização dos erros de diferentes missões (sendo quase uma dezena de satélites), em termos absolutos, bem como seus vieses. Em oportuno, além das séries de nível d'água serão produzidos perfis longitudinais da linha d'água e de declividade. A estimativa de viés e análise de desempenho para nove diferentes satélites num rio tropical de médio porte é algo inédito.

A proposta é realizar uma análise aprofundada e extensiva das séries de AS e seus respectivos desvios absolutos de forma a permitir conclusões consistentes sobre cada satélite/missão e sobre o uso da altimetria num rio como o São Francisco (médio porte). Os trabalhos já realizados no Rio São Francisco não consideraram erros absolutos (caso de Maillard *et al.*, 2015), analisaram menos de uma dezena de EVs (caso de Pereira, 2018) e ambos estudos avaliaram apenas três satélites (Envisat, Saral e Sentinel-3A), impossibilitando assim uma análise de desempenho em termos absolutos mais completa e aprofundada dos desvios. A utilização de dados de quase uma dezena de satélites não é uma abordagem muito frequente na literatura, pois demanda compreensão e análise de diferentes tipos de arquivo de dados, modos de operação e processamento diferentes para cada missão. Por um lado isso permite um ganho de cobertura

espacial e temporal, mas além da demanda operacional em lidar com um grande volume de informação, implica compreender os avanços tecnológicos, especificidades técnicas e de que forma esses parâmetros propiciam uma performance melhor da missão no fornecimento de dados hidrológicos, bem como suas respectivas limitações. Assim, para o processamento dos dados propõe-se o uso do software brasileiro SWG, originalmente proposto por Maillard e Calmant (2013), por ser *open-source*, viabilizando seu aperfeiçoamento para uso em cinco diferentes missões, bem como a implementação de um módulo de interpolação das séries das EFs, visando geração de dados sincronizados (no tempo e espaço) à passagem do satélite.

O conjunto de aspectos a seguir atribuí à pesquisa caráter relevante e original:

- a abordagem com cinco missões altimétricas (oito diferentes satélites, sendo o Envisat em duas órbitas) com diferentes tecnologias e especificações técnicas, distintas coberturas espaciais e temporais, permitindo a criação de dezenas de estações virtuais;
- utilização da referência altimétrica global das estações fluviométricas para análise do erro absoluto das séries altimétricas;
- utilização de dados *in situ* consistidos e interpolados antes de proceder a validação dos dados de satélite, assegurando assim que os desvios entre as séries não sejam em função de erros grosseiros das EFs;
- estimativa de vieses de diferentes missões para um rio de médio porte de região tropical;
- proposição de um modelo de declividades para um trecho do Rio São Francisco a partir de dados de EVs em conjunto com dados de EFs.

1.3 Objetivos

O objetivo geral é avaliar a performance da altimetria por satélite multimissão num rio tropical de médio porte e seu potencial uso na obtenção de níveis e declividade da linha d'água. Os objetivos específicos são:

- Implementar melhorias em *software* de processamento de dados de altimetria por satélite (SWG) para viabilizar obtenção de séries de nível de cinco diferentes missões;
- Desenvolver metodologia de interpolação de dados de estações fluviométricas visando produção de dados *in situ* sincronizados aos dados de satélite para uma comparação direta mais adequada (implementação de novo módulo no SWG);

- Avaliar a acurácia das séries de nível de altimetria por satélite através de diferentes métricas estatísticas, em termos absolutos;
- Analisar a performance das diferentes missões de altimetria por satélite em um rio tropical de médio porte, bem como a variação desse desempenho ao longo do Rio São Francisco em decorrência de fatores ambientais;
- Documentar os vieses das missões de altimetria por satélite empregadas no estudo;
- Consolidar caracterização espaço temporal da declividade da linha d'água no Rio São Francisco.

1.4 Estrutura proposta para a tese

A tese é composta por cinco capítulos, sendo este primeiro introdutório do tema. Foi feita a contextualização da problemática visando esclarecer em que ponto se insere a proposta da pesquisa, sua originalidade e relevância, bem como objetivos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura. Inicia-se com uma descrição do monitoramento hidrológico desde a forma convencional até as formas mais recentes com emprego de dados de sensoriamento remoto. O segundo item trata da altimetria espacial contemplando: princípio de funcionamento do radar e histórico das missões, obtenção e processamento dos dados das missões altimétricas. O último item é dedicado às aplicações da AS na Hidrologia fluvial, traçando um panorama dos estudos científicos da área, seus potenciais e lacunas. O intuito é delimitar o cenário geral do uso de dados de radar altimétrico no contexto mundial e brasileiro e estabelecer as bases necessárias para consolidação da pesquisa.

No Capítulo 3 são apresentados os Materiais e métodos utilizados na pesquisa, a começar pela caracterização da área de estudo: o Rio São Francisco. Segue-se um item sobre os procedimentos adotados para a análise e correção das séries de dados das estações fluviométricas. Os dois próximos itens se referem à validação dos dados de AS, incluindo a metodologia de interpolação, e a estimativa de vieses das missões. Por fim é apresentada a metodologia utilizada para construção dos perfis de declividade da linha d'água.

O Capítulo 4 traz os resultados e discussões consolidados, compreendendo subitens similares aos do capítulo de Materiais e métodos, acrescidos da análise de performance dos satélites de órbita fixa e do Cryosat e de uma análise de erros ao longo do RSF.

O Capítulo 5 apresenta as Conclusões e recomendações a respeito do trabalho desenvolvido.

Parte dos resultados da pesquisa está contemplada em três artigos: o primeiro sobre a obtenção do perfil longitudinal do Rio São Francisco a partir de dados da missão Cryosat, (Apêndice 1 – Artigo apresentado no XXIII SBRH); um segundo, publicado na RBRH, sobre a qualidade das séries altimétricas multimissão em algumas EVs próximas a EFs (Apêndice 2 – Artigo publicado na Revista Brasileira de Recursos Hídricos) e um terceiro em análise junto ao *Journal of Hydrology* (Apêndice 3 – Artigo em análise no Journal of Hydrology), focado na análise da performance de quatro missões altimétricas a partir da interpolação dos dados *in situ*. Pretende-se publicar futuramente as demais contribuições da tese.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 *Monitoramento fluviométrico*

2.1.1 Rede de monitoramento nacional

O monitoramento hidrológico no Brasil foi iniciado no século XIX por empresas que precisavam dos dados hidrológicos para sua operação e planejamento. No início do século XX o governo federal incorporou o monitoramento como serviço público federal e passou a criar instituições que o abrigassem. A primeira delas foi o DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas). A partir daí a rede de monitoramento hidrológico brasileira teve sua história fortemente vinculada ao desenvolvimento do setor hidrelétrico do país. Somente nos anos 2000 a responsabilidade de gestão da rede passou a ser atribuição da Agência Nacional de Águas e Saneamento básico, criada para este fim dentre outros (ANA, 2019a).

Atualmente a ANA coordena a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), que possui mais de quatro mil pontos de monitoramento, dentre estações fluviométricas e de pluviometria. A operação da RHN é realizada por instituições públicas e privadas, por meio de parcerias ou contratos. A CPRM é responsável pela operação da maior parte das estações da Rede em todo Brasil há cerca de 50 anos, antes mesmo da criação da ANA (Figura 2.1). A rede operada inclui estações fluviométricas, pluviométricas, sedimentométricas, de qualidade da água e climatológicas; com operação convencional, automática e telemétrica. As leituras diárias de equipamentos convencionais são realizadas por cerca de 3500 observadores hidrológicos. Os dados coletados mensalmente são organizados, previamente consistidos e enviados à ANA através do Sistema de Informações Hidrológicas, para serem disponibilizados ao usuário final no portal Hidroweb (CPRM, 2019).

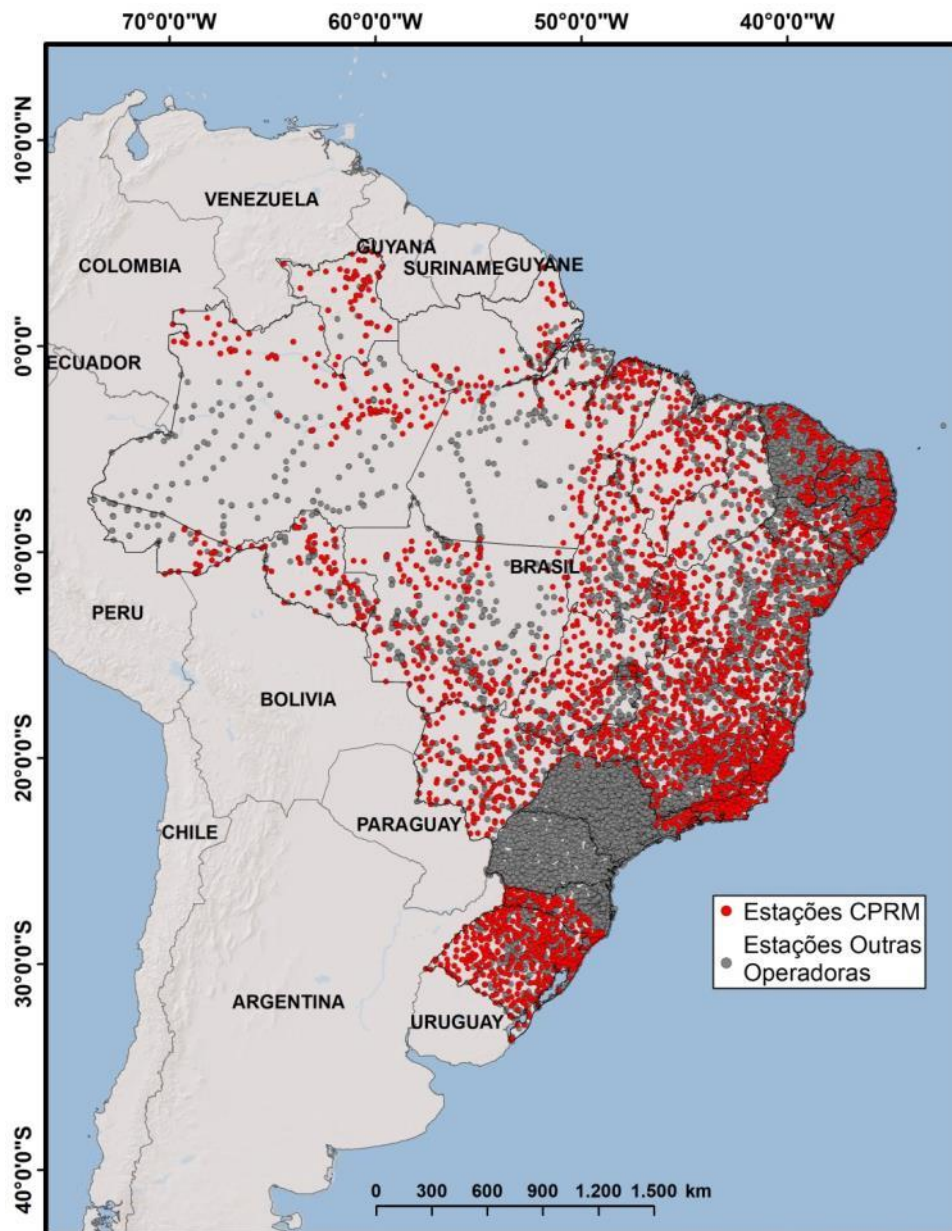


Figura 2.1 – Estações e histórico da RHN (Base de dados da ANA, 2021)

Apesar do grande número de estações, esse quantitativo não é igualmente distribuído pelo território brasileiro, havendo concentração de estações nas áreas mais desenvolvidas e ocupadas. Regiões como o Pantanal e Amazônia, a despeito da importância, apresentam um déficit de estações que prejudica o conhecimento do funcionamento hidrológico destes sistemas (Moreira, 2016; ANA, 2019a).

2.1.2 Medição de variáveis hidrológicas

O presente tópico foi baseado em estudo de referências na área de Hidrologia e Hidrometria como Jaccon (1989), Santos *et al.* (2001), Tucci (2001), ANA (2019b), entre outros, bem como atuação da pesquisadora na operação da RHN realizada pela CPRM.

A variável hidrológica desejada para maioria dos estudos hidrológicos e hidráulicos é a vazão ao longo do tempo. Entretanto o monitoramento diário da vazão num processo direto de medição é impensável devido aos custos envolvidos. A atividade de medição direta da vazão consiste em obter os valores de área e velocidade média ao longo de uma seção transversal, o que é feito utilizando equipamentos específicos selecionados em função da amplitude de vazão do curso d'água a ser medido. A depender do porte do curso d'água a atividade pode ser feita atravessando-se diretamente o curso d'água (medição a vau) ou a partir de embarcação. A solução adotada para obtenção do dado diário de vazão, de forma menos dispendiosa, foi a leitura do nível do rio (usualmente em dois horários) e obtenção da vazão a partir da relação entre estas variáveis, denominada curva-chave. A leitura do nível da régua é feita por um observador às 7 h e às 17 h e a série de cotas diárias é obtida pela média destas leituras (Jaccon, 1989; ANA, 2019a). Um fluxograma simplificado das etapas de leitura da régua até a geração da série de vazões é apresentado na Figura 2.2 e melhor esclarecido na sequência.

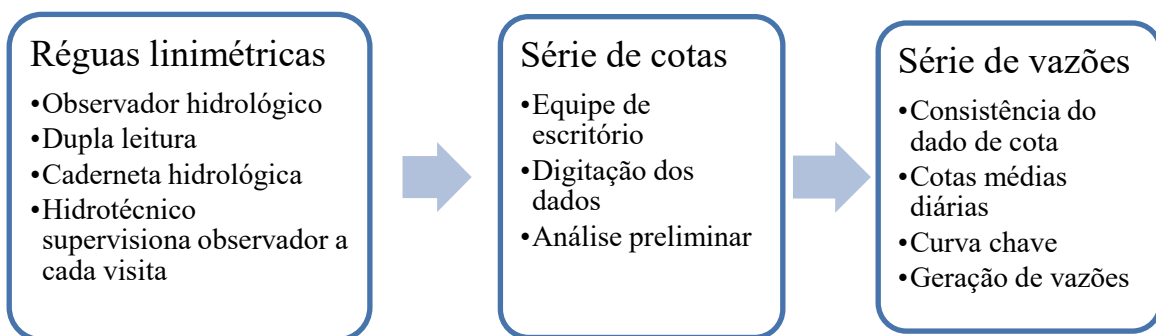


Figura 2.2 – Fluxograma simplificado da obtenção das séries de vazão

A estação fluviométrica convencional é constituída das réguas linimétricas, que são um conjunto de lances (usualmente de madeira), com escala, instalados em uma margem do curso d'água e devidamente nivelados com precisão milimétrica (Figura 2.3). Para tanto é construída uma referência altimétrica arbitrária, idealmente em local estável e com cota referenciada ao zero do sistema de réguas instalados. O conjunto de lances instalados deve possibilitar a leitura de cotas considerando as variações extremas de nível d'água: cheias excepcionais a secas severas. Assim, idealmente haverá lances que permanecem frequentemente secos e outros submersos, procurando assegurar que toda a amplitude de níveis seja registrada. Contudo, o zero do primeiro lance de réguas não coincide com o fundo do canal. Na data de instalação dos lances pode ser inviável instalar réguas que contemplem os níveis mais baixos do curso d'água. Durante o período de estiagem de 2013/2014, ocorrido nas regiões Nordeste e Sudeste, alguns rios atingiram níveis abaixo do primeiro lance de réguas, que seriam cotas negativas. Nesses casos, realiza-se a atividade de rebaixamento das réguas e é feito um ajuste a toda série histórica considerando a nova escala de lances (Tucci, 2001; Santos *et al.*, 2001).



Figura 2.3 – Réguas instaladas na estação São Romão – Rio São Francisco

Para cada medição realizada, além das variáveis cota e vazão outros parâmetros hidráulicos são calculados e armazenados no banco de dados da estação compreendendo profundidade média, velocidade média, área molhada e largura. Cada estação fluviométrica possui uma seção de medição específica, normalmente coincidente com a seção de réguas ou próxima a ela. Uma vez ao ano é feito o levantamento da seção transversal de medição, informação que será utilizada na definição da curva chave da estação, por exemplo, e pode subsidiar estudos diversos.

Conforme Naghettini e Pinto (2007), o processo de geração do dado hidrológico está sujeito a uma série de erros, compreendendo os erros aleatórios, sistemáticos e os grosseiros. Os primeiros refletem as imprecisões inerentes aos processos de leituras e medições realizadas. Os erros sistemáticos são aqueles persistentes por todo um período numa série, produzindo um viés em decorrência de alguma mudança no processo de leitura, aferição ou medição, como, por exemplo, uma calibração incorreta de um equipamento. Por fim, os erros grosseiros provêm de falhas humanas e resultam da falta de cuidado, destacando-se:

- Erro de leitura: é muito comum no caso das réguas limimétricas acontecer o erro de metro e menos frequentemente o de decímetro;
- Erro de anotação: alguns observadores tem baixa escolaridade e dificuldade em anotar os números;

- Erro de digitação: ainda hoje a maior parte dos dados é remetida aos escritórios das operadoras das estações em papel e técnicos executam o processo de digitação e conferência;
- Dados ilegíveis.

A modernização dos equipamentos de monitoramento hidrometeorológico permite o uso de diversos sensores automáticos ligados a uma plataforma de coleta de dados (PCD), com o armazenamento dos dados *in loco* por registradores e transmissão por telefonia móvel ou por satélite. Gradualmente, figuras como do observador e do digitador estão sendo substituídas por equipamentos automáticos, como pluviógrafos de balança, medidores de nível por pressão ou radar. Entretanto outro problema é gerado: a experiência tem mostrado a necessidade de manutenção frequente destes equipamentos, muitas vezes não fabricados para operar nas condições de clima brasileiro. Outro aspecto relevante é que pouco adianta a geração de informação em quantidade sem análise prévia de sua qualidade (níveis de acurácia e quantidade falhas). O fluxo de trabalho tradicional (Figura 2.2) deve ser adaptado para análise contínua dos dados produzidos por estes equipamentos.

Nivelamento altimétrico

Os dados de cota das EFs encontram-se numa referência altimétrica arbitrária o que inviabiliza a comparação direta às séries de EVs, bem como impossibilita a obtenção da declividade da linha d'água entre as estações. O uso de uma referência local para monitoramento de níveis d'água é o que ocorre a nível mundial, são raras as exceções em que as séries de cotas estão disponíveis com referência altimétrica global (Calmant *et al.*, 2013). Entretanto, a popularização dos GPS geodésicos e melhoria da acurácia altimétrica dos modelos de elevação digital devem reverter este quadro (Moreira, 2016). Recentemente, a CPRM deu início às atividades de nivelamento altimétrico das estações fluviométricas que opera.

A atividade de nivelamento altimétrico consiste em obter a altitude absoluta das referências de nível das estações fluviométricas com o uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema de Satélites para Posicionamento Global), comumente chamados de GPS geodésicos. O equipamento possui uma antena que deve ser devidamente posicionada para captar os dados dos satélites por tempo e exposição suficientes conforme recomendado pelas instituições de referência na temática, como por exemplo, o Serviço Internacional de Rotação da Terra e Sistemas de Referência (IERS- *International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Os dados levantados em campo são então pós-processados em um programa específico para tratamento de dados GNSS e resultam num valor de altimetria com precisão

vertical em função das condições observadas durante o levantamento. O dado altimétrico obtido diz respeito à cota global da referência de nível da estação (sistema geoidal ou elipsoidal). Para obter a referência altimétrica do zero da régua, subtrai-se o valor de nivelamento local da RN de seu valor global obtido com o nivelamento. O valor associado ao zero da régua deve ser somado aos dados de cota para obtenção das séries de nível d'água com referência altimétrica global considerando o geoide ou elipsoide (IBGE, 2021).

O elipsoide é um modelo geométrico de representação da superfície terrestre e é utilizado nos Sistemas Globais de Posicionamento, entretanto não possui significado físico. O modelo geoidal consiste numa superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra coincidente com o nível do mar em repouso. A diferença entre a superfície do geoide e do elipsoide é chamada de ondulação geoidal (Figura 2.4) e deve ser calculada utilizando modelos desenvolvidos para tanto e que vão sendo continuamente aperfeiçoados. Os modelos de ondulação geoidal são embasados pela combinação de várias tecnologias de posicionamento espacial, tais como as estações SLR (*Satellite Laser Ranging*) e Doris (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*), dados gravimétricos terrestres, informações de relevo e dados de AS nos oceanos. Os modelos globais do geopotencial mais usados são o *Earth Gravity Model* (EGM), em sua versão mais antiga (EGM96) e a mais recente (EGM08). No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em conjunto com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) desenvolvem modelos de ondulação geoidal para o território intitulado MAPGEO, com inspiração no EGM08, mas usando dados de milhares de estações gravimétricas da América do Sul resultando numa resolução de 5'' de arco (aproximadamente 150 m). A primeira versão foi disponibilizada em 2010 e a segunda em 2015. Na Europa é comum o uso de outro modelo de alta resolução, o *European Improved Gravity model of the Earth by New techniques* (EIGEN), que utiliza dados do satélite *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explore* (GOCE). O modelo *Experimental Gravity Field Model* (XGM) foi proposto inicialmente por Pail *et al.* (2018) e atualizado por Zingerle *et al.* (2020). O XGM também utiliza os dados do GOCE para o desenvolvimento de um modelo de campo gravitacional combinado de alta resolução e independente do EGM08 (Moreira, 2016; Pail *et al.*, 2018; Zingerle *et al.*, 2020; IBGE, 2021).

Por ser uma representação mais fidedigna da superfície equipotencial terrestre, o geoide apresenta oscilações em pequenas distâncias. No caso de estudos comparativos de séries altimétricas de EVs quilômetros distantes de EFs, a utilização do geoide pode acarretar vieses, conforme relatado por Frappart *et al.* (2006). Por outro lado, nos estudos de declividade da linha

d'água, é importante que as altitudes tenham significado físico, refletindo os potenciais gravitacionais averiguados na superfície terrestre (Freitas e Blitzkow, 1999; Moreira, 2016).

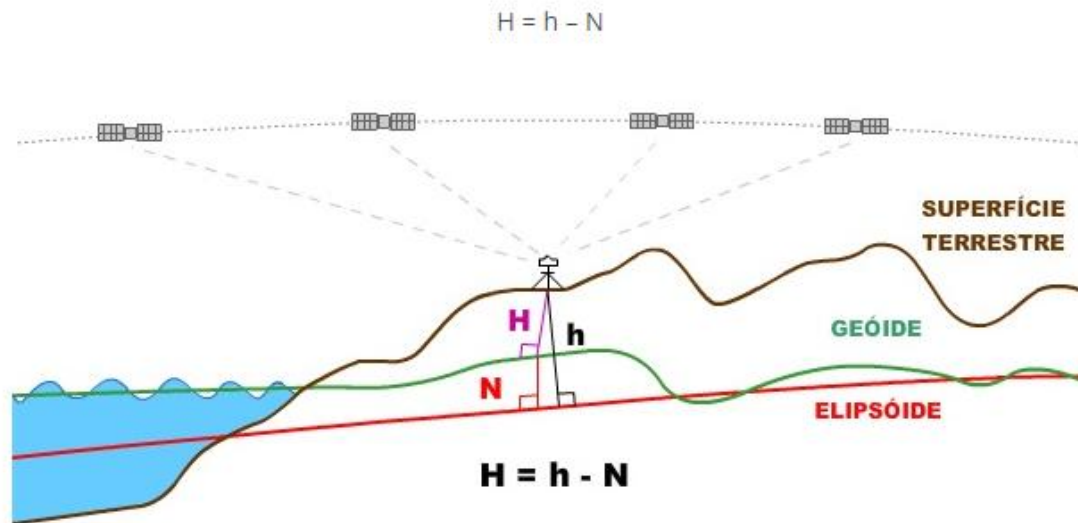


Figura 2.4 – Alturas geoidal (H), elipsoidal (h) e ondulação geoidal (N) (Fonte: IBGE, 2019)

Limitações dos dados hidrológicos convencionais

Diante do que foi exposto nos itens 2.1.1 e 2.1.2, pode-se apontar como principais limitações no processo de geração dos dados hidrológicos convencionais:

- O processo é complexo e está sujeito a diversos erros grosseiros;
- Resolução espacial, com destaque para má distribuição espacial da rede de estações em território nacional acarretando áreas significativas não monitoradas;
- Existência de período de falhas nos dados, por vezes atingindo meses e até mesmo anos;
- O prazo dilatado para disponibilização do dado ao usuário final (geralmente de dois a três meses, mas pode chegar a um ano);
- Referência altimétrica local para as séries de nível d'água;
- Necessidade de grande quantidade de profissionais capacitados para as atividades de campo, que se expõe a riscos diversos, sobretudo em regiões de mata ou poluídas, atividade em altura, direção de veículos por muitas horas, presença de animais peçonhentos no local de trabalho, afogamento, quedas, etc..;
- Necessidade de equipe de escritório para processo de digitação, digitalização e análise preliminar do dado de campo;

- Elevados custos para instalação, operação e manutenção da rede de estações (equipamentos, manutenções, logística de campo, etc..).

2.1.3 Uso de dados de sensoriamento remoto na Hidrologia

Conforme Mertes *et al.* (2004) tão logo os primeiros satélites de observação da Terra foram lançados (décadas de 60 e 70) a Hidrologia se valeu dos dados e informações disponibilizados. Entre as décadas de 70 e o final dos anos 90 os satélites se diversificaram e cresceram em número. Os esforços se direcionaram num primeiro momento para a resolução espectral e radiométrica, explorando os domínios espectrais fora do visível, sobretudo o infravermelho. Na segunda fase, atenção maior foi dada aos sensores radar para coleta de imagens de forma ativa e pouco influenciadas pela presença de nuvens (Silva J., 2010; Pôssa, 2020).

A Hidrologia superficial avançou muito após o início do programa Sistema de Observação da Terra da agência espacial norte-americana (NASA - *National Aeronautics And Space Administration*) que incluiu o lançamento de diversos satélites, o primeiro deles em 1997 (Tang *et al.*, 2009). Segundo Lettenmaier *et al.* (2015), houve uma resistência ao uso de sensoriamento remoto na Hidrologia, o que mudou a partir dos anos 2000, quando os dados de sensoriamento remoto passaram a ser mais disponibilizados à comunidade, sem necessidade de desenvolver algoritmos pra usá-los. Além da disponibilização de produtos do sensoriamento remoto, segundo Warren (2013), a partir dessa mesma década, a diversificação dos satélites voltados ao monitoramento de mudanças hidrológicas e climatológicas globais intensificou o uso de dados de sensoriamento remoto na Hidrologia. O avanço mais significativo propiciado pelo sensoriamento remoto na Hidrologia diz respeito à modificação da escala do conhecimento sobre processos e variáveis de estado, do nível local para regional, continental e até mesmo global (Lettenmaier *et al.*, 2015).

As aplicações do sensoriamento remoto à Hidrologia são inúmeras e compreendem a estimativa de uma gama de dados hidrológicos como: precipitação, balanço de energia e evapotranspiração, umidade do solo, gravimetria e total de água armazenada, obtenção de dados sobre águas superficiais (nível e largura dos rios, vazões) e diversos parâmetros de qualidade da água (turbidez, clorofila, sedimentos em suspensão e outros (Paiva e Ruhoff, 2017); e ainda estimativas auxiliares como temperatura superficial, radiação incidente, vapor de água na atmosfera, etc... (Warren, 2013).

Na modelagem hidrológica os dados oriundos do sensoriamento podem ser utilizados de diferentes formas visando diminuição das incertezas: como dados de entrada, para

parametrização, atualização de estados, calibração de parâmetros e validação (Warren, 2013). Contudo, mesmo boa parte das variáveis hidrológicas podendo ser medidas ou estimadas por sensoriamento remoto, o aumento da acurácia e consistência permanecem cruciais para maximizar seu uso em estudos hidrológicos (Tang *et al.*, 2009). Outro desafio é resolver inconsistências encontradas nos produtos de satélites e algoritmos, quantificando as incertezas envolvidas (Lettenmair *et al.*, 2015; Paiva e Ruhoff, 2017).

2.2 Altimetria por satélite - AS

2.2.1 Princípio de funcionamento do radar altimétrico

O termo radar é uma sigla para *Radio Detection and Ranging* (Detecção e Medição por Rádio). Os itens básicos que caracterizam o radar são: um gerador de pulsos, um transmissor, um receptor, um gravador e uma antena. Os radares emitem ondas eletromagnéticas em direção a um alvo e registram o retorno deste sinal a sua antena. Há de se distinguir entre os satélites radar imageadores e os altimétricos. Os satélites radar imageadores fazem a aquisição de imagens ao longo de uma faixa (*ground swath*) distante da projeção de suas linhas de voo em terra (*ground track*) devido ao ângulo de visada do instrumento (Figura 2.5 a). Os satélites com radares altimétricos emitem pulsos radar em direção ao nadir (Figura 2.5 b) e a análise da amplitude e formas de onda do sinal retornado gera dados pontuais de altimetria da superfície observada, dentre outros (AEB, 2008; CRISP, 2020; CCRS, 2020).

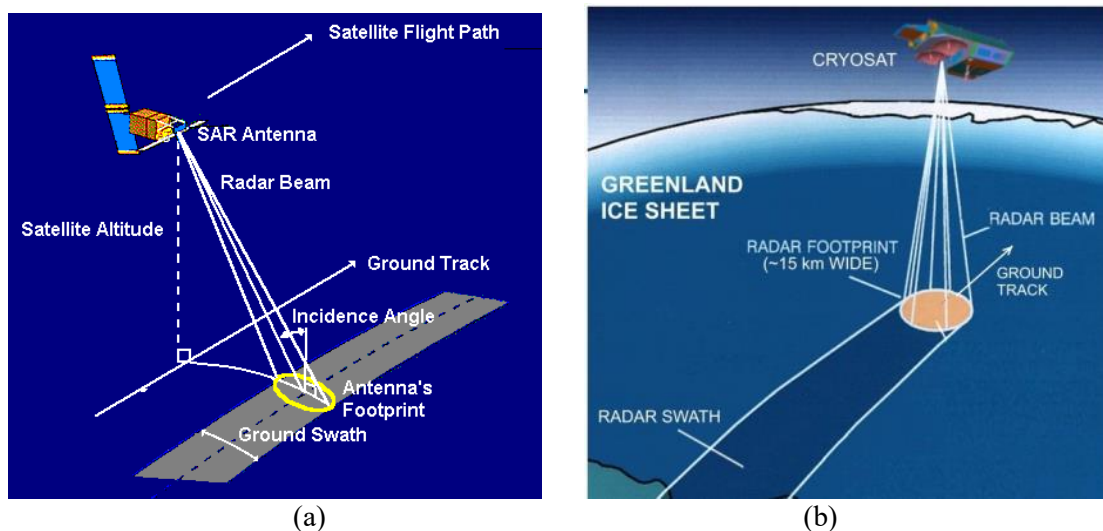


Figura 2.5 – Funcionamento de (a) um radar imageador (b) radar altimétrico (Fonte: CRISP, 2020 e adaptado de ESA, 2021a)

A altimetria por satélite (AS) é uma das ferramentas do sensoriamento remoto e teve início com foco na obtenção dos níveis dos oceanos, calotas polares e gelo de mar, e ainda hoje este é o objetivo principal do lançamento dessas missões. Contudo, a acurácia dos dados altimétricos

averiguada em missões mais recentes e os resultados convincentes obtidos em estudos consolidados a partir da década de 90 sugerem que estes dados podem ser empregados em análises hidrológicas e hidráulicas (Tarpanelli *et al.*, 2013).

Os radares altimétricos instalados a bordo de diferentes missões espaciais se deslocam em uma órbita determinada a nível centimétrico por sistemas de localização precisos, tais como as estações SLR e Doris, citadas anteriormente. A altitude do satélite é definida em relação a alguma superfície de referência altimétrica, usualmente o elipsoide (altura elipsoidal do satélite). Os altímetros emitem pulsos radar em direção ao nadir e milissegundos depois captam o eco refletido pela superfície (solo, calota polar ou água). A análise do eco (em forma de onda) permite extrair uma medida muito precisa do tempo de trajeto entre o satélite e a superfície. A forma de onda consiste na discretização da média da intensidade dos retornos ao longo de pequenos intervalos de tempo (*bins*). Considerando-se a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas emitidas e o tempo de trajeto calcula-se a distância (medição/*range* na Figura 2.6). A altura da superfície de interesse é obtida subtraindo-se o valor da medição (*range*) da altitude elipsoidal do satélite, resultando na altura elipsoidal da água. O dado obtido é então corrigido considerando fatores tais como a propagação da onda eletromagnética através da atmosfera e ionosfera e a maré terrestre, que serão apresentados no item 2.2.3 (CNES, 2020; Aviso, 2021).

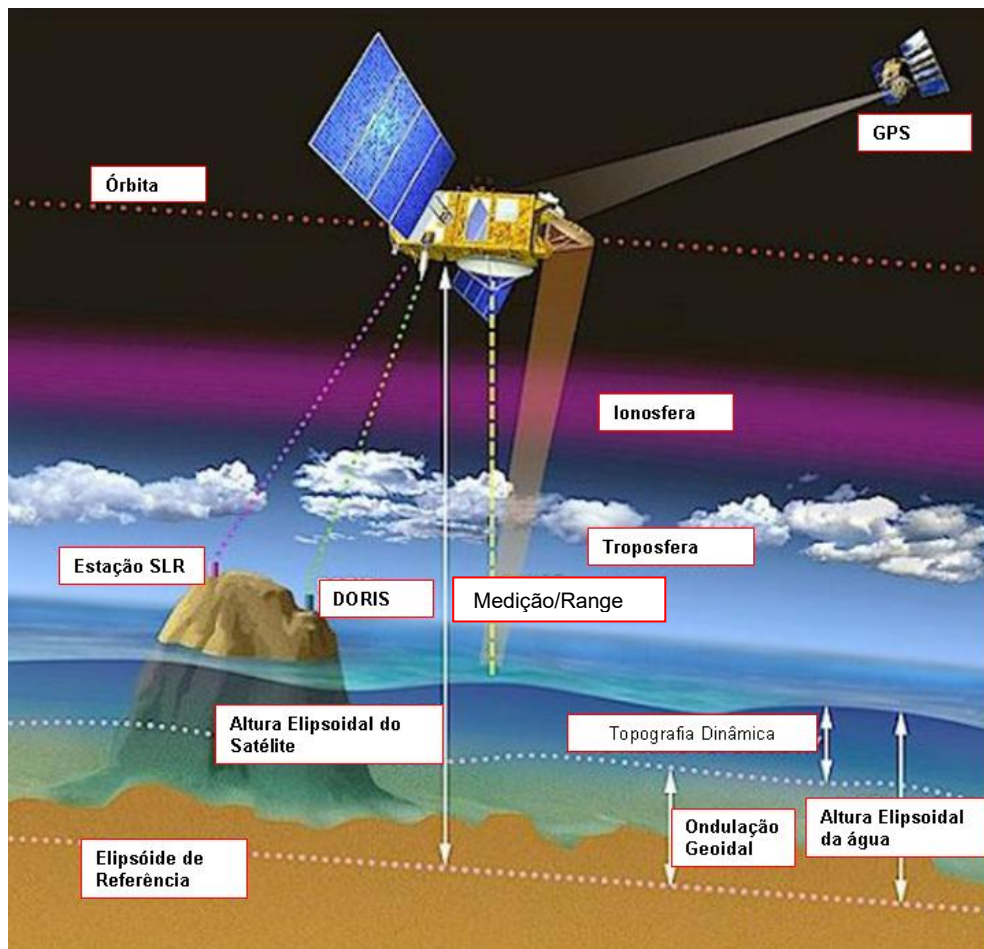


Figura 2.6 – Princípio de funcionamento dos radares altimétricos (adaptado de CNES por Moreira, 2016)

O fato é que apesar do princípio básico da AS ser simples o funcionamento dos equipamentos é regido por uma gama de operações, processamentos e programações visando a melhor acurácia possível para os dados (Rosmorduc *et al.*, 2018). A variação da topografia ao longo do percurso do altímetro ocasiona oscilação do tempo de retorno dos ecos. O *tracker* é o algoritmo que vai definir as janelas de gravação do altímetro de maneira que todos os retornos possam ser devidamente registrados na forma de onda. No modo de operação convencional, chamado *closed loop tracking mode*, o altímetro prepara a próxima janela de recepção dos dados considerando apenas as últimas formas de onda recebidas, o que limita sua capacidade de se ajustar a mudanças repentinas de relevo. Para minimizar essa problemática, altímetros mais recentes utilizam o modo de operação *open loop tracking mode* (OLT mode), que utiliza informação prévia da altitude esperada para o alvo. Esses dados auxiliares são essencialmente de duas fontes: 1) um modelo de elevação digital e 2) uma máscara das superfícies de água (Biancamaria *et al.*, 2017).

A propagação das ondas a partir do satélite acontece em formato de cone e pode atingir raios da ordem de quilômetros em terra, configurando pegadas ou áreas iluminadas (*footprints*)

tipicamente de 2 a 8 km, variando de um satélite para outro. Grandes pegadas podem conter retornos de superfícies diversas o que aumenta a complexidade das formas de onda (Figura 2.7 a). Nos oceanos a estimativa de altura da água pelo radar altimétrico é muito precisa, por se tratar de uma superfície aproximadamente plana e homogênea produzindo formas de onda típicas (Figura 2.7 b). Essas formas de onda podem ser descritas analiticamente e são caracterizadas por uma elevação abrupta da intensidade dos ecos correspondente ao momento em que a frente da onda radar toca o alvo. O segmento de reta de elevada inclinação na forma de onda típica dos oceanos não é tão pronunciado nas formas de onda para as águas continentais devido às irregularidades de superfícies adjacentes (Cipollini e Snaith, 2013; Maillard *et al.*, 2015; Aviso, 2021).

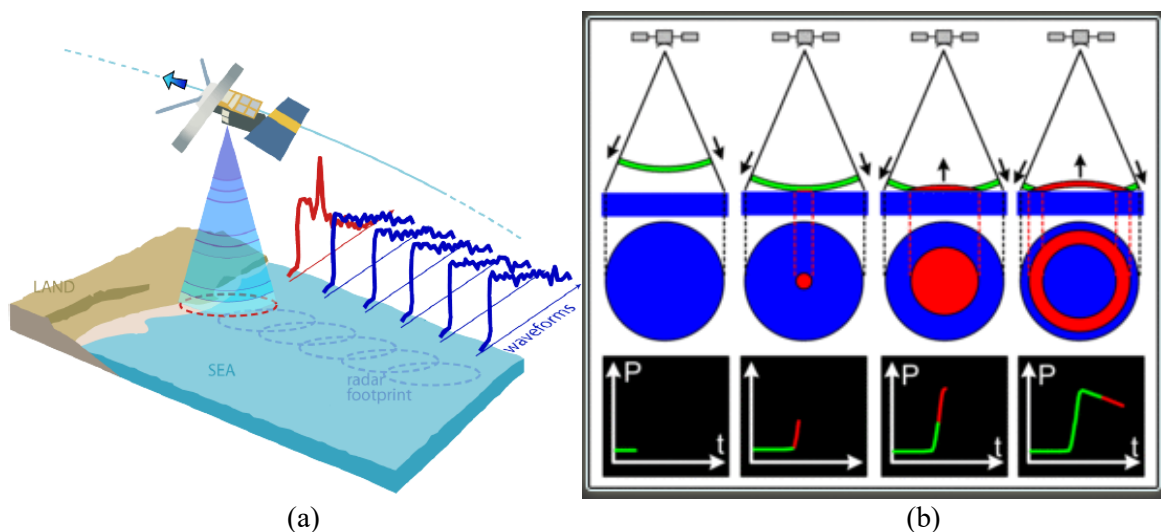


Figura 2.7- (a) Transição das formas de onda recebidas pelo altímetro do mar para o continente
 (b) Geração de uma forma de onda típica de águas oceânicas tranquilas
 (Fonte: Rosmorduc, *et al.* 2018)

No continente a irregularidade do relevo pode causar um retorno fora do nadir do satélite (“off-nadir”), especialmente se o caminho até este ponto é mais curto. A Figura 2.8 ilustra diferentes situações em águas continentais: (1) o altímetro captura um retorno misto de solo e vegetação; (2) os pulsos percorrem uma distância menor até a margem esquerda da seção do rio, que dá um retorno forte ao altímetro mesmo estando fora de seu nadir, mas aparecem vários picos na forma de onda; (3) o altímetro enxerga praticamente somente a água, mas essa situação ideal só é possível em rios com largura próxima ou maior que o *footprint* do altímetro; (4) os pulsos do altímetro são refletidos primeiro pelo solo da margem direita, que sem densa cobertura vegetal ocasiona retornos tão fortes quanto da água ao altímetro; (5) uma forma de onda complexa, sem formação de picos é obtida nos trechos de oscilação de relevo e solo sem cobertura vegetal significativa. Em função dos fenômenos que afetam o eco gravado pelo altímetro, todos os dados, especialmente para superfícies heterogêneas, devem ser pós-

processados para gerar medições mais precisas da elevação da superfície. Essa atividade de pós-processamento, realizada em solo, é chamada de *retracking* e de maneira simplificada se trata de definir qual ponto na forma de onda (*waveform ramp mid-point*) corresponde mais aproximadamente à superfície alvo, procedendo a uma correção (*retracking correction* na Figura 2.9 demonstrado para uma forma de onda típica do mar). O *retracker* seleciona o ponto correspondente à superfície alvo baseado no *range* e também na potência dos ecos retornados, conseqüentemente fatores ambientais como a natureza da superfície podem ter efeitos significativos na escolha feita pelo *retracker* (Maillard *et al.*, 2015; Rosmorduc *et al.* 2018; Aviso, 2021).

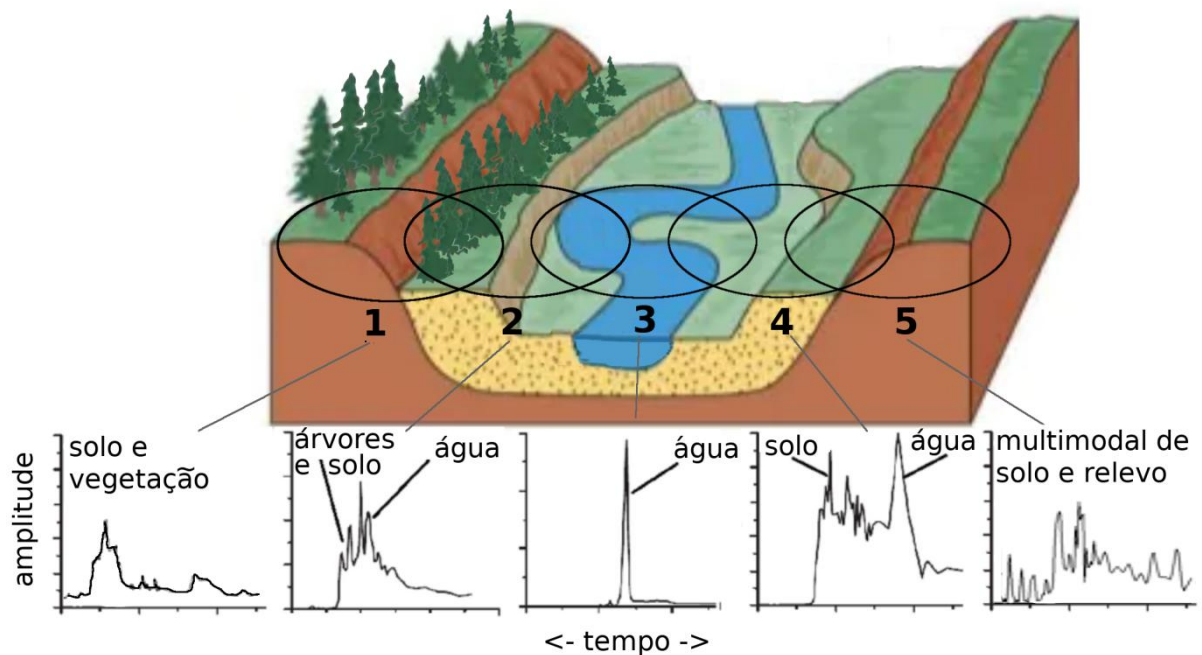


Figura 2.8 – Exemplos da complexidade das formas de onda no continente que demandam a execução do “retracking”

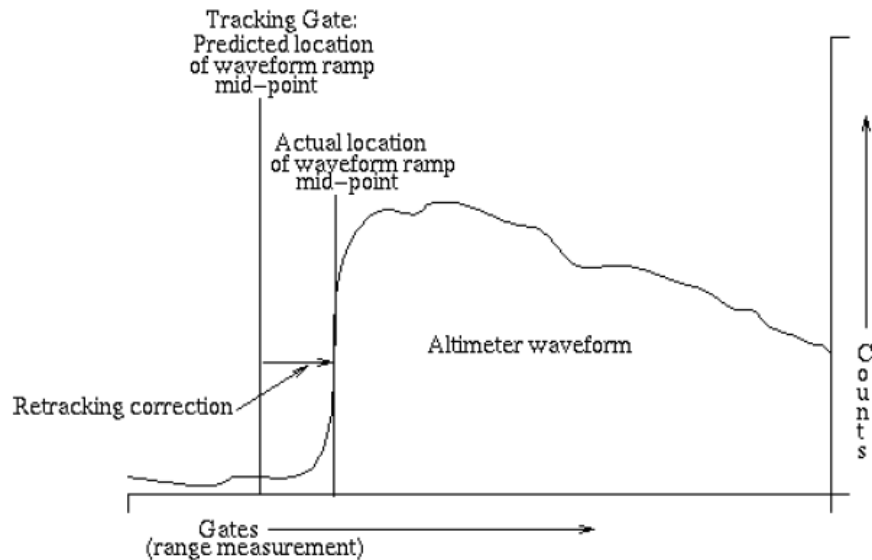


Figura 2.9 – Ajuste realizado pelo *retracking* para determinação do *waveform ramp mid-point* numa forma de onda típica de mar (Fonte: Rosmorduc *et al.* 2018)

Há uma série de *retrackers* disponíveis tais como Ice-1, Ice-2, Ocean, entretanto, como os nomes sugerem se tratam de algoritmos desenvolvidos para oceanos e gelos, mas têm sido aplicados às águas continentais (Pereira, 2018). Silva J. (2010) aponta que parte dos erros observados na medida altimétrica de rios são provenientes da tentativa de se adaptar um tratamento básico de medidas concebidas para o ambiente oceânico aos sistemas hídricos continentais.

O *footprint* dos satélites com radar altimétrico não é um parâmetro de operação fixo, variando em decorrência de seu princípio de operação. Cada pulso emitido é refletido pela superfície e retornado ao altímetro alguns milissegundos depois. Quando a borda frontal do pulso do radar atinge o solo, a intensidade do retorno aumenta, sendo a pegada um disco que se espalha linearmente com o tempo. À medida que a área iluminada aumenta, a intensidade do sinal de retorno cresce rapidamente até que um anel seja formado. Este anel cresce em raio e mantém a área constante, até que atinja os limites do feixe (Figura 2.7 b e Figura 2.10). Em seguida, a intensidade de retorno ao altímetro diminui até desaparecer no nível de ruído ou a antena parar de registrar devido à baixa intensidade do sinal ou à própria janela de gravação ser interrompida. No caso do Envisat, por exemplo, a configuração de altitude de órbita a cerca de 800 km e posicionamento de sua antena, correspondem a uma área iluminada na superfície terrestre de 18 km de diâmetro. Entretanto, a curta duração do pulso do radar normalmente significa que uma área muito menor de iluminação é vista pelo instrumento, tipicamente com 8 km de diâmetro para o Envisat. É a chamada pegada limitada por pulso, característica da operação dos altímetros em modo de baixa resolução (em inglês LRM - *low resolution mode*) (ESA, 2011; Rosmorduc *et al.*, 2018; Cipollini e Snaith, 2013).

Outra forma de operação dos altímetros é comumente nomeada SAR, sigla para *Synthetic Aperture Radar*, que são os Radares de Abertura Sintética. A operação é similar ao Modo de baixa resolução, mas a taxa de emissão dos pulsos é mais alta e utiliza-se o efeito Doppler causado pelo movimento do satélite na direção de seu deslocamento para refinar a resolução dos dados obtidos neste mesmo sentido. Uma mesma faixa ao longo do traço do satélite vai refletir os pulsos em diferentes frequências conforme o satélite se desloca possibilitando uma determinação mais precisa de sua posição (Figura 2.10). Esse método de processamento é usualmente referido como *multi-looking processing* e permitiu uma diminuição de ruído na altura da superfície do mar em 25% comparando dados do Sentinel-3A (SAR) ao Jason-3 (tradicional) (ESA, 2021a).

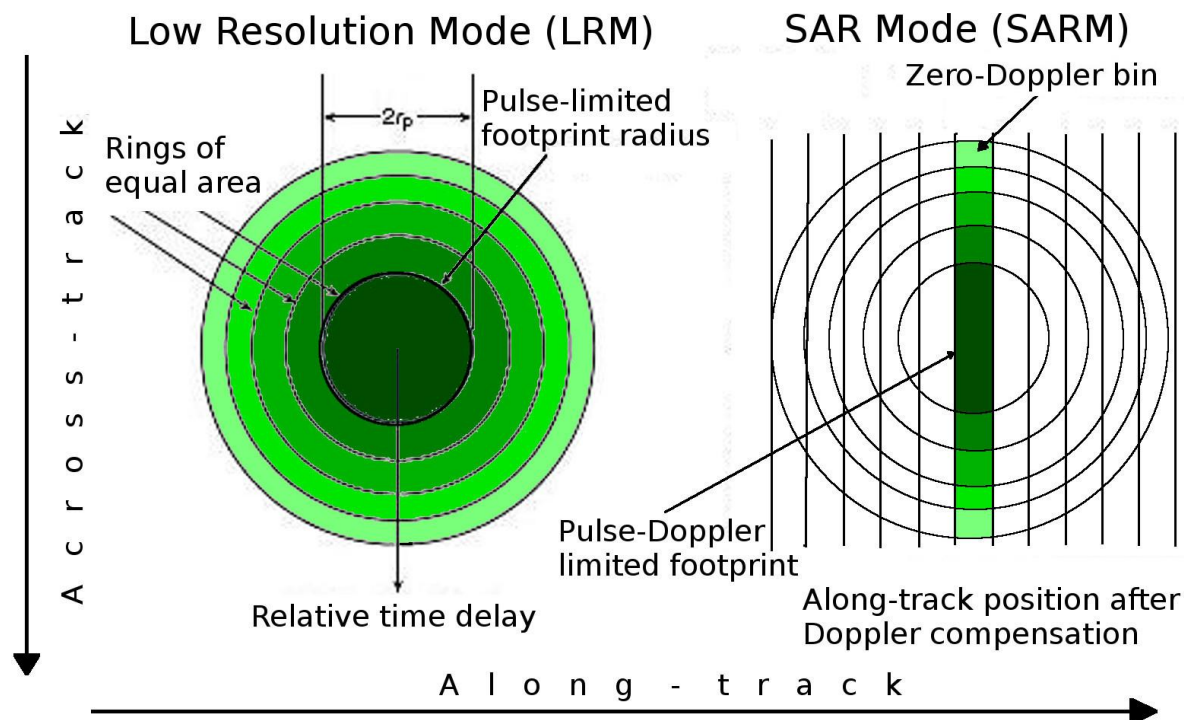


Figura 2.10 – Diferenças na operação em modo LRM a esquerda e modo SAR ou Doppler ilustrado a direita (Fonte: adaptado de ESA, 2021a)

2.2.2 Breve histórico das missões altimétricas

As primeiras medidas altimétricas objetivaram determinar a topografia dos oceanos e os Estados Unidos foram os pioneiros no lançamento de missões altimétricas com este foco. Em 1973 a Marinha americana lançou um radar altimétrico acoplado ao satélite *Skylab* a título experimental, que demonstrou o potencial da altimetria por satélite. Na sequência lançaram as missões Geos-3 (1975), SeaSat (1978) e por fim o Geosat (1985) que foi o primeiro satélite que permitiu monitorar a oscilação do nível dos oceanos. Pode-se dizer que o Geosat foi a primeira missão altimétrica bem sucedida de fato, por gerar dados de qualidade durante mais de três

anos, sendo encerrada em 1990. Em 1998, a Marinha americana lançou o satélite GFO visando dar continuidade à missão Geosat (Silva J., 2010; NASA, 2021; Aviso, 2021). Na Figura 2.11 foi construída uma linha do tempo das principais missões altimétricas desde o Geosat aos dias atuais, inclusive das missões futuras.

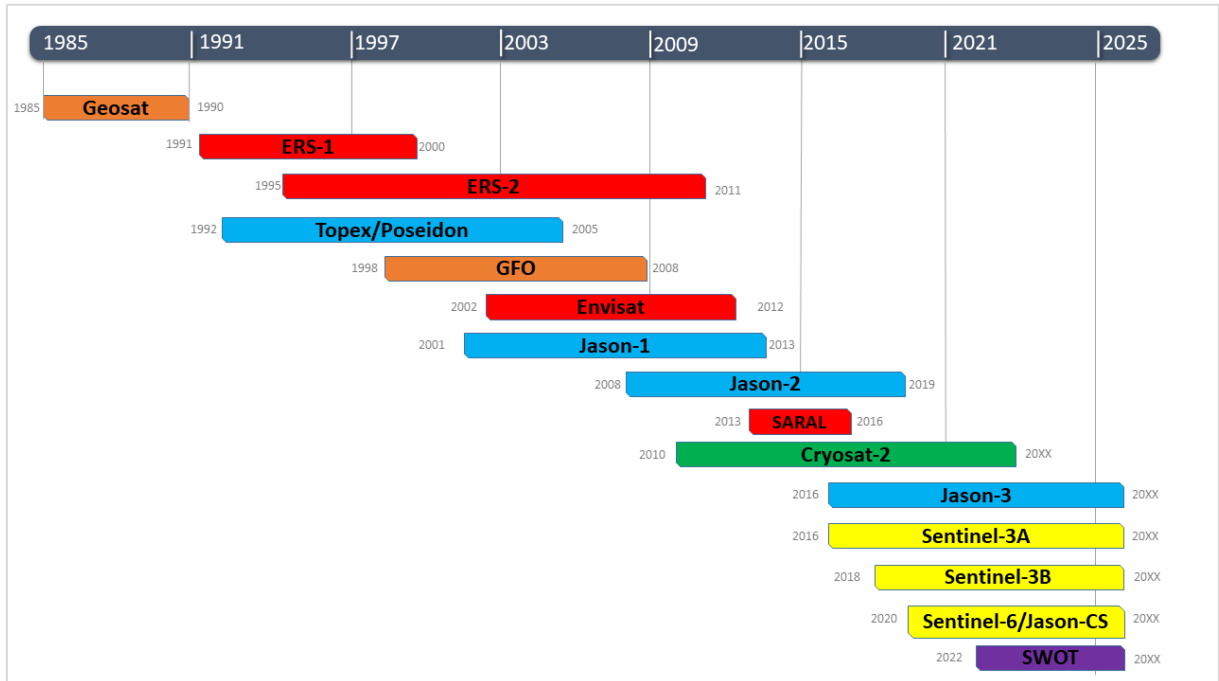


Figura 2.11 – Principais missões de AS ao longo do tempo (as cores identificam as famílias de satélite)

A Tabela 2.1 apresenta as principais missões (concluídas, em curso e futuras) com altímetros a bordo, data de lançamento, data de fim da missão (quando aplicável), o tempo de revisita, altitude de órbita e distância entre traços no Equador. As informações foram obtidas dos sites da NASA e da AVISO (*Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques*). Para as missões em que consta uma segunda data de lançamento, esta se refere ao início de uma nova fase, com parâmetros diferentes da anterior. ISRO (*Indian Space Research Organization*) é a agência espacial indiana e CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) a agência espacial francesa. Nota-se que as missões com tempo de revisita menor, resultam numa resolução espacial pior (elevadas distâncias entre traços no Equador). Os tempos de revisita tipicamente se situam entre 10 a 35 dias, exceto a fase inicial do Geosat, o Icesat (que possui traços bem próximos) e o Cryosat que possui tempo de revisita em torno de um ano em razão de sua órbita derivativa, melhor explicada a seguir. A família Jason apresenta a altitude de órbita mais elevada, conseqüentemente está associada a maiores *footprints*, o que pode comprometer a acurácia dos dados obtidos especialmente em cursos d'água de médio e pequeno porte.

Tabela 2.1 – Principais missões espaciais com altímetro a bordo e respectivas características de ciclo

<i>Nome da missão</i>	<i>Responsável</i>	<i>Data de lançamento</i>	<i>Data de fim da missão</i>	<i>Tempo de revisita (dias)</i>	<i>Altitude de órbita (km)</i>	<i>Distância entre traços no Equador (km)</i>
Geosat	ESA/NASA	mar/85	nov/86	3	814	4
		nov/86	jan/90	17	800	150
ERS-1	ESA	jul/91	jun/96	35	782	80
ERS-2	ESA	abr/95	jul/11	35	785	80
GFO	ESA	fev/98	nov/08	17	800	160
Topex/Poseidon	CNES/NASA	ago/92	out/05	10	1336	315
Jason 1		dez/01	fev/12			
Jason 2	CNES/NASA	jun/08	out.2019	10	1336	315
Jason 3		jan/16	-			
Envisat	ESA	mar/02	out/10	35	790	80
		out/10	abr/12	30	782	94
Saral	CNES/ISRO	fev/13	jul/2016	35	790	80
		jul/2016	-	*	-	-
ICESat-1	NASA	jan/03	out/09	91	600	30
ICESat-2	NASA	set/2018	-	91	500	10
Cryosat-2	ESA	abr/10	-	369/30	717	75/7
Sentinel-3A	ESA	fev/16	-	27	814.5	104
Sentinel-3B	ESA	abr/18	-			
Sentinel6A/ Jason-CS	ESA/NASA	nov/2020	-	10	1336	315
Sentinel6B/ Jason-CS	ESA/NASA	2026	-			
SWOT	ESA/CNES	2022	-	21/10	890	137

*Fase de deriva do Saral, sem órbita nominal repetitiva

A década de 90 para a AS foi marcada pelo lançamento de duas famílias de missões altimétricas. A primeira foi desenvolvida conjuntamente pelas agências espaciais americana (NASA) e francesa (CNES) com objetivo de monitoramento de longo termo dos oceanos. O primeiro satélite desta família foi o Topex-Poseidon (T-P), lançado em 1992 e operou até 2006. Antes do fim da missão T-P, visando dar continuidade à aquisição de dados numa mesma órbita teve início a série Jason, compreendendo: Jason-1 (2001-2013), Jason-2 (2008-2019) e Jason-3 (2016- em operação). A agência espacial europeia (ESA) lançou a segunda grande família de AS da década de 90, iniciando em 1991 com o satélite ERS-1 (1991-2000), seguido do ERS-2 (1995-2011) e Envisat (2002-2012). O foco principal desta família foi observação da Terra, em particular da sua atmosfera e oceanos, para tanto foram incluídos diversos instrumentos a bordo das plataformas (ESA, 2021a; NASA, 2021; CNES, 2021).

Em 2013, as agências espaciais indiana (ISRO) e francesa (CNES) lançaram o satélite Saral com objetivo principal de observação dos oceanos e aplicações secundárias em monitoramentos diversos: gelo, chuva, zonas costeiras, vento e até mesmo águas continentais. Havia uma grande expectativa quanto aos resultados da missão por ser o primeiro satélite a operar na banda-Ka (expectativa de melhores resoluções). A órbita selecionada foi a mesma da família ERS-1 e 2 e

Envisat. Em 2015, o satélite começou a apresentar problemas nas engrenagens utilizadas na manutenção de sua órbita. A partir de julho de 2016 o satélite entrou numa fase de deriva em que não há mais órbita fixa, o que limita as aplicações dos dados (CNES, 2021; Aviso, 2021).

Outra aplicação da AS é a observação de gelo de mar e calotas polares, com destaque para as missões americanas IceSat-1 (2003-2009) e IceSat-2 (2018). Trata-se de altímetros da NASA que utilizam tecnologia laser para envio dos pulsos em direção ao alvo, que garante resolução centimétrica do dado altimétrico, uma área iluminada (*footprint*) de apenas 70 m de diâmetro com resolução ao longo do traço de 170 m. Por outro lado, a obtenção de dados de nível d'água por laser é limitada pela presença de nuvens (refletem o laser) e o tempo de revista é de 91 dias (NASA, 2021). O processamento e visualização dos dados da missão Icesat pode ser feito online na plataforma *Openaltimetry* (<https://openaltimetry.org/>).

Por parte da ESA, o satélite Cryosat é o responsável pela observação do gelo, mais especificamente dos polos. O primeiro Cryosat foi lançado em 2005, mas apresentou falhas durante a sequência de lançamento. O segundo Cryosat foi lançado em 2010 e opera até os dias atuais provendo elevada cobertura espacial de todo globo. Sua órbita é dita “quase- repetitiva” a cada 369 dias, com subciclos de 30 dias. O altímetro a bordo do Cryosat, intitulado Sival, opera na banda-Ku (1,67-2,40 cm) em três modos diferentes: baixa resolução, modo SAR e o modo SARin (modo SAR interferométrico). O modo SARin, além do efeito doppler, utiliza um segundo canal de recepção para cálculo do ângulo de chegada do eco que retorna para o satélite. Os modos SAR e SARin armazenam grande quantidade de dados, assim operam apenas em alguns locais do globo, definidos conforme interesse da missão e periodicamente atualizados (Parrinello *et al.*, 2018).

O programa Copernicus consiste numa iniciativa conjunta da ESA e da União Europeia e um de seus projetos é a observação da terra através do lançamento de uma série de satélites. As missões Sentinel-3A e Sentinel-3B integram este programa e são responsáveis pelo monitoramento da topografia, cor e temperatura dos oceanos. O primeiro deles foi lançado em 2016 e o segundo em 2018, em órbitas complementares, com período de revisita de 27 dias. O altímetro a bordo dos satélites Sentinel-3 é o SRAL. A missão Sentinel é a primeira a prover cobertura 100% SAR, pois o modo de baixa resolução opera apenas como *back-up*. O SRAL ajusta de forma autônoma o uso das opções de *track* em modo *closed loop* ou *open loop* descritos no item “2.2.1 Princípio de funcionamento do radar altimétrico”. Os modelos digitais de elevação (MDE) para posicionamento da janela de gravação do altímetro no modo *open loop* são continuamente atualizados a bordo do Sentinel-3A e 3B, de maneira independente entre

estes satélites. Todas as versões dos MDEs podem ser consultadas no site <https://www.altimetry-hydro.eu/>, assim como é possível contribuir com informação de altitudes esperadas para alvos hidrológicos realizando-se um cadastro prévio (ESA, 2013; CLS, 2019). Conforme apontado por Biancamaria *et al.* (2017) a operação do altímetro no modo *open loop* associado a um MDE de precisão adequada resolve algumas limitações do uso dos dados altimétricos, sobretudo em corpos d'água continentais de pequeno porte.

A missão Jason-CS, também conhecida por Sentinel-6, integra o programa Copernicus e visa dar continuidade à missão Jason-3 no monitoramento da superfície oceânica iniciado em 1992 com a missão T/P. O primeiro satélite, Sentinel-6A foi lançado em nov/2020 e a previsão de lançamento do satélite Sentinel-6B é 2026. O altímetro utilizado é Poseidon-4 que opera no modo chamado intervalado, já que os modos LRM e SAR (radar de abertura sintética) podem ser utilizados simultaneamente, provendo formas de onda limitadas por pulso e formas de onda processadas pelo SAR. Espera-se que esse modo de operação intervalado forneça medidas mais acuradas de níveis d'água continentais, ainda que este não seja o objetivo da missão (Rosmorduc *et al.*, 2018; Aviso, 2021).

Apesar de todo o avanço propiciado pelas missões altimétricas acima descritas, nenhuma delas foi exclusivamente dedicada ao monitoramento dos recursos hídricos continentais. A missão SWOT consiste numa parceria da NASA e do CNES e é a primeira missão desenvolvida especificamente para observação de águas superficiais além das águas oceânicas. O satélite SWOT terá uma órbita de 21 dias de período e a previsão de lançamento é 2022. Graças à técnica de interferometria proverá observações em alta resolução dos continentes, incluindo máscaras de água. A carga útil do satélite principal é o radar interferométrico de banda Ka (KaRIN), que possui duas antenas que observam duas faixas de solo (*InSAR Pulse 1 e 2*), de 60 km de cada lado do nadir do satélite separadas por uma faixa de 20 km observadas em LRM (Figura 2.12). Sua concepção permitirá observar praticamente todas as superfícies de água, como pequenos lagos, reservatórios e rios com largura em torno de 50 a 100 m. Devido a estas características de resolução espacial e temporal, o SWOT deverá revolucionar a obtenção de dados hidrológicos, tais como de níveis d'água com precisão decimétrica e declividade com acurácia de 1,7 cm/km (Biancamaria *et al.*, 2011, 2016; Aviso, 2021).

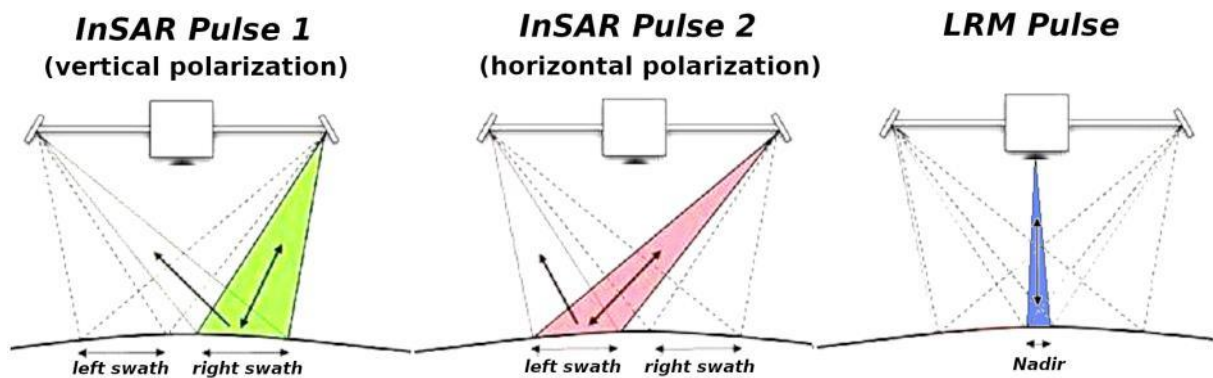


Figura 2.12- Representação das faixas KaRIN (ou InSAR) e central do SWOT (adaptado de NASA/JPL, CNES, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/swot>).

2.2.3 Obtenção e processamento dos dados de AS

A altimetria por satélite exige que muita informação seja levada em consideração antes de ser possível usar os dados, sendo o processamento destes uma parte importante até a obtenção do nível d'água. Vários dados auxiliares são utilizados, sobretudo para obter as correções necessárias para gerar dados de mais alta qualidade (Rosmorduc *et al.*, 2018).

Os dados das missões altimétricas são disponibilizados gratuitamente pelas respectivas agências espaciais ou organizações envolvidas, em suas respectivas páginas WEB, ftps (*file transfer protocol*- protocolo de transferência de arquivo) ou plataformas. Há diferentes níveis de processamento desde o dado bruto até o pós-processado, compreendendo os seguintes níveis (ESA, 2013; CNES, 2013):

- Nível 0: são os dados brutos transmitidos às estações em terra, geolocalizados e datados.
- Nível 1: nos centros de processamento os dados nível 0 passam por um controle de qualidade; o tempo e localização são ajustados para unidades apropriadas. Usualmente este nível de dado é disponibilizado poucas horas após a medição do satélite.
- Nível 2: para os dados do nível 1 são calculadas as correções devido à propagação e perturbação da atmosfera, correções geofísicas (ex.: marés terrestres, oceânica e polar) e sobretudo a determinação precisa da órbita. Estes dados são referidos como GDR - *geophysical data records* (registros de dados geofísicos) e são mais comumente utilizados por especialistas da área, pois neste nível de processamento é necessário conhecimento do assunto para manipulação da série de dados e respectivas correções disponibilizadas. O tempo de disponibilização varia de uma missão para outra e de uma instituição para outra, mas é tipicamente em torno de um mês.

- Nível 3: são dados prontos para uso imediato em aplicações, já corrigidos e/ou intercalibrados.
- Nível 4: se refere a produtos gerados com os dados (muitas vezes com abordagem multimissão) como modelos e grades de dados. Este tipo de produto é mais comumente fornecido para as áreas de oceanografia, atmosfera e monitoramento de gelo.

Para uso dos GDRs é necessário ainda um pré-processamento e aplicação das correções pertinentes, especialmente em cursos d'água continentais. Os parâmetros de correção são fornecidos junto com o dado, mas devem ser aplicados pelo usuário. No caso da missão Envisat, por exemplo, as correções eram disponibilizadas com resolução de 1 Hz, diferentemente da resolução das medições de 18 Hz, demandando interpolação prévia. A altimetria de um ponto (*H - height*) é resultado da altitude do satélite (a_s) subtraída do *range* (*R*). O valor do range é ajustado com os valores das correções dos fenômenos que atrasam a propagação das ondas eletromagnéticas na atmosfera: ionosfera (*iono*), pressão (*dry troposphere: dry*) e umidade (*wet troposphere: wet*). Também são aplicadas as correções geofísicas referentes aos movimentos da crosta em decorrência das marés polar (*pt*) e terrestre (*set*). A Equação 2.1 e a Figura 2.13 ilustram as operações de correção necessárias para águas continentais. No caso de dados no oceano outras correções são necessárias, como por exemplo, em função das marés oceânicas (Silva J. *et al.*, 2013; Maillard e Calmant., 2013; Aviso, 2021).

$$H = a_s - (R + \textit{iono} + \textit{dry} + \textit{wet} + \textit{pt} + \textit{set})$$

Equação 2.1

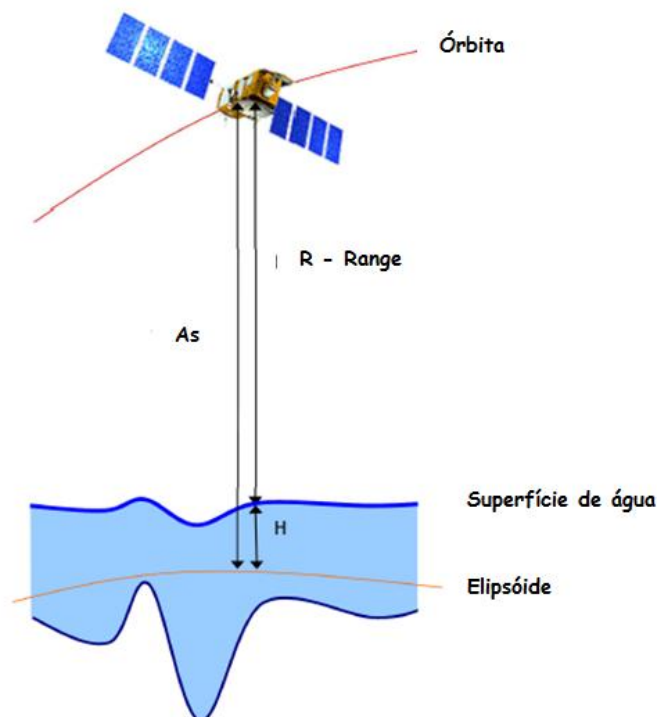


Figura 2.13 – Variáveis envolvidas na medida altimétrica (Fonte: adaptado de SARAL/AltiKa Products Handbook - CNES, 2013)

Com a evolução da AS a forma de organização e disponibilização dos dados ao usuário também melhorou. Para a missão Sentinel-3, por exemplo, os GDRs têm sido disponibilizados em menos de uma semana na plataforma SciHub da Copernicus, onde é possível selecionar a área de interesse e fazer *download* dos traços respectivos. Entretanto, o *download* não é direto. O pacote de arquivos de interesse é listado no formato meta4 (*Metalink data*), o que demanda utilização de algum outro aplicativo ou conhecimento de programação para criação de rotinas. Outra vantagem dos dados do Sentinel 3-A é que, dentre as variáveis disponibilizadas no GDR, há uma com dados de *Range* já com as correções aplicadas, contudo deve-se tomar cuidado com as especificidades das águas continentais (Copernicus, 2021).

No sentido de disponibilizar produtos de altimetria também para Hidrologia, o Theia, que é um Centro de serviço e dados francês, tem disponibilizado séries altimétricas processadas e corrigidas para grandes rios e lagos do mundo todo, num site chamado Hydroweb (<http://hydroweb.theia-land.fr/>). A Figura 2.14 mostra o mapa inicial da página onde visualiza-se o número de estações virtuais disponíveis por regiões em 25/01/2019. As estações virtuais no Brasil estão localizadas na região Amazônica e em lagos, pois rios de menor porte ainda não são contemplados devido aos desafios de uso dos dados no contexto de larguras menores.



Figura 2.14 – Séries altimétricas disponíveis no Hydroweb (Fonte: <http://hydroweb.theia-land.fr/>, acesso em: 25 jan 2020)

Os GDRS (e dados de outros níveis de processamento também) costumam ser disponibilizados no formato *Network Common Data Form* (NetCDF), amplamente utilizado pela comunidade científica de estudos climatológicos e mais recentemente pelas missões altimétricas. A nomenclatura dos arquivos é padronizada para cada missão altimétrica, contendo geralmente:

uma sigla com nome da missão, sigla do instrumento de aquisição (altímetro, radiômetro, etc..), sigla do nível de processamento, data/hora do início e fim da aquisição do dado, número do ciclo e do traço terrestre, sigla do centro de processamento que gerou o arquivo e o número de versão (Figura 2.15). Essa convenção facilita a seleção apenas dos dados de interesse através de rotinas de download ou filtros aplicados diretamente nas bases de dados (Pereira, 2018). O CTOH (*Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere*) realiza uma padronização de nomenclatura dos arquivos de diferentes missões, bem como disponibiliza correções propostas por seus pesquisadores para *download*.

S3B_SR_2_LAN__20180512T003834_20180512T010804_20180606T194543_1770_003_087____LN3_O_NT_003

Figura 2.15 – Exemplo de nomenclatura de arquivo NetCDF da missão Sentinel-3B

Os arquivos NetCDF contém dimensões, variáveis e atributos. A dimensão pode ser usada para representar uma grandeza física real ou para indexar outras quantidades. As variáveis são utilizadas para armazenar os dados propriamente ditos, consistindo numa matriz (*array*) de valores do mesmo tipo; são definidas por um nome, tipo de dado e uma forma descrita por sua lista de dimensões. Os atributos são criados para armazenar informação complementar das variáveis (metadados) (ESA, 2013; CNES, 2013). Os NetCDFs de AS contém dezenas de variáveis onde estão armazenadas:

- As correções necessárias às medidas altimétricas para todas as possíveis aplicações de AS;
- Geolocalização dos pontos medidos;
- Modelos de ondulação disponibilizados pelo centro de processamento responsáveis;
- As medidas altimétricas propriamente ditas;

Todas estas variáveis podem ainda ser disponibilizadas em diferentes frequências, aumentando a quantidade de informação.

O arquivo NetCDF é autodescritivo, compatível com vários sistemas operacionais e linguagens de programação, o que permite ao próprio usuário (conhecedor desta estrutura de dados) explorar as informações ali contidas e extrair os dados de nível d'água para cada ponto medido pelo satélite. Contudo, a seleção de quais pontos correspondem à superfície de água não é direta em decorrência dos fenômenos que afetam a gravação de dados pelo altímetro, especialmente em águas continentais, conforme descrito no item “2.2.1 – Princípio de funcionamento do radar altimétrico”. As principais informações utilizadas para seleção dos pontos são a análise dos dados em 3-D, formas de onda e localização geográfica através da sobreposição a imagens ou uso de máscaras que tenham a informação da superfície de água. Há tantas questões envolvidas

na seleção dos dados que de fato correspondem ao nível d'água que ainda hoje a construção das séries altimétricas de satélite é majoritariamente feita de forma manual, o que consome um tempo significativo de processamento e limita a utilização destes dados em larga escala. Além claro, de demandar mão de obra altamente qualificada, que compreenda de altimetria espacial, hidrologia, programação e possivelmente de geoprocessamento, a depender da ferramenta utilizada no processamento (ESA, 2013; CNES, 2013).

Ao longo dos anos, os pesquisadores e instituições envolvidos na obtenção, publicação e utilização dos dados de altimetria espacial desenvolveram ferramentas que facilitassem a construção das séries temporais, permitindo uma melhor visualização das informações contidas nos arquivos de dados, através de imagens e gráficos. A Tabela 2.2 apresenta as principais ferramentas disponíveis para as missões de interesse na presente pesquisa.

Tabela 2.2 – Principais ferramentas existentes para processamento de dados de AS

Nome	Ano de lançamento	Instituição/ Autor	Linguagem de programação	Método de geração das séries	Tipo de saída gerados	Tipo de licença
VALS - Virtual Altimetry Station	2008	LEGOS	Java Web Start	Manual através de gráficos, mapas e tabelas	Gráficos e arquivos txt das séries	Código fechado
SWG - Satellite Water Gauging	2013	UFMG	Python	Automático com três opções de metodologias de processamento	Gráficos, arquivos txt, shapefiles	Open-source tool
BRAT - Broadview Radar Altimetry Toolbox	2016	ESA/CNES	Matlab, python, C	Manual ou automatização através de linhas de comando ou interface gráfica	NetCDF, arquivos txt, GeoTiff (kmz), raster	Open source tool
MAPS - Multimission Altimetry Processing	2015?	? Frappart <i>et al.</i> (2015)	?	Manual através de mapas, gráficos e tabelas	Gráficos e arquivos txt das séries	Código fechado
AltEx	2019	Tethys Portal - Brigham Young University-Markert <i>et al.</i> (2019)	Python	Manual através de mapas e gráficos	Séries de nível como objeto JSON	Online/ Open source tool

?= não foi possível encontrar a informação

Roux *et al.* (2010) compararam diferentes metodologias de obtenção de dados altimétricos, concluindo que para uma abordagem em escala global pode ser interessante o uso de um procedimento totalmente automático. Contudo, pode haver diferenças significativas entre as séries obtidas por cada método numa mesma estação virtual. Como solução os autores sugeriram a proposição de uma abordagem que focasse nas diferenças de contexto de cada estação (morfologia do rio, relevo, etc..) de forma a permitir que cada usuário escolha a metodologia mais adequada para cada situação.

Considerando as limitações dos métodos manuais e necessidade de processos mais automatizados de obtenção das séries, Maillard e Calmant (2013) propuseram o SWG. Trata-se de uma ferramenta de código aberto com três opções de metodologias de processamento de dados de altimetria por satélite para obtenção do nível de água, permitindo a criação de EVs baseadas nos *tracks* dos satélites e polígonos de cursos d'água, ambos inseridos como shapefiles. Maiores detalhes sobre o SWG são apresentados no Capítulo de Material e métodos, já que o aperfeiçoamento desta ferramenta foi um dos objetivos da presente pesquisa.

Conforme apontado por Roux *et al.* (2010), as abordagens automatizadas permitem o processamento em larga escala, mas não dispensam a necessidade de análise da qualidade dos dados obtidos, o que demanda um pós-processamento com remoção de *outliers* e aplicação de filtros, que no processamento manual teriam sido removidos durante a análise do usuário.

2.3 Aplicações da AS à hidrologia fluvial

2.3.1 Estudos de validação de séries de AS

Estações virtuais (EVs) correspondem às seções do rio interceptadas por um traço do satélite. Quando uma estação virtual encontra-se suficientemente próxima de uma estação linimétrica (os critérios de proximidade variam de um autor para outro), torna-se possível comparar as séries obtidas para EV e EF conforme as datas das observações. As principais estatísticas utilizadas nas análises comparativas entre séries de EVs e EFs são: a raiz do erro quadrático médio (RMSE - *root mean square error*), o coeficiente de correlação R, o coeficiente de determinação R² e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). Entretanto, conforme apontado por Bercher (2008) é importante observar o aproveitamento dos dados que cada missão proporciona, pois há uma série de fatores que ocasiona perda de informação pelos altímetros radar. Um dado acurado, mas numa frequência muito baixa pode não ser muito útil. A típica resolução temporal dos satélites já é baixa quando comparada aos dados *in situ* e pode piorar caso haja uma perda de dados elevada.

Em 1993, Koblinsky *et al.* (1993) elaboraram o primeiro estudo num sistema fluvial e obtiveram um RMSE de 70 cm entre os dados do satélite GEOSAT e medidas *in situ* na bacia Amazônica. Desde então, uma série de trabalhos de validação de séries altimétricas foram desenvolvidos na região Amazônica. Birkett *et al.* (2002) obtiveram um RMSE de 110 cm e alguns valores ótimos em torno de 40 cm a 60 cm para série altimétrica derivada do altímetro do satélite Topex/Poseidon, no ano de 1992. Leon *et al.* (2006) utilizaram dados dos satélites Topex/Poseidon e Envisat e obtiveram um RMSE de 12 cm.

Ao longo das últimas três décadas inúmeros estudos de validação dos dados de AS foram desenvolvidos, porém mesmo com a evolução destes instrumentos nos últimos anos o erro dos níveis d'água obtidos pelos altímetros está na ordem de decímetros (Tabela 2.3). Há que se destacar ainda que, na maioria dos estudos, a estimativa de RMSE é feita com base num ajuste entre a referência altimétrica local das réguas da EF e a referência global dos dados da EV, a partir de medidas de tendência central das séries. Assim é apenas o erro relativo que pode ser analisado, o que resulta em uma visão otimista dos desvios absolutos entre as séries (Bercher, 2008; Jarihani *et al.*, 2013).

A acurácia de uma medida se refere à quão próxima do valor real a medida está. A precisão é uma medida de quão bem um resultado pode ser determinado, independentemente da comparação a um valor teórico ou verdadeiro (JCGM, 2008; UNC, 2011). Nos estudos de validação de dados AS, os valores das séries *in situ* são convencionados como verdadeiros. Portanto, nos casos em que não se dispõe de dados *in situ* com altitudes absolutas estima-se a precisão dos satélites em medir as oscilações de nível (comumente chamadas de anomalias). Nas situações em que se dispõe de dados altimétricos *in situ* torna-se possível medir a acurácia, contudo este tipo de análise raramente é encontrado nos estudos de AS. Dentre todos os estudos apontados na Tabela 2.3 apenas Biancamaria *et al.* (2017) e Pereira (2018) reportam o RMSE absoluto, enquanto os demais analisaram as anomalias das séries *in situ* e de satélite. Os erros obtidos por estes dois estudos são significativamente maiores que dos demais estudos, indicando duas coisas: quanto a análise relativa pode ser otimista e a possível existência de viés nos dados de AS. Para os demais trabalhos, os menores erros são de poucos centímetros (especialmente para lagos e grandes rios) e atingem 2,0 a 3,5 m, sendo os valores mais altos geralmente associados a rios mais estreitos (rios Po, Garrone, São Francisco, alguns rios da China).

A comparação entre EFs e EVs raramente é feita num mesmo local (Dettmering *et al.*, 2016), o que é outra fonte de erro difícil de avaliar. Essa consideração acaba limitando a comparação dos resultados de AS apenas a EFs próximas. Silva J. *et al.* (2010) usaram um limite de 30 km,

Maillard *et al.* (2015) restringiram a comparação com EFs até 25 km e Schwatke *et al.* (2015) usaram EVs com distâncias variando de 6 a 68 km. Obviamente não há uma regra definida para determinar uma distância aceitável entre EV e EF, devendo ser avaliados fatores como a declividade da linha d'água, alteração significativa da morfologia da seção, chegada de tributários, etc...

Tabela 2.3 – Amostra de estudos recentes de AS em rios e lagos e erros relativos obtidos (**únicos estudos que consideraram RMSE absoluto*)

Autores	Área de estudo	RMSE (m)
Frappart et al. (2006)	Rio Negro, Solimões, Tapajós - Brasil	Envisat (Ice-1): 0,07 – 0,53m (\bar{x} =0,27 m)
Sarmiento & Khan (2010)	Great Slave Lake, Canadá	T/P: 0,109 m; J-1: 0,051 m
Silva J. (2010)	Bacia Amazônica - Brasil	Envisat: 0,12 m – 2,25 m (\bar{x} =0,40 m); ERS-2: 0,32 m - 1,2 m (\bar{x} =0,70 m)
Jarihani et al. (2013)	Lagos Argyle e Eildon - Austrália	T/P: 1,5 m; J-1: 1,07 m; J-2: 0,28 m; Envisat: 0,25 m; GFO: 0,89 m; IceSat:0,04m
Schwatke et al. (2015)	Rio Amazonas, Negro, Solimões, Tapajós-Brasil	Envisat: 0,08–0,59 m (\bar{x} =0,33 m) SARal: 0,08–0,32 m (\bar{x} =0,17 m)
Maillard et al. (2015)	Rio São Francisco – Brasil	Envisat: 0.61-0.76m (\bar{x} =0,67 m) SARal: 0.47-0.59m (\bar{x} =0,52 m)
Detmering et al. (2016)	Rios Paraguai, Cuiabá e Piquiri - Brasil	Envisat: 0,29–0,96 m (\bar{x} =0,47 m)
Tourian et al. (2016)	Rio Po - Itália	Todos os satélites juntos: 0,70–1,08 m (\bar{x} =0,91 m); T/P: 0,90–1,56 m (\bar{x} =1,23 m); Envisat: 0,60–0,92 m (\bar{x} =0,71 m); Jason-2: 0,73–1,20 m (\bar{x} =0,86 m)
	Rio Congo - Congo	Envisat (10 EVs); SARal (10 EVs): \bar{x} =0,44 m
	Rio Mississipi - USA	T/P (7 estações) Envisat (6 estações): \bar{x} =2,31 m
Biancamaria et al. (2017)*	Rio Danúbio - Europa	Envisat (21 EVs), T/P (6 EVs) e SARal (1 EV): \bar{x} =1,12 m
	Rio Garrone – França	Envisat: 0,58–27,92 m (\bar{x} =8,10 m); SARal: 1,90–105,13 m (\bar{x} = 63,69 m), Jason-2: 2,57–6,96 m (\bar{x} = 4,52 m)
Schneider et al. (2018)	Rio Po - Itália	CryoSat-2 LRM: 0,15–3,12 m (\bar{x} =0,34 m); CryoSat-2 SAR: 0,11–2,03 m (\bar{x} =0,40 m); CryoSat-2 SARIn: 0,12–2,47 m (\bar{x} =0,37 m)
Verron et al. (2018)	Rio Brahmaputra - Índia	SARal: \bar{x} =0,41 m; Jason-2: \bar{x} =1,19 m
Bogning et al. (2018)	Rio Ogooué - Camarão	ERS-1: 0,28–1,05 m (\bar{x} =0,61 m); Envisat: 0,21–0,48 m (\bar{x} =0,34 m); SARal: 0,22–0,36 m (\bar{x} =0,28 m); Envisat - X: 0,296–0,442 m (\bar{x} =0,35 m); Sentinel-3A: 0,198–0,412 m (\bar{x} =0,33 m); CryoSat-2: 0,25 m (uma estação)
Pereira (2018)*	Rio São Francisco - Brasil	Envisat: 0,98-2,02 m SARal: 0,59- 7,74 m
Boergens et al. (2019)	Rio Mekong e tributários - Sudeste Asiático: Laos, Tailândia, Camboja	Multimissão: Envisat/SARal/Jason/Cryosat Rio Mekong: 1,19 - 2,22 m (\bar{x} =1,52 m); R. Mekong e tributários: 1,05 – 1,75 m (\bar{x} =1,33 m).
Coss et al. (2020)	12 rios globais com largura > 900 m (380 EVs)	Envisat e Jason-2: Desvio padrão do erro: 0,11-1,08 m (\bar{x} =0,93 m).
Jiang et al. (2020)	Rios na China (50 EVs)	S-3A: 11 EVs- sem dados úteis; 19 EVs: 0,12m – 0,60 m; 7 EVs: 0,60m – 0,90 m; 13 EVs: 0,91-3,61m

Outro ponto que merece destaque é a subjetividade na geração das séries altimétricas, pois nem sempre os autores deixam claro nas publicações os critérios utilizados para seleção de pontos válidos, limiares aplicados em filtros, cálculo dos desvios ou remoção de outliers. Conforme apontado por Roux *et al.* (2010) a utilização de diferentes procedimentos para definição das estações virtuais e obtenção das séries temporais de nível, torna difícil a comparação dos resultados. Maillard e Calmant (2013) demonstraram como a utilização de limites de tolerância a outliers mais baixos impactaram na estimativa do RMSE entre séries de EVs do Envisat e EFs para algumas estações no Rio São Francisco (Figura 2.16).

Silva A. (2010) testou diferentes metodologias de obtenção de níveis d'água a partir de dados do Jason-2 em algumas EVs no Brasil e obteve grandes variações de RMSE relativo. Uma das EVs era próxima a EF São Francisco e o RMSE relativo variou de 0,26 m a 1,23 m (média de 0,40 m) para os 12 diferentes métodos utilizados.

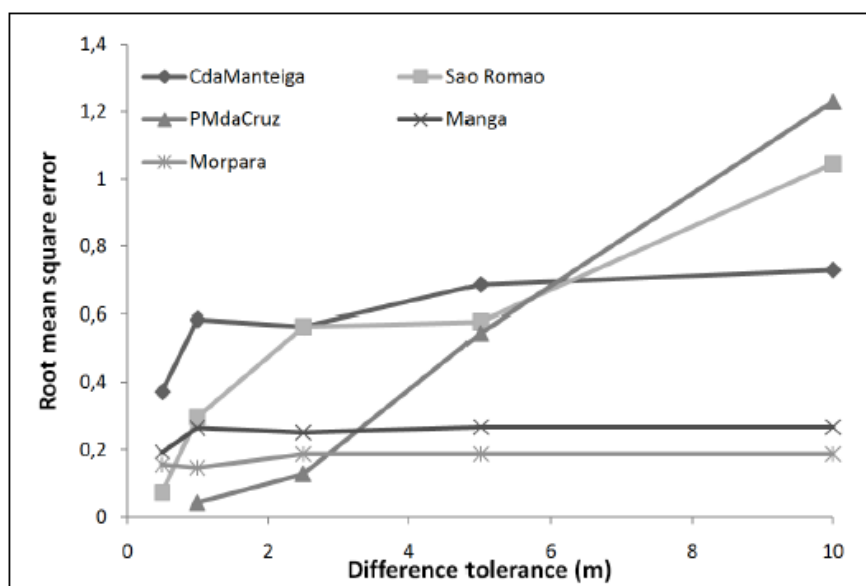


Figura 2.16 – Variação do RMSE com o nível de tolerância a outliers para algumas estações no Rio São Francisco (Fonte: Maillard e Calmant; 2013)

2.3.2 Estimativa de viés dos dados de AS

A atividade de validação consiste em quantificar a acurácia dos dados de satélite contidos nos produtos geofísicos. Tipicamente a validação é associada à atividade de calibração, que visa assegurar que a performance de um instrumento está conforme o Sistema Internacional de Unidades (SI) ou de acordo com os padrões aceitos pela comunidade e esperados para cada missão. As duas atividades são referidas em conjunto como cal/val (Quarty *et al.*, 2021). No

geral, os erros de altimetria incluem um erro sistemático (viés), um termo de deriva ou até mesmo um padrão de erro geograficamente correlacionado. O viés pode ser estimado pela atividade de calibração, usualmente comparando dados de AS a níveis d'água obtidos independentemente, por estações de maré ou GPS acoplados a boias; é composto pelo valor médio dos desvios obtidos e uma parcela referente à precisão (geralmente o desvio padrão dos desvios) (Bosch *et al.*, 2014). A estimativa do viés de diferentes missões é imprescindível especialmente em trabalhos que combinam séries multimissão (Calmant *et al.*, 2013; Tourian *et al.*, 2016).

Os vieses de dados de AS estão bem documentados para os oceanos, para os quais o nível d'água é referenciado como SSH (*sea surface heights*) e tipicamente giram em torno de dezenas de milímetros a poucos decímetros (Bonfond *et al.*, 2017). As calibrações feitas para os oceanos não se aplicam diretamente às águas continentais (rios, lagos, reservatórios, etc.), compreendendo correções, algoritmos de *retracker* e efeitos geográficos (Créaux *et al.*, (2018)). Ao redor de todo mundo, há áreas de estudo compreendendo lagos e áreas costeiras utilizadas como referência para trabalhos de calibração e validação dos dados de AS, cita-se: Bonfond *et al.* (2003, 2015) na Ilha de Corsega (FR), Shum *et al.* (2003) e Cheng *et al.* (2010) no Lago Erie, em Ohio (um dos grandes lagos); Watson *et al.*, (2004, 2011) no Estreito de Bass na Austrália; Haines *et al.* (2002, 2009) na costa central da Califórnia; Créaux *et al.* (2009, 2011, 2013, 2018) no lago Issykul, no Quirguistão, e Mertikas *et al.* (2018 e 2020) nas ilhas de Gavdos e Creta, na Grécia. De maneira geral, os vieses estimados nos lagos são próximos aos encontrados nos oceanos (Tabela 2.4).

Frappart *et al.* (2006) mencionam valores de viés do Envisat no Rio Tapajós, obtidos da comparação de dados três EVs com séries obtidas a partir de EFs próximas e fatores de escala para compensar a diferença de largura. Trata-se de um estudo preliminar, não fica claro qual a metodologia completa utilizada e é apresentado o viés por estação, sem a existência da parcela relativa à precisão. Assim, o termo 'viés' parece ter sido utilizado simplesmente para referenciar os desvios ou erros médios entre as séries das EVs e EFs, sem necessariamente representar a quantificação do erro sistemático do Envisat naquele trecho do Rio Tapajós (Tabela 2.4). Em 2013, o estudo de Calmant *et al.* foi pioneiro na estimativa de viés dos dados altimétricos em rios (também na Bacia Amazônica), de maneira padronizada, com proposição de dois modelos baseados na equação do movimento ondulatório ajustada para comparação dos dados de estações virtuais aos dados de estações *in situ* niveladas. Decorridos seis anos, Breda *et al.* (2019) apontam a carência de documentações estabelecidas sobre os vieses das missões altimétricas em rios. Quartly *et al.* (2021) traçam um panorama mundial das atividades mais

recentes de calibração e validação e fica evidente que não há estudos dedicados a ambientes fluviais. O foco dos trabalhos de cal/val ainda está no aperfeiçoamento da estrutura e equipamentos utilizados nas atividades de calibração em grandes lagos. Contudo, com o crescente uso de altimetria em rios é essencial haver locais de validação representativos destas condições.

Tourian *et al.* (2016) seguiram uma abordagem semelhante aos estudos em oceanos para estimar o viés de um rio, mas adotaram como referência dados de três estações maremográficas no Mar Adriático, onde o Rio Po (objeto de estudo) desagua. Os autores assumiram então que o viés seria o desvio padrão das diferenças entre as séries de nível de satélite e a média do zero da série das estações de maré (Tabela 2.4). Tarpanelli *et al.* (2017) afirmam utilizar abordagem semelhante a Tourian *et al.* (2016) no rio Níger, contudo o valor de viés utilizado não é mencionado no estudo. Entretanto, conforme citado anteriormente, as calibrações feitas para os oceanos não se aplicam às águas continentais.

Normadin *et al.* (2018) por sua vez não utilizaram dados de nivelamento altimétrico, mas procederam a estimativa de vieses intermissões altimétricas, para o delta interior do Rio Níger. Os satélites utilizados foram ERS-2, Envisat, Saral, família Jason e S-3A, contudo não são apresentados valores de viés por satélite, apenas os vieses entre três duplas de satélites, consistindo na média das diferenças de nível d'água numa mesma data. Os resultados encontrados foram: $-1,16 \pm 0,38$ m entre ERS-2 e Envisat; $0,75 \pm 0,28$ m (amplitude de 0,34 a 1,06 m) entre Jason-1 e Jason-2 e $-0,27 \pm 0,08$ m ($-0,36$ a $-0,14$ m) entre Jason-2 e Jason-3.

Tabela 2.4 – Vieses estimados para dados de AS em diferentes estudos (em negrito os estudos feitos em rios)

<i>Missão</i>	<i>Viés (m)</i>	<i>Área de estudo</i>	<i>Autores</i>
Jason-2	$(-4,7 \pm 1,0) \times 10^{-3}$	Oceanos - Global	Bosch <i>et al.</i> (2014)
Envisat	$(450,8 \pm 7,9) \times 10^{-3}$		
Envisat new	$(441,2 \pm 2,6) \times 10^{-3}$		
Saral	$(-67,5 \pm 1,7) \times 10^{-3}$		
Cryosat	$(-244,0 \pm 3,0) \times 10^{-3}$		
Envisat	0,71, 0,24 e -0,32 0,22, 0,65 e 0,76	Lago Grande de Curuai Rio Tapajós (Brasil)	Frappart <i>et al.</i> (2006)
Envisat	1,044 ± 0,212	Rio Amazonas	Calmant <i>et al.</i> (2013)
Envisat	0,52 ± 0,06	Rio Po (Itália)	Tourian <i>et al.</i> (2016)
Envisat new	0,55 ± 0,06		
Jason 2	0,55 ± 0,04		
Saral	0,42 ± 0,05		
Cryosat	-1,19 ± 0,05		
Jason-3	0,028 ± 0,04 (Ocean)	Lago Issykul (Quirquistão)	Crétaux <i>et al.</i> (2018)
	0,206 ± 0,03 (Ice 1)		
Sentinel-3A	-0,014 ± 0,02 (Ocean) 0,285 ± 0,02 (Ice 1)		

Diante do acima exposto, enfatiza-se que o termo ‘viés’ será utilizado ao longo desta tese no sentido de erro sistemático estimado a partir de atividades de calibração ou adaptações que visem essa estimativa, baseadas em comparar os dados de AS a uma fonte alternativa de dados altimétricos o mais confiável possível.

2.3.3 Obtenção de variáveis hidrológicas a partir de AS

A AS permite a obtenção direta dos níveis d’água, viabiliza o cálculo da declividade da linha d’água e quando associada a outros dados (*in situ* ou de sensoriamento remoto), a profundidade do escoamento, a batimetria e estimativa de vazão (Bjerklie *et al.*, 2003).

A declividade da linha d’água é uma variável hidrológica essencial na modelagem hidrodinâmica, mas dificilmente disponível, já que EFs possuem referência local e levantamentos de campo para obtenção deste dado são caros e não fazem parte da rotina de operação das redes de monitoramento. Assim, este é um possível produto da AS de grande valor (Moreira, 2016). Tipicamente, os estudos de modelagem e projeto de estruturas hidráulicas utilizam dados de modelos de elevação digital (MDE) globais para obtenção de altitudes absolutas e declividades (como em Sichangi *et al.* (2018)). O modelo mais utilizado é o SRTM, cuja resolução horizontal original é 90 m e a representatividade temporal limitada aos 11 dias de coleta de dados dessa missão, ocorrida em fev/2000. Mesmo com o lançamento de satélites e existência de produtos com resolução melhor, como os satélites japoneses ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) de 12,5 m de resolução horizontal, os dados gratuitos atualmente disponíveis ainda se limitam a 30 m de resolução e com representatividade temporal muito limitada para aplicação em estudos de hidrologia e hidráulica (USGS, 2021; ASF, 2021). As acurácias verticais destes modelos estão estimadas em torno de 5 m para o ALOS em áreas planas (atinge até 12 a 14 m em relevos complexos) e 9 m para o SRTM (oscilando entre 7 e 13 m) (Santillan e Santillan, 2016; Uuemaa *et al.*, 2020).

Leon *et al.* (2006) estimaram a declividade do fundo do canal para trechos do Rio Negro e compararam com as declividades da linha d’água obtidas por EVs do Envisat, encontrando resultados compatíveis entre si (não são apresentadas métricas de qualidade para esses dados). Getirana *et al.* (2009) obtiveram a declividade do Rio Uraricoera (bacia do Rio Negro) a partir de nove estações virtuais do Envisat e compararam à declividade derivada do SRTM, obtendo resultados similares para as duas metodologias (desvios de 2 a 18% na maior parte do trecho), mas com precisão maior para os dados do Envisat, segundo os autores. Moreira (2016) construiu perfis longitudinais mensais de alguns rios amazônicos a partir da interpolação dos dados de

EVs das missões Jason-2 e Envisat. Os resultados obtidos foram consistentes com os perfis obtidos por receptores GNSS (não são quantificados os desvios entre os dados de satélite e de receptores GNSS).

A profundidade do escoamento não pode ser medida diretamente por sensoriamento remoto, sendo necessário acoplá-la a outras características observáveis do canal (Bjerklie *et al.*, 2003). Neste contexto, os trabalhos que calculam a profundidade a partir de dados de AS, geralmente passam pela obtenção da batimetria e visam à obtenção da vazão, tais como Moramarco *et al.* (2019) e Breda *et al.* (2019). Sichangi *et al.* (2018) propuseram a estimativa de séries de profundidade do escoamento a partir de um valor de profundidade inicial (estimado por Manning e pela equação da continuidade), posteriormente ajustado pelas oscilações de nível observadas nas séries de AS.

Inúmeros trabalhos objetivam o cálculo da vazão a partir de dados de sensoriamento remoto e utilizam os dados de AS de diferentes formas. Getirana *et al.* (2009), Tarpanelli *et al.* (2013), Paris *et al.* (2016) construíram curvas-chaves relacionando cotas altimétricas do satélite às vazões medidas ou modeladas. A modelagem hidrológica com uso de dados de AS por sua vez, vem sendo largamente utilizada (Smith *et al.* (1996), Smith (1997), Bjerklie *et al.*, (2003, 2005), Leon *et al.* (2006), Tarpanelli *et al.* (2013), Garambois *et al.* (2017), Domeneghetti *et al.* (2021)) e na última década vem incorporando técnicas de assimilação de dados, como realizado em Getirana (2009), Paiva (2012), Michailovisky *et al.* (2013) e Schneider *et al.* (2018).

Lançando mão de dados históricos *in situ*, Bjerklie *et al.* (2005), Negrel *et al.* (2010), Tarpanelli *et al.* (2013), Birkinshaw *et al.* (2014), Tourian *et al.* (2017), utilizaram as equações propostas por Bjerklie *et al.* (2003). Trata-se de um conjunto de equações de escoamento parametrizadas para 1012 medições de descarga em 102 rios norte-americanos e da Nova Zelândia, e quatro medições no Rio Amazonas. A partir destas equações é possível obter a vazão utilizando algumas opções de variáveis de entrada observáveis por satélite.

No geral, mesmo estudos que enfatizam o uso exclusivo ou prioritário de dados de sensoriamento remoto para estimativa de vazão, em determinada etapa da metodologia utilizam dados *in situ*, especialmente para calibração e parametrização de modelos, algoritmos e equações, como exemplo cita-se: Smith *et al.* (1996), Smith (1997), Bjerklie *et al.* (2003, 2005), Kouraev *et al.* (2004), Gleason, Smith e Lee (2014), Birkinshaw *et al.* (2014), Tourian *et al.* (2016), Tarpanelli *et al.* (2013, 2017), Sichangi *et al.* (2018), Possa, Maillard e Oliveira (2020). Conforme exposto por Bjerklie *et al.* (2018), o uso combinado do sensoriamento remoto,

modelagem e dados *in situ* pode fornecer a estrutura necessária para monitorar consistentemente parâmetros hidráulicos e a dinâmica de uma bacia hidrográfica em diferentes condições de escoamento, apontando para um método eficiente para compreender o sistema fluvial em sua totalidade.

2.3.4 Limitações em rios de médio e pequeno porte

Até que ponto a largura do curso d'água inviabiliza a utilização dos dados de altimetria espacial tem sido uma questão bastante discutida nas últimas duas décadas (Calmant e Seyler, 2006; Maillard *et al.*, 2015; Biancamaria *et al.*, 2018; Coss *et al.*, 2020). As primeiras limitações decorrem diretamente do tamanho da pegada (*footprint*) dos altímetros no modo de baixa resolução. Isto limita o potencial de se obter dados acurados para rios de largura menor que 1 km. A pegada do satélite não é um parâmetro de operação constante e pode alcançar vários quilômetros: 15 km para o Cryosat, cerca de 8 km para o Envisat, 10 km para o Jason e 4 km para o Saral. No caso do Sentinel-3A e 3B que operam em modo SAR, a pegada é bastante reduzida (elipse de 300 m por 1,6 km). Assim, em rios de largura muito menor que o *footprint* o altímetro estará “enxergando” além da superfície do rio uma área adjacente com outros tipos de cobertura que podem retornar ecos parecidos com a resposta da água e, conseqüentemente, comprometer a identificação do nível do rio propriamente dito (Cipollini e Snaith, 2013; Maillard *et al.*, 2015; Egido e Smith, 2017; ESA, 2021).

Situações de mudança abrupta do relevo podem também provocar a perda de ancoragem do altímetro levando o mesmo a um processo de reinicialização que leva apenas alguns segundos, mas acarreta perda de dados ao longo de extensões significativas, sobretudo para rios de largura menor que a pegada do satélite (Silva J., 2010).

Outro fenômeno frequente chamado de efeito *hooking* também pode prejudicar a precisão alcançável. Este efeito acontece quando o altímetro está medindo a altura de uma superfície reflexiva (água) fora de seu nadir (off-nadir), formando um nível d'água em formato parabólico na seção transversal, superestimando a distância entre o satélite e a água e gerando uma elevação inferior ao nível real do rio (Figura 2.17) (Biancamaria *et al.*, 2018).

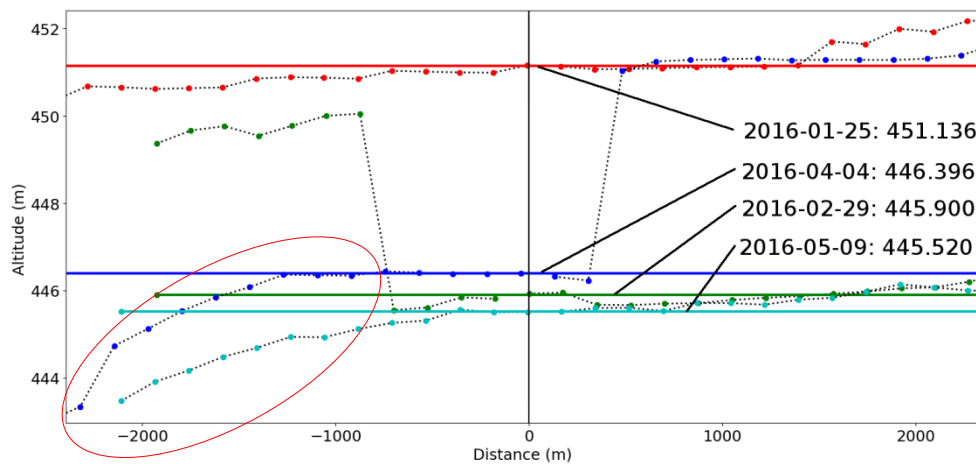


Figura 2.17 –Exemplo de fenômeno de *hooking* na margem esquerda para os perfis circulados

Os resultados obtidos por Birkett *et al.* (2002) para dados de altimetria do satélite Topex/Poseidon na Bacia Amazônica apontaram que o rio deve ter largura superior a 1 km quando existem planícies de inundação. Getirana (2009) apontou falhas nas séries altimétricas para seções do rio inferiores a 200 m de largura e atribuiu este fato à distância entre medições do satélite Envisat de 350 m. Por outro lado, Silva J. *et al.* (2013) apontam que a largura do rio não é necessariamente o principal fator que afeta significativamente a qualidade das séries das missões espaciais, pois com dados do Envisat obtiveram a variação do nível d'água em rios e áreas alagadas de 50 m de largura. Conforme descrito por Maillard *et al.* (2015), fatores ambientais como sinuosidade do curso d'água, classe de cobertura do solo e topografia nas margens, podem comprometer a obtenção dos dados pelo altímetro e serem ainda mais limitantes que a largura do rio. Biancamaria *et al.* (2017) e Normadin *et al.* (2018) desenvolveram análises em rios considerados de pequeno a médio porte e concluíram que algumas limitações na acurácia dos dados em função da largura do curso d'água podem ser contornadas com a utilização do *open loop tracking mode*, descrito no item 2.2.1. Jiang *et al.* (2020) testaram 50 EVs do S-3A em variados rios na China e os resultados demonstraram que o S-3A provê bons resultados em rios de médio porte (300 m) da mesma forma que para rios de mais de 500 m de largura, sendo que o fator determinante é o terreno circundante a EV.

A expectativa é que nos próximos anos os desafios de se trabalhar com cursos d'água mais estreitos sejam superados, à medida que serão lançadas missões com foco em observação de cursos d'água continentais, como o satélite SWOT a ser lançado em 2022. As configurações dos altímetros destas missões futuras e os parâmetros de operação devem prover melhorias significativas na acurácia dos dados altimétricos para cursos d'água de menor porte. Estudos que aprofundem o conhecimento dos erros envolvidos e o desenvolvimento de metodologias e ferramentas que melhorem o processamento dos dados pelos usuários finais também podem

prover melhorias na performance da AS em rios de pequeno e médio porte (Biancamaria *et al.*, 2016; Pereira, 2018; Gao *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 3.1 apresenta as principais etapas da pesquisa, que estão descritas detalhadamente nos itens que seguem.

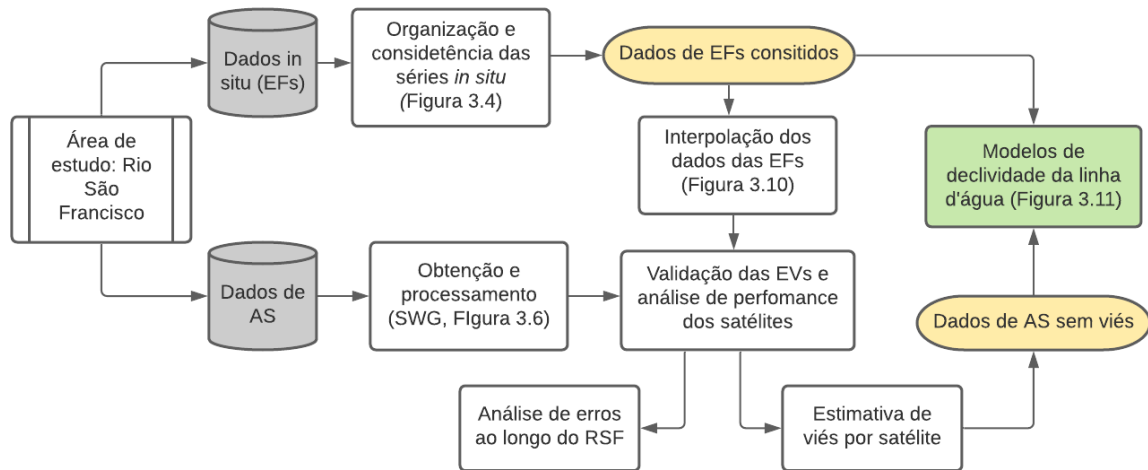


Figura 3.1 – Etapas metodológicas da pesquisa

3.1 Área de estudo: Rio São Francisco

O Rio São Francisco foi escolhido como área de estudo devido a alguns fatores. O primeiro deles diz respeito à largura das seções transversais abaixo de 1 km em sua maior parte, sobretudo até o reservatório de Sobradinho. Assim caracteriza-se com um rio de médio porte para uso dos dados de AS. Outra razão é sua extensão de quase 3000 km, o que permite a definição de inúmeras estações virtuais (EVs) de diferentes missões. Por fim, trata-se de um rio estratégico, de relevante interesse nacional, por ser o maior curso d'água do semiárido brasileiro e elevado potencial hidrelétrico. A seguir é feita uma breve caracterização da bacia do Rio São Francisco.

Com extensão aproximada de 2.700 km, o Rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, ao Sul de Minas Gerais, adentra o sertão baiano e depois faz divisa entre os estados de Sergipe, Pernambuco e Alagoas, por isso é conhecido como rio da integração nacional. A bacia do Rio São Francisco apresenta área de drenagem de 639.219 km², cerca de 7,5% do território nacional, abrangendo diferentes condições climáticas, sociais e econômicas. É dividida em quatro unidades fisiográficas: Alto São Francisco (16% da bacia), Médio São Francisco (63%), Submédio (17%) e Baixo (4%) (MMA, 2006; CBHSF, 2016). Na Figura 3.2 visualizam-se as regiões fisiográficas e EFs da calha principal do RSF (as EFs de interesse na pesquisa serão mais bem detalhadas no item 3.2). Ressalta-se que a divisão das regiões fisiográficas pode ser revisada periodicamente, sendo utilizada aqui a que consta nas referências consultadas citadas.

As principais características hidroclimáticas das regiões fisiográficas do Rio São Francisco são apresentadas na Tabela 3.1. As maiores altitudes (até 1.600 m) da bacia do São Francisco estão localizadas na Unidade fisiográfica Alto São Francisco, em decorrência das Serras da Canastra e Espinhaço; as declividades oscilam entre 0,20 e 0,70 m e há apenas uma EF de interesse da pesquisa (EF Pirapora). As regiões do Médio e Submédio são caracterizadas pela presença de Chapadas, com altitudes entre 200 a 1.400 m. O Médio RSF é o trecho mais extenso, compreendendo mais de 1200 km entre a foz do Rio das Velhas e o início do Reservatório de Sobradinho. Neste trecho estão situadas nove dentre as 12 EFs utilizadas nesta pesquisa e a declividade média é de 0,10 m/km. O Submédio RSF compreende o trecho entre os Reservatórios de Sobradinho e Paulo Afonso, apresenta grande amplitude de declividades (0,10 a 3,10 m/km) e nele localizam-se as duas últimas EFs de interesse desta pesquisa. O Baixo São Francisco inicia-se após a Usina de Paulo Afonso e vai até a foz, a declividade média do rio neste trecho é 0,10 m/km (MMA, 2006, ANA, 2003).

Tabela 3.1 – Características hidroclimáticas das regiões hidrográficas do Rio São Francisco

Característica	Regiões Fisiográficas			
	Alto	Médio	Submédio	Baixo
Clima predominante	Tropical úmido e Temperado de altitude	Tropical semiárido e Subsumido seco	Semiárido e Árido	Subúmido
Precipitação média anual (mm)	1.100 a 2.000 (1.372)	600 a 1.400 (1.052)	350 a 800 (693)	350 a 1.500 (957)
Temperatura média (°C)	23	24	27	25
Insolação média anual (h)	2.400	2.600 a 3.300	2.800	2.800
Evapotranspiração média anual (mm)	1.000	1.300	1.550(*)	1.500
Trecho principal (km)	702	1.230	550	214
Declividade do rio principal (m/km)	0,20 a 0,70	0,10	0,10 a 3,10	0,10
Contribuição da vazão natural média (%)	41,7%	54,6%	1,9%	1,8%
Vazão média anual máxima (m ³ /s)	Pirapora 1303 em fevereiro	Juazeiro 4393 em fevereiro	Pão de Açúcar 4660 em fevereiro	Foz 4.680 em março
Vazão média anual mínima (m ³ /s)	Pirapora 637 em agosto	Juazeiro 1419 em setembro	Pão de Açúcar 1507 em setembro	Foz 1.536 em setembro
Vazão específica (L/s/km ²)	11,89	3,59	1,36	1,01

* Na parte mais seca da bacia e do semiárido brasileiro, esse valor atinge o extremo de 2.700 mm/ano. (Fonte: ANA, 2003; vazão específica: MMA, 2006)

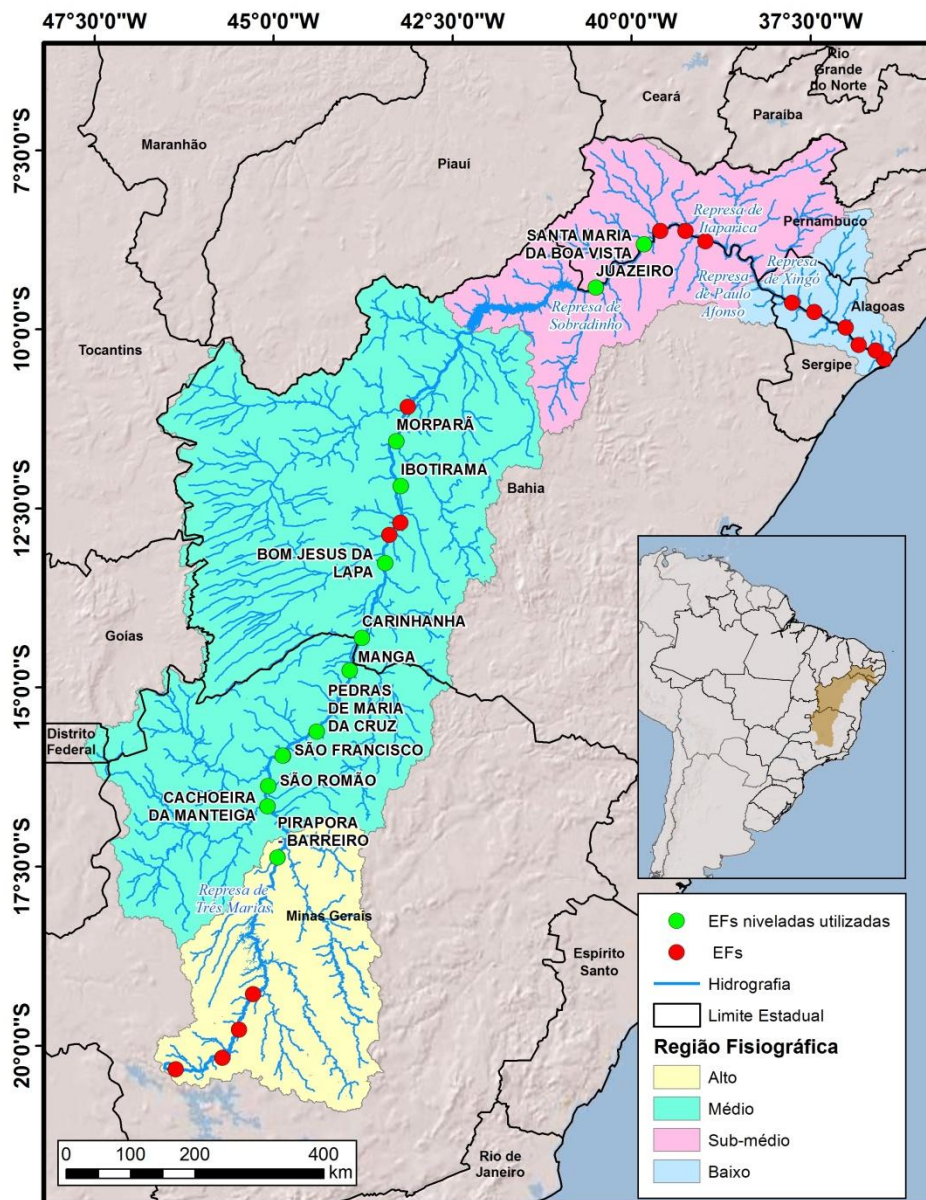


Figura 3.2 – Regiões fisiográficas da bacia do Rio São Francisco

A Bacia do São Francisco possui 36 afluentes mais significativos, dentre os quais apenas 19 são perenes destacando-se pela margem direita, os Rios Pará, Paraopeba, Velhas e Verde Grande e, pela margem esquerda, os Rios Abaeté, Paracatu, Urucuaia, Pandeiros, Carinhanha, Corrente e Grande (Pereira *et al.*, 2007).

Os climas predominantes na bacia são o tropical e semiárido brasileiro, sendo que este último abrange cerca de 57% da área da bacia (MMA, 2006). O clima tropical úmido caracteriza o Alto e parte do Médio São Francisco, que consequentemente possuem os índices pluviométricos mais altos da bacia, assegurando assim sua perenidade. De acordo com Pereira *et al.* (2007), os índices pluviométricos variam de 370 a 1800 mm por ano e a vazão específica média de longo termo de 0,2 a quase 18 L/s.km² (Figura 3.3), evidenciando a acentuada diferença de regiões

água de Sobradinho, o principal reservatório da bacia, em termos de capacidade de armazenamento.”

O Rio São Francisco ganhou caráter ainda mais estratégico com o lançamento do Projeto de Transposição de suas águas. Desde o início dos anos 2000 há uma grande discussão no país sobre os impactos do projeto no regime hidrológico e demais características hidroclimáticas da bacia, bem como a qualidade duvidosa e atrasos das obras (Domingues, 2019). Trata-se de um empreendimento do Governo Federal, sob responsabilidade do Ministério da Integração Nacional até 2019, quando o Ministério foi extinto, e desde então sob responsabilidade do Ministério do Desenvolvimento Regional. O Projeto consiste na construção de dezenas de canais para conduzir as águas do Rio São Francisco às bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional. A meta final é assegurar oferta de água, em 2025, a cerca de 12 milhões de habitantes de 390 municípios do Agreste e do Sertão dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte. É prevista a retirada de contínua de cerca de 26 m³/s a jusante da barragem de Sobradinho, com possibilidade de aumento até 127 m³/s em situações de excedente de água (Ministério da Integração, 2011; Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021).

3.2 Séries de dados *in situ*

Foram selecionadas as EFs com nivelamento altimétrico, série de dados de nível e medições disponíveis para validação dos dados de AS, totalizado 12 estações, em dois subtrechos contínuos, totalizando cerca de 1400 km (Figura 3.2). A Tabela 3.2 apresenta as 12 EFs de interesse e as respectivas distâncias a nascente e entre estações, bem como as oscilações diárias de nível. A distância de uma EF a outra varia entre 41 e 140 km (média de 97 km). As oscilações diárias de nível (entre as leituras de 7 h e 17 h) são de poucos centímetros na maior parte do tempo: percentil 90 de 0,08 a 0,15 m para 11 EFs. A EF Juazeiro apresenta maiores oscilações num mesmo dia em função da operação da UHE Sobradinho. As oscilações de nível considerando as cotas máxima e mínima, para a série de dados de 2002 a 2020, são da ordem de 7 m, variando de 3,1 m a 9,6 m (Tabela 4.2).

Para obtenção das séries das EFs consistidas e niveladas são consideradas as etapas da Figura 3.4. As séries históricas de nível e de medições das estações fluviométricas estão disponíveis para *download* no Hidroweb (ANA, 2021). Os dados apresentam dois níveis de consistência: brutos ou consistidos. Usualmente, os dados consistidos estão disponíveis até 2004 ou 2006. Portanto, é recomendado que antes de utilizar os dados seja feita a consistência do período faltante ou de toda a série de forma a manter a uniformidade de critérios de análise. O objetivo é assegurar que os dados *in situ* são confiáveis, especialmente quando serão utilizados na

validação de dados de outras fontes, como é o caso da presente pesquisa. A atividade de consistência das séries históricas implica analisar o conjunto de dados disponíveis visando identificar a existência dos erros grosseiros mencionados no item 2.1.2 – (Medição de variáveis hidrológicas), e sua subsequente remoção. Essa identificação é feita visualmente, através de gráficos (nível ou outras variáveis ao longo do tempo), e da criação de rotinas (*scripts*) de identificação de valores muito discrepantes em relação às medidas de tendência central de toda a série, bem como do valor anterior e posterior no caso das séries de nível diárias.

Tabela 3.2 – Estações fluviométricas de interesse no Rio São Francisco e oscilação de nível entre leituras diárias

Reservatórios Estação	Código ANA	Largura média medida (m)	Distância a nascente (km)	Distância a EF a montante (km)	Oscilação de nível entre leituras 7 h e 17 h (m)		
					Mediana	Média	Percentil 90
Três Marias			537	-			
Pirapora	41135000	376	666	-	0,01	0,04	0,10
Cachoeira da Manteiga	42210000	387	780	114	0,02	0,05	0,15
São Romão	43200000	386	821	41	0,02	0,05	0,14
São Francisco	44200000	537	884	63	0,02	0,05	0,14
Pedras M. Cruz	44290002	530	952	68	0,02	0,04	0,12
Manga	44500000	483	1070	118	0,02	0,04	0,11
Carinhanha	45290008	610	1124	54	0,01	0,04	0,10
Bom Jesus da Lapa	45480000	732	1253	129	0,02	0,03	0,09
Ibotirama	46150000	609	1393	140	0,01	0,03	0,08
Morpará	46360000	776	1476	83	0,01	0,03	0,08
Sobradinho			1909	-			
Juazeiro	48020000	770	1952	-	0,02	0,07	0,20
Santa M. da Boa Vista	48290000	468	2079	127	0,01	0,03	0,08

Após obtenção dos dados consistidos, as séries de cotas foram ajustadas para referência altimétrica global, a partir da informação proveniente do nivelamento altimétrico.

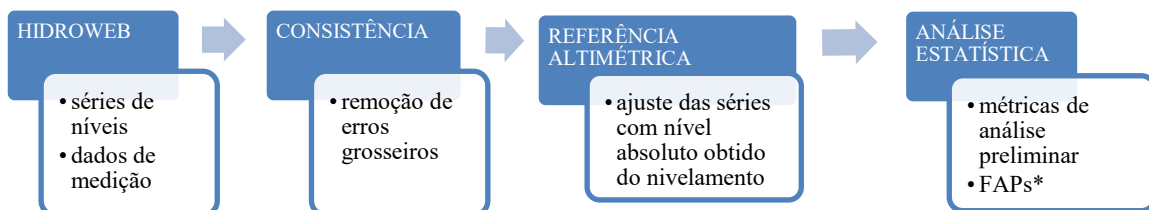


Figura 3.4 – Etapas para obtenção das séries das EFs consistidas e com nivelamento altimétrico (*Função acumulada de probabilidades)

Nivelamento altimétrico

Os nivelamentos altimétricos das EFs foram executados por técnicos e Engenheiros da CPRM em campo. Para algumas EFs os dados já estavam processados, mas boa parte da organização dos dados obtidos em campo e pós-processamento foi realizado no contexto da presente pesquisa. Para os levantamentos das altitudes absolutas das referências de nível das estações fluviométricas foram utilizados receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de dupla frequência, da marca TECGEO GTR-2 com antenas 702 GG.

O processamento dos dados coletados pelos receptores GNSS foi realizado no site do IBGE com o modo IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). Trata-se de um serviço online gratuito para o pós-processamento de dados GNSS, que faz uso do programa CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System*) desenvolvido pelo *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* (NRCan).

O processamento PPP segue as recomendações do *International Earth rotation and Reference systems Service* (IERS) (Petit e Luzum, 2010). Todos os levantamentos foram realizados com duração superior a 2 horas de observações de satélites, livres de obstruções de sinais, com o objetivo de atingir uma boa precisão. Pelos padrões e processos estabelecidos a precisão vertical dos dados está estimada entre 2 a 3 cm.

As coordenadas do processamento são referentes ao ponto de referência da antena (*ARP-Antenna Reference Point*), sendo esse ponto de referência reduzido a Referência de Nível (RN) da estação fluviométrica a fim de estimar a altura absoluta do marco. Posteriormente, subtrai-se o valor do nivelamento da RN local de seu valor absoluto, obtendo-se assim a referência altimétrica do zero da régua, que é o dado utilizado para o ajuste das séries das EFs. No PPP-IBGE foram utilizadas as coordenadas de saída em latitude, longitude e altura elipsoidal no sistema geodésico SIRGAS2000 que é compatível a nível centimétrico com o WGS84, de forma a compatibilizar as informações das régua linimétricas niveladas com os dados altimétricos dos satélites.

Análise estatística dos dados de EFs

Uma vez obtidas as séries altimétricas diárias e consistidas das EFs, foi realizada uma análise estatística preliminar dos dados, que compreende cálculo de métricas básicas para melhor caracterização dos dados *in situ* com vistas a subsidiar seu uso na validação dos dados de AS.

O período de dados de interesse foi 2002 a 2020, em função da disponibilidade dos dados de AS das missões aqui utilizadas (item 3.3.1).

Para cada uma das EFs calculou-se: medidas de tendência central (média, mediana), amplitude, assimetria e identificação de *outliers* a partir da faixa interquartil (FIQ). A faixa interquartil corresponde à diferença entre o terceiro (Q_3) e o primeiro quartil (Q_1), caracterizando *outliers* inferiores valores abaixo de $Q_1 - 1,5FIQ$ e superiores valores acima de $Q_3 + 1,5FIQ$.

Foram construídas as funções acumulada de probabilidades (FAPs) empíricas das variações de cotas altimétricas. Trata-se de um gráfico de probabilidades que associa as magnitudes ordenadas às suas respectivas probabilidades empíricas. Posteriormente todas as FAPs empíricas obtidas foram plotadas em conjunto, permitindo averiguar se há ou não similaridade de comportamento das estações quanto às oscilações de cota.

Além das séries de nível d'água, as EFs de interesse na calha do São Francisco dispõem de séries de medições de vazão. Assim, foi possível obter séries e médias históricas dos parâmetros hidráulicos medidos como vazão, largura, profundidade, velocidade, área da seção. Há ainda a série de perfis transversais das seções de medição, o que fornece informação interessante sobre a forma da seção do curso d'água, possíveis extrapolações e simplificações aplicáveis. Tais dados foram organizados e analisados de forma a compor a base de informações necessárias para desenvolvimento das etapas descritas a seguir.

3.3 Validação dos dados de AS

3.3.1 Caracterização das missões altimétricas

Conforme mencionado anteriormente, a AS ainda nos dias atuais não tem foco na obtenção de níveis de cursos d'água continentais, assim um dos critérios foi selecionar missões com potencial de aplicação em rios de médio porte, consequentemente missões mais recentes. O objetivo também foi dispor de ao menos duas missões altimétricas para cada ano do período em análise e validar diferentes famílias de satélites e tecnologias num rio de médio porte de região tropical. Assim, foram selecionadas cinco missões, totalizando oito satélites: Envisat (original e na fase estendida, denominada Envisat-X), Saral, Cryosat, Sentinel-3A (S-3A), Sentinel-3B (S-3B), Jason-1 (J-1), Jason-2 (J-2) e Jason-3 (J-3).

A abordagem multimissão permitiu a criação de séries altimétricas de 2002 a 2020, porém o satélite Jason-1 não pôde ser usado porque seu *tracker* não lidou bem com as mudanças de elevação e, por esta razão, a maioria dos dados não é utilizável para estudos hidrologia (Silva

J. *et al.*, 2010). Considerando todas as missões altimétricas foram obtidas 554 EVs ao longo de todo o Rio São Francisco e mais da metade delas (350) se referem ao satélite Cryosat (Tabela 3.3). Para as missões selecionadas o tempo de revisita (ou frequência) varia de 10 a 35 dias para os satélites de órbita repetitiva e 369 dias para o Cryosat, que possui órbita dita “quase-repetitiva”, conforme detalhado a seguir. As características gerais das missões selecionadas e seu contexto histórico foram fornecidos na Tabela 2.1 e no item 2.2.2. A seguir cada satélite ou família é mais bem detalhado.

O satélite Envisat, da Agência Espacial Europeia (ESA) equipado do altímetro RA-2, foi lançado em março de 2002 provendo cerca de oito anos de dados altimétricos em sua órbita original, com 35 dias de tempo de revisita. Em outubro de 2010 o satélite foi movido para uma nova órbita mais baixa, com frequência de 30 dias, no intuito de estender a missão por alguns anos sendo essa fase chamada de Envisat-X. Em maio de 2012 a missão foi declarada encerrada devido à perda de comunicação com o satélite.

Tabela 3.3 –Dados das missões altimétricas utilizadas na pesquisa

Missão	EVs para todo RSF	Footprint (diâmetro em km)**	Frequência (dias)	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Envisat	63	8	35																				
Env.-X	50		30																				
Saral	57	4	35																				
Cryosat	350	15	369																				
S3-A	47	0,3x	27																				
S3-B	45	1,5	27																				
Jason-1*	14	10	10																				
Jason-2	14		10																				
Jason-3	14		10																				

*as EVs do Jason-1 não produziram dados úteis

**O footprint não é fixo (item 2.2.1) Valores mencionados em Maillard *et. al* (2015), Cipollini e Sanith (2013), Egido e Smith (2017), ESA (2021 a)

O foco da família Jason é o monitoramento dos níveis oceânicos com objetivo de melhorar as previsões e avaliar possíveis mudanças climáticas. O satélite Jason-1 foi lançado em dez/2001 e iniciou a aquisição de dados em 2002. Em jun/2008 foi lançado o Jason-2 e os dois satélites ocuparam a mesma órbita com defasagem de um minuto até fev/2009, quando o Jason-1 foi movido para outra órbita, chamada intervalada. Com o lançamento do Jason-3 em jan/2016, este e o Jason-2 ocuparam a mesma órbita até out/2016, quando o Jason-2 foi movido para a órbita intervalada. O Jason-1 deixou de enviar dados em jul/2013 e o Jason-2 em out/2019. O Jason-3 continua operando em sua órbita nominal. O período de revisita da família Jason é de

apenas 10 dias, o mais curto dentre as missões de AS, por outro lado a cobertura espacial fica reduzida. Apenas os dados da órbita nominal foram utilizados. Conforme mencionado anteriormente, os dados do satélite Jason-1 foram processados, mas não produziram informações válidas, o que foi relacionado a problemas com o *tracker* conforme Silva J. *et al.* (2010) e Frappart *et al.* (2006).

O satélite Cryosat foi lançado em 2010 e continua em operação, a órbita é dita “quase-repetitiva” possuindo um ciclo de 369 dias e subciclos de cerca de 30 dias, o que o difere notoriamente das demais missões altimétricas (Parrinello *et al.*, 2018). Apesar da baixa frequência de passagem num mesmo ponto, suas configurações de órbita propiciam elevada cobertura espacial do globo. A cada subciclo a órbita deriva 30 km para Oeste até ser reiniciado um novo ciclo de 369 dias, quando então os subciclos serão aproximadamente repetidos e, conseqüentemente os traços. O altímetro do Cryosat (Siral) foi o primeiro a utilizar o modo de operação SAR e o modo SARin (SAR interferométrico), que garantem resoluções mais elevadas para medição da espessura de gelo. Contudo, a operação nos modos SAR e SARin é restrita a algumas áreas de interesse periodicamente atualizadas e a região do Rio São Francisco sempre foi observada no modo de baixa resolução. Apesar do elevado tempo de revisita, as configurações de ciclo e subciclos do Cryosat propiciam uma densa cobertura espacial, gerando um volume significativo de dados de nível do curso d’água em diferentes pontos e datas. Apesar de os dados serem obtido em dias diferentes, a informação gerada tem grande valor, permitindo obtenção do perfil do curso d’água a partir dos dados médios de um período e/ou cálculo da declividade da linha d’água.

O satélite Saral resultou de uma iniciativa conjunta das agências espaciais francesa (CNES) e indiana (ISRO), equipado do altímetro AltiKa foi lançado em fevereiro de 2013 utilizando a mesma órbita do satélite Envisat e o mesmo tempo de revisita. Devido a problemas técnicos em suas engrenagens, a partir de julho de 2016, o Saral entrou numa fase de deriva, sem manutenção de sua órbita nominal repetitiva. No presente estudo, apenas a fase de órbita original foi utilizada.

Os satélites Sentinel-3A e Sentinel-3B fazem parte de uma família de satélites dedicados à observação e monitoramento de diferentes aspectos da Terra, resultado de uma iniciativa conjunta da ESA e da União Europeia. O Sentinel-3A foi lançado em fevereiro de 2016 e o Sentinel-3B em abril de 2018, ambos com 27 dias de tempo de revisita, percorrendo órbitas complementares e em operação até a data de consolidação desta pesquisa. No começo da operação da família Sentinel havia previsão do lançamento futuro de mais dois satélites, 3C e

3D nos próximos anos, contudo as informações a respeito estão escassas nas páginas das instituições responsáveis.

A Figura 3.5a apresenta os *tracks* dos satélites utilizados na região de interesse do RSF. Alguns satélites ocupam a mesma órbita (caso do Envisat/Saral e a família Jason) e o satélite Cryosat foi plotado a parte (Figura 3.5b) devido à sua cobertura espacial elevada.

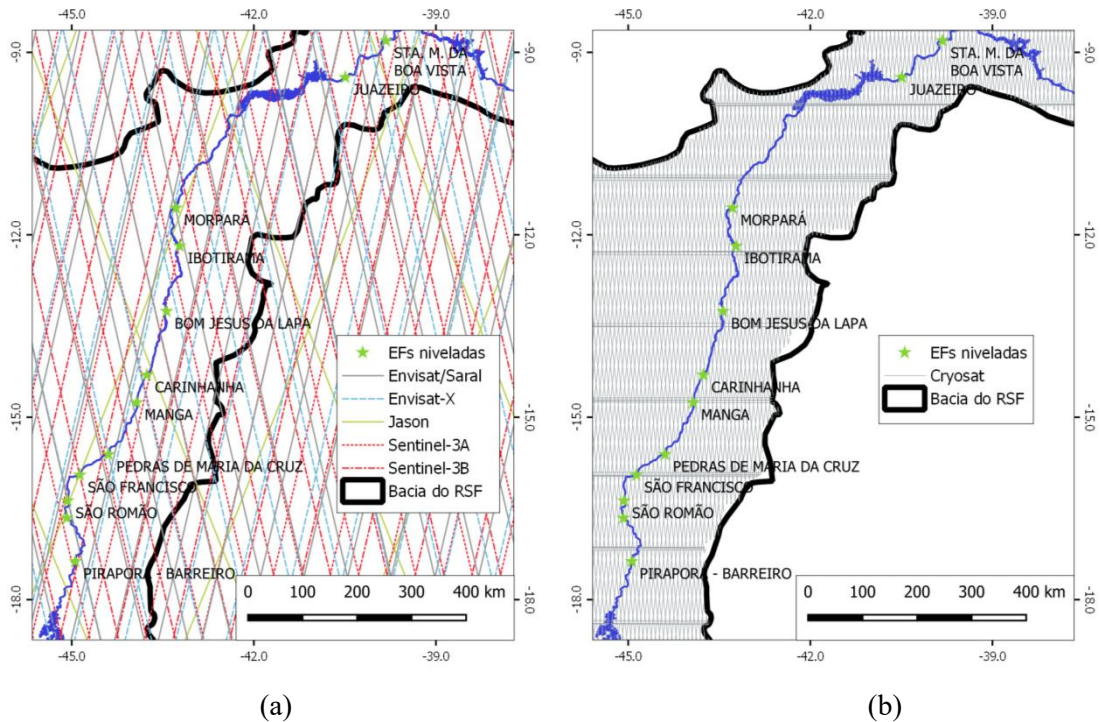


Figura 3.5 – *Tracks* dos satélites utilizados na área de interesse do RSF: (a) Satélites de órbita fixa (b) Cryosat

3.3.2 Obtenção e processamento dos dados no SWG

A atividade de processamento de dados foi uma fase extensa em decorrência de seu volume, da realização de pesquisa aprofundada da técnica de AS e seu impacto na qualidade dos dados, bem como aprimoramento do SWG e implantação do módulo de interpolação. Após a consolidação da base de dados de AS fez-se necessário consolidar rotinas automatizadas de geração de gráficos, estatísticas e remoção de outliers, sendo boa parte delas disponibilizadas no SWG. A seguir, apresenta-se uma descrição das atividades de processamento e metodologias adotadas.

Os dados foram baixados dos ftps da ESA (<ftp://science-pds.cryosat.esa.int/> - dados do Cryosat), da Aviso (<ftp://avisoftp.cnes.fr> - Jason), da plataforma SciHub da Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> - Sentinel-3) e da página do CTOH (<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/data> - dados das demais missões). Foram selecionados os dados com processamento nível 2, os chamados GDRs (*Geophysical Data Records*), que contém todas

a medidas capturadas pelo altímetro e as correções que devem ser aplicadas aos dados (vide Equação 2.1, item 2.2.3).

Para o processamento optou-se pela utilização do SWG por se tratar de uma ferramenta de código aberto, em python, com possibilidade de edição do código. Assim foi possível compreender todas as etapas de processamento, editar e revisar algumas ferramentas. Vários ajustes foram feitos para completo funcionamento da ferramenta e processamento de todas as missões utilizadas na pesquisa, além da implementação do módulo de interpolação dos dados *in situ*.

As funcionalidades da primeira versão do SWG foram descritas inicialmente por Maillard e Calmant (2013) quando ainda era chamado VHSTool, uma versão mais completa foi apresentada em Maillard *et al.* (2015) e atualizada em Maillard e Pereira (2017). A segunda versão do SWG foi iniciada em 2019 e consolidada em 2021 (versão 2.2), inclui as alterações realizadas no contexto desta pesquisa (incluindo o módulo de interpolação) e está disponibilizada na página do laboratório de Sensoriamento Remoto da UFMG (UFMG, 2021). A Figura 3.6 apresenta o fluxo esquemático e módulos principais da versão 2.2 do SWG. A metodologia completa por trás do módulo de interpolação está descrita no item 3.3.3 e em Martins *et al.* (submetido à publicação) (Apêndice 3).

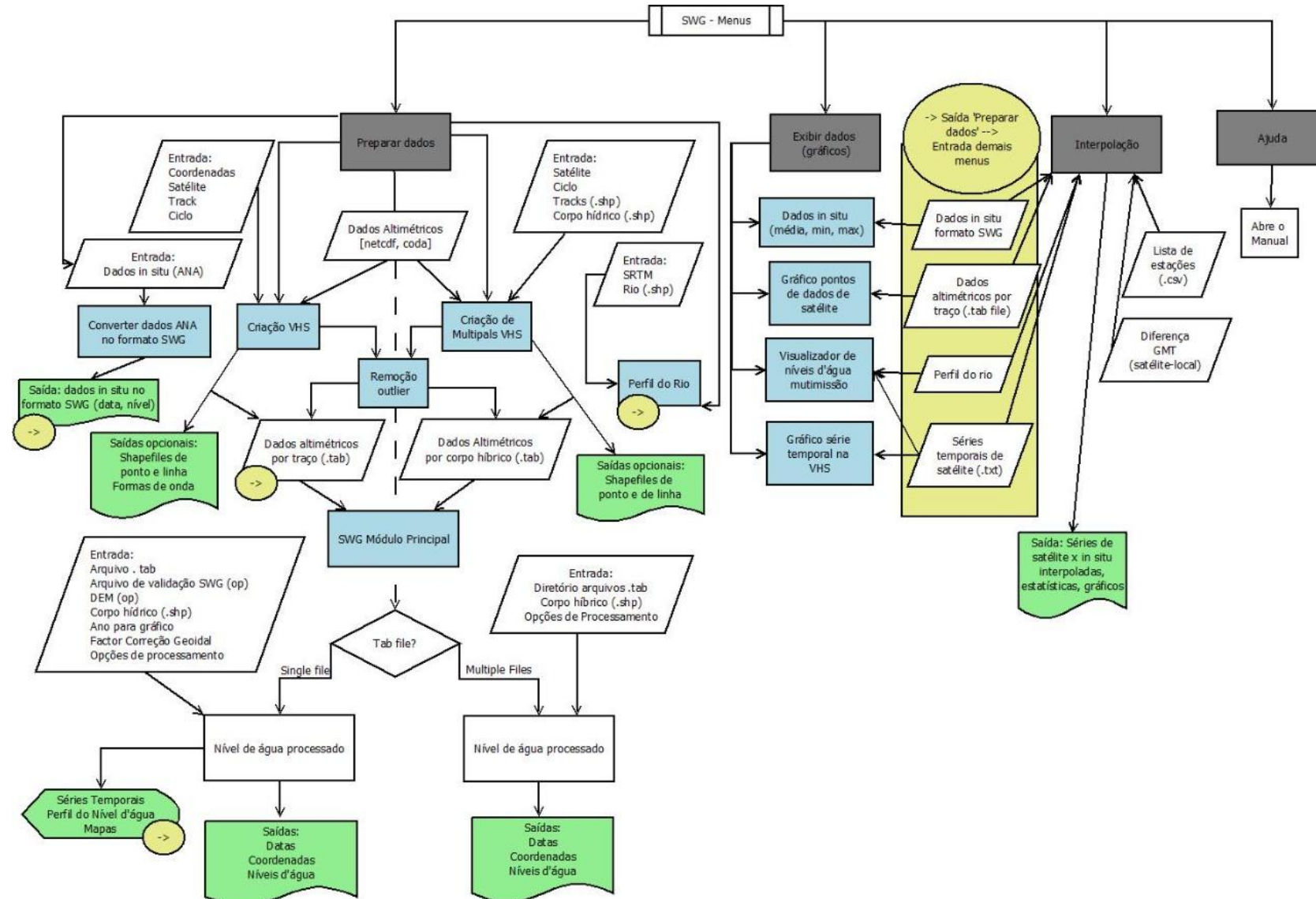


Figura 3.6 – Fluxo esquemático e módulos principais do SWG (versão 2021)

A linguagem utilizada no SWG é Python3. Há uma interface gráfica (Figura 3.7), que corresponde à tela de processamento final dos dados, e vários menus com etapas de preparação dos dados, visualização, interpolação e ajuda. Na etapa de preparação dos dados pode-se criar uma única EV (no SWG chamada de VHS - *virtual hydrological station*) ou múltiplas ao longo de um curso d'água. No SWG a criação de EVs é feita de forma automática, baseada nos traços dos satélites e polígonos de cursos d'água, ambos inseridos como *shapefiles* pelo usuário. Há opções para visualização de dados de satélite processados, dados de estações *in situ* e até mesmo do perfil do rio baseado nos dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). Para cálculo do nível d'água médio a partir dos pontos obtidos ao longo da seção da EV, há três opções de processamento baseadas no posicionamento do centro do rio e/ou a posição das margens. As três abordagens são descritas a seguir e podem ser encontradas com maior detalhamento em Maillard *et al.* (2015):

- *Simple river width* (SRW – largura do rio simples): é a abordagem mais simples, consiste em selecionar apenas os pontos contidos entre as margens do rio. A distância ao centro do rio é um parâmetro que deve ser fornecido pelo usuário na tela principal (Figura 3.7), caso opte por essa opção. O centro do rio é calculado a partir da *shapefile* de polígono fornecida pelo usuário. Este método é particularmente interessante quando é pertinente para o usuário limitar a seleção de pontos à largura do curso d'água, por exemplo, quando se trata de um vale encaixado e os dados das margens contêm valores de altitude muito distintos do nível d'água.
- *Hooking simulation* (HS – simulação de *hooking*): baseia-se no fato de que o fenômeno de *hooking* pode ser modelado conhecendo-se a superfície de água e o *footprint* do satélite. Assim, cria-se um modelo do *hooking* esperado para aquela EV, que então é ajustado à série de pontos de AS obtidos, considerando a minimização do RMSE.
- *Patter recognition weighted* (PRW – reconhecimento de padrões ponderado): espera-se que os pontos ao longo da seção transversal constituam um perfil da linha d'água plano, contudo é possível identificar alguns padrões característicos nos dados de AS. Neste contexto, o método PRW classifica a forma descrita pela sequência de pontos em cada lado do centro do rio separadamente, ajustando um polinômio de grau dois. As formas possíveis são: *flat* (plano), *bump* (os pontos vão para cima e para baixo), *hole* (pontos vão para baixo e para cima), *up* (pontos vão majoritariamente para cima) e *hooking* (perfil parabólico conforme descrito anteriormente). Para cada lado, obtém-se o nível d'água (\hat{H}) conforme a equação abaixo, considerando o inverso da distância

como peso ponderado e um expoente s conforme o tipo de forma: 1 para *flat*, 2 para *bump* e *hole*, 3 para *up* ou *hooking*. Por fim, o nível médio da seção é obtido pela média dos níveis de cada lado.

$$\hat{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i / d_i^s}{\sum_{i=1}^n (1/d_i)^s} \quad \text{Equação 3.1}$$

Na qual:

\hat{H} = nível d'água ajustado (m)

n = número total de pontos de AS

d_i = distância do ponto de medição i ao centro do rio (m)

s = expoente baseado na forma dos dados de cada lado do rio

Após o processamento final, obtém-se a série altimétrica num arquivo de texto que contém: a data de passagem do satélite, a altitude e coordenadas do ponto médio calculado. A partir deste arquivo de texto de saída e outros arquivos com dados do curso d'água e das estações *in situ* o usuário pode proceder à interpolação no submenu “*Interpolate*” (Figura 3.7).

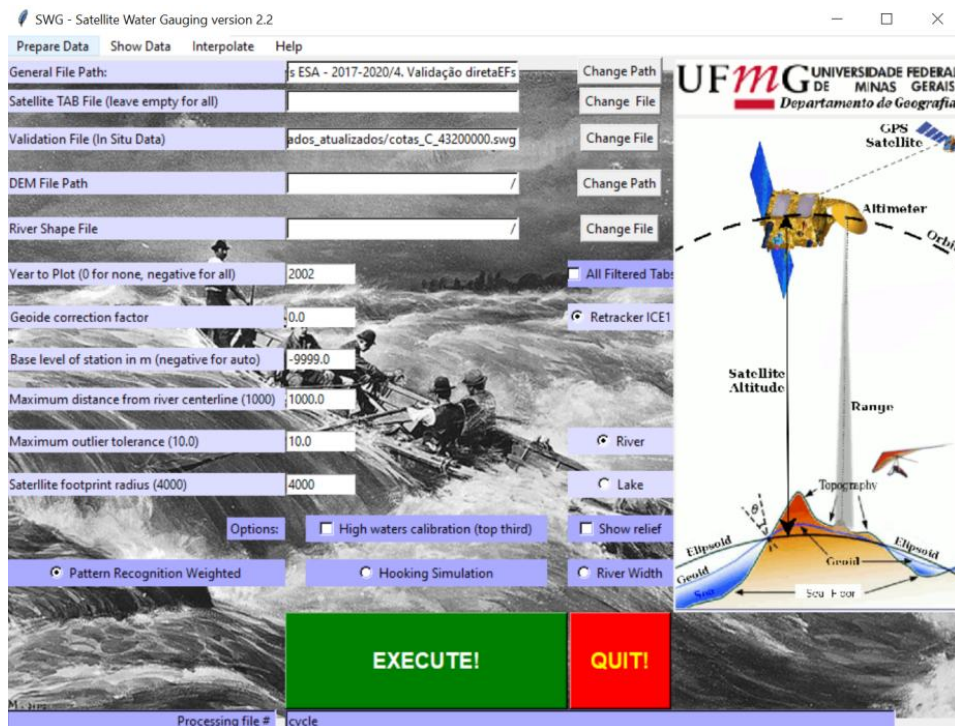


Figura 3.7 – Tela principal do SWG

A Figura 3.8 apresenta as etapas adotadas nesta pesquisa. O primeiro passo consistiu na criação das EVs. Devido a grande quantidade de dados a ser processada, optou-se pela criação de múltiplas estações virtuais a partir das *shapefiles* dos traços dos satélites e do Rio São Francisco (Figura 3.9 a). Os dados dos NetCDFs foram extraídos considerando as interseções entre os traços do satélite e *shapefile* do rio, limitando a seleção a uma distância de até 5 km para cada

lado do centro do rio (total de 10 km). Essa distância de 5 km foi estabelecida em razão das larguras médias do Rio São Francisco abaixo de 1 km (Tabela 3.2) e *footprints* das missões utilizadas (diâmetro entre 300 m a 15 km). Acredita-se que 10 km seja um valor razoável para aumentar a quantidade de pontos obtidos pelo satélite que incluam um retorno da superfície de água gravado na forma de onda.

Ainda na primeira etapa, de criação das EVs, após a seleção dos dados apenas da seção de interesse, foram aplicadas as correções geofísicas e de maré polar e terrestre (Equação 2.1). As correções estão disponibilizadas na forma de variáveis dentro do arquivo NetCDF, e elas são automaticamente lidas, processadas e aplicadas pelos códigos do SWG. Um dos ajustes realizados nesta pesquisa, foi a atualização das variáveis com correções a serem utilizadas neste processo no SWG, necessidade surgida em decorrência de alterações no padrão dos NetCDFs disponibilizados pelas agências e instituições provedoras de dados de AS. Atualmente, o *retracker* utilizado pelo SWG é o Ice-1, tendo sido selecionado por Maillard e Calmant (2013) em função dos melhores resultados obtidos com este *retracker* para águas continentais, conforme demonstrado em Silva *et al.* (2010).

Na segunda etapa, os outliers de cada EV foram removidos com base num limiar de $\pm 20,0$ m em relação a moda estatística da série de nível de AS (Figura 3.9 b). O valor foi definido considerando que as oscilações de cota no Rio São Francisco são inferiores a 10,0 m, assim valores que superam a moda estatística da série em 20 m são de fato outliers. Ressalta-se que estes dados removidos serão quantificados na análise de qualidade das séries de AS, sendo a remoção de outliers um procedimento comum nos estudos de altimetria, mas nem sempre explicitado ou detalhado.

Na sequência, na tela principal os pontos de nível d'água filtrados (*sem outliers*) para cada passagem do satélite, foram processados para obter o nível d'água médio. Dentre as opções de processamento disponíveis no SWG, optou-se pelo método PRW devido aos resultados mais consistentes obtidos para o Rio São Francisco (Maillard *et al.*, 2015; Martins *et al.*, submetido à publicação). Especialmente em casos de processamento de múltiplas EVs, os fenômenos que acometem cada uma podem oscilar, assim o método PRW se mostra mais robusto pela flexibilidade de ajuste a diferentes comportamentos nos dados de satélite.

Por fim, os dados das EVs foram validados no submenu "*Interpolate*", utilizando dados *in situ* interpolados gerados conforme metodologia descrita no próximo item (3.3.3 - Interpolação dos dados *in situ* (EFs)). Na tela de interpolação (Figura 3.9 c) também é possível fazer o

processamento da série de dados de uma única EV ou múltiplas, bastando indicar o caminho dos arquivos .txts das séries de nível d'água de AS. Também devem ser selecionados arquivos contendo os dados das estações *in situ* (informações de localização e séries de nível médio diário das EFs) e do rio (perfil produzido no próprio SWG, submenu “*Prepare data*”). Este conjunto de dados é utilizado pelo SWG na metodologia de interpolação de dados *in situ* (item 3.3.3 - Interpolação dos dados *in situ* (EFs)).

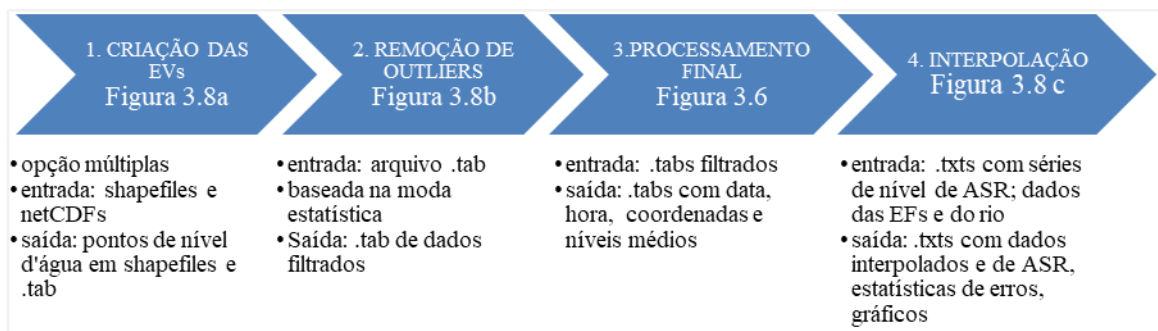


Figura 3.8 - Etapas adotadas para o processamento dos dados de AS no SWG

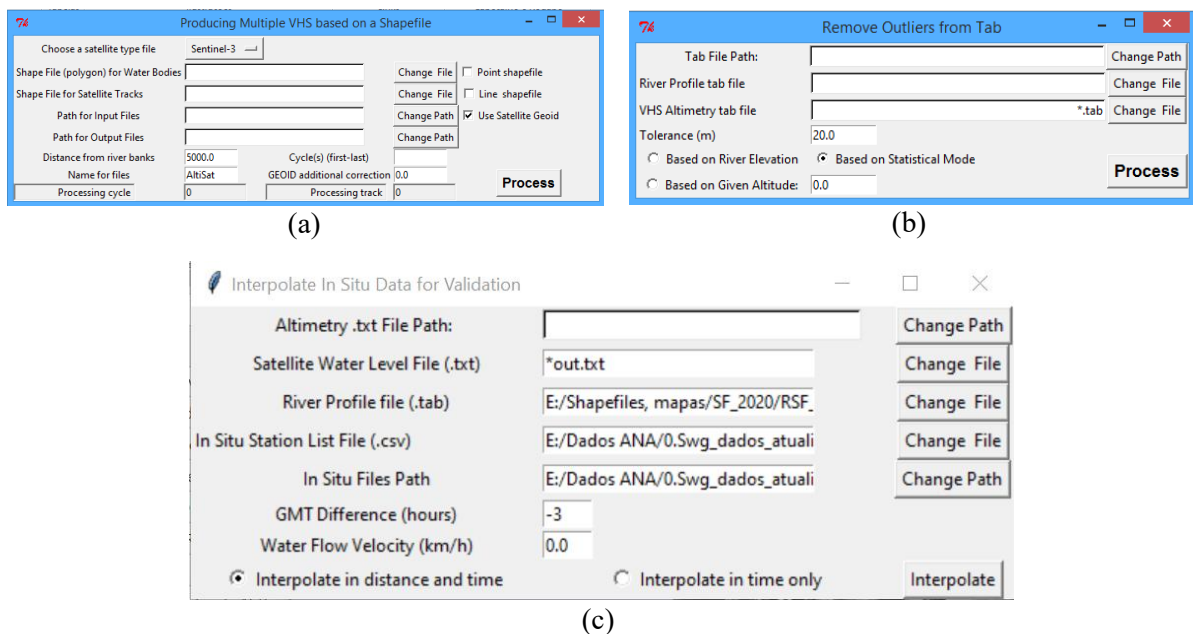


Figura 3.9 –Telas do SWG: (a) Produção de múltiplas EVs (b) Remoção de outliers (c) Interpolação

3.3.3 Interpolação dos dados *in situ* (EFs)

A interpolação dos dados *in situ* objetiva uma comparação mais adequada entre os dados *in situ* e de satélite, especialmente para EVs situadas distantes de EFs. O limiar do que seria uma EV distante de uma EF é variável na literatura (discussão no item 2.3.1). No presente trabalho, considerou-se que 15 km é um limite adequado para comparação direta entre os dados de EV e EF. Em função da pequena amplitude das oscilações de nível (Tabela 3.2) e o tempo de escoamento médio entre as EFs da ordem de dias (Tabela 3.4 e Tabela 4.3) supõe-se que poderiam ser adotadas distâncias maiores. Contudo, considerando que a maior parte das EFs de

interesse se situam num trecho de declividade média de 0,10 m/km (Tabela 3.1), utilizar distâncias superiores a 15 km pode produzir desníveis significativos no caso de comparações entre EF e EVs diretamente (sem interpolar).

Tabela 3.4 – Tempos de escoamento e velocidade média estimados para algumas estações no Rio São Francisco (baseado na série histórica de medições completa das estações)

Reservatórios <i>Estação</i>	<i>Código</i>	<i>Início do período de medições</i>	<i>Distância a a nascente (km)</i>	<i>Dist. estação montante (km)</i>	<i>Velocidade média medida (m/s)</i>	<i>Tempo de escoamento médio* (dias)</i>
Três Marias			537	-		
<i>Pirapora</i>	41135000	1968	666	129	0,59	2,5
<i>Cachoeira da Manteiga</i>	42210000	1976	780	114	0,77	1,7
<i>São Romão</i>	43200000	1952	821	41	0,65	0,7
<i>São Francisco</i>	44200000	1934	884	63	0,78	0,9
<i>Pedras M. Cruz</i>	44290002	1972	952	68	0,75	1,0
<i>Manga</i>	44500000	1934	1070	118	0,62	2,2
<i>Carinhanha</i>	45290008	1933	1124	54	0,78	0,8
<i>Bom Jesus da Lapa</i>	45480000	1978	1253	129	0,79	1,9
<i>Ibotirama</i>	46150000	1953	1393	140	0,75	2,2
<i>Morpará</i>	46360000	1954	1476	83	0,82	1,2
Sobradinho			1909	-		
<i>Juazeiro</i>	48020000	1928	1952	43	0,80	0,6
<i>Santa M. da Boa Vista</i>	48290000	1971	2079	127	0,52	2,8

*A partir da estação/reservatório a montante e baseado na velocidade média medida

A abordagem inicial foi a interpolação temporal (IT), que consistiu em interpolar a série da EF mais próxima da EV para produzir um valor sincronizado à medição do satélite. Na segunda fase, a interpolação no tempo e espaço (ITE) foi executada como meio de compensar a distância entre a EV até as EFs a montante e a jusante, considerando a diferença de horário das medições e a declividade da linha d'água. A ideia ao fazer as duas abordagens foi averiguar se para EVs próximas a EFs somente a sincronização temporal (IT) é suficiente para promover a redução dos desvios nos resultados da validação. Ressalta-se que para interpolação foram utilizados os dados in situ horários (leitura das 7 h e 17 h).

As etapas da interpolação são descritas a seguir e estão ilustradas na Figura 3.10. A partir da base de dados do curso d'água, das EFs e dos dados das EVs, foram extraídas as informações necessárias para a interpolação, compreendendo: 1) as distâncias entre a EV e as EFs a montante e a jusante, 2) a hora local do dado de satélite (LSAT) e 3) os dados de nível d'água antes e depois da passagem de satélite nas EFs a montante e a jusante. A interpolação no tempo (IT) utiliza os dados apenas da EF mais próxima e a interpolação no tempo e espaço (ITE) usa os dados das EFs a montante e a jusante mais próximas, conforme os seguintes passos:

1. Seleção da(s) estação(ções):
 - a. IT: seleciona a EF mais próxima da EV (independente se a jusante ou montante desta)
 - b. ITE: seleciona as EFs mais próximas da EV: uma a jusante e uma a montante
2. Para a(s) EF(s) escolhida(s) buscam-se as duas medições com o menor intervalo de tempo da medição do satélite, uma antes e outra depois, limitadas ao intervalo máximo de 24h;
3. Na(s) estação(s) selecionada(s) é feita a interpolação linear dos níveis d'água dos horários selecionados na etapa (2) para gerar um nível d'água sincronizado no tempo à medição do satélite (este é o passo final para a IT);
4. Para ITE: a partir dos níveis d'água interpolados no tempo em cada uma das EFs selecionadas (montante e jusante) é feita a interpolação linear conforme as distâncias das EFs a EV;
5. O dado *in situ* sincronizado (no tempo ou no tempo e espaço) é utilizado para validar a medição do satélite.

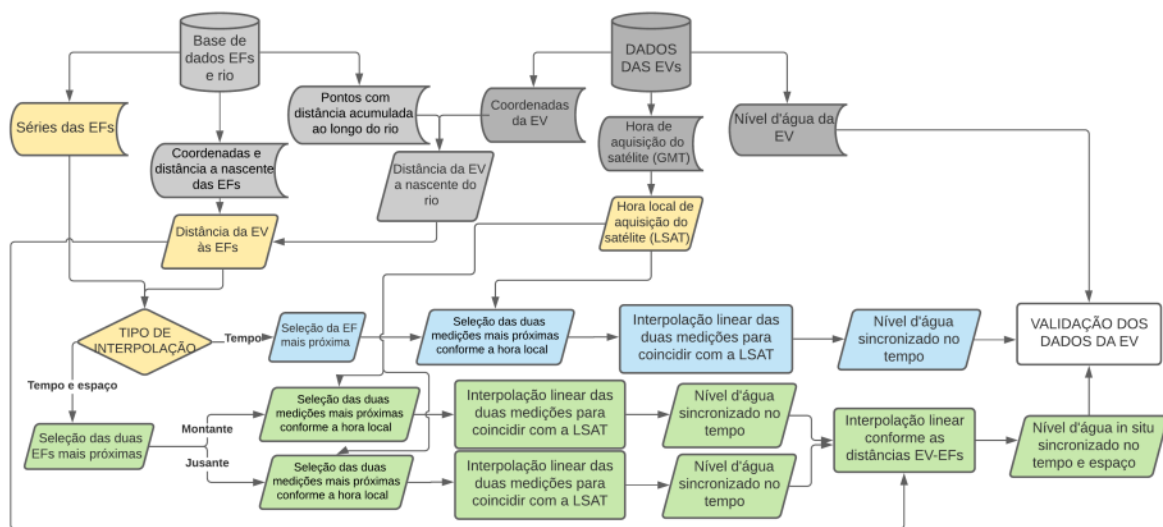


Figura 3.10 – Fluxograma das etapas executadas para interpolação dos dados *in situ*

Validação da metodologia ITE

No intuito de testar a metodologia proposta, para todas as EFs situadas entre outras duas EFs, foram geradas cotas interpoladas no tempo e espaço (ITE), como se fosse uma EV, para comparação com a série histórica *in situ*. Por exemplo, foram gerados dados para a localização da EF Cachoeira da Manteiga (como se ela fosse uma EV) a partir dos dados da EF Pirapora (a montante) e da EF São Romão (a jusante). Então a série interpolada foi comparada à série *in situ* monitorada na EF e obtidas as estatísticas de erros e coeficiente de correlação.

3.3.4 Análise de qualidade das séries das estações virtuais (EVs)

Visando a análise de qualidade das séries de AS e caracterização dos desvios de cada missão foram utilizadas as métricas abaixo descritas. Os dados *in situ* referidos são sempre as séries interpoladas. No caso do satélite Cryosat, foram utilizadas as mesmas métricas, contudo cada ponto de cruzamento do Cryosat com o rio foi considerado como uma EV de única passagem, já que em decorrência da órbita derivativa, este satélite não retorna ao mesmo ponto.

- ME – *mean error* (erro médio): cálculo da média de todos os desvios $S - F$ (S são os dados de satélite e F são os dados *in situ* interpolados) para cada data ‘t’ em que há dado do satélite disponível totalizando uma série de tamanho N . O ME é um indicativo da direção da discrepância entre as séries, informando se no geral os dados de satélite (S) tendem a superestimar (ME positivo) ou subestimar (ME negativo) os níveis d’água em relação aos dados *in situ* (F). Entretanto, é uma estatística limitada, pois desvios negativos anulam os positivos, mascarando seu valor final, sendo recomendado também o cálculo do erro médio absoluto.

$$ME = \frac{\sum_{t=1}^n (S_t - F_t)}{N} \quad \text{Equação 3.2}$$

Na qual:

t = dia em que há dado de satélite disponível

S_t = cota altimétrica obtida por satélite (m)

F_t = cota altimétrica *in situ* interpolada (m)

N = tamanho da série de dados

- AME - *absolute mean error* (erro médio absoluto): utiliza a mesma equação acima, porém com o valor absoluto dos desvios individuais solucionando assim a problemática do erro médio otimista, entretanto não indica a tendência geral dos desvios (positivos ou negativos).
- RMSE – *root mean square error* (raiz do erro quadrático médio): fornece uma magnitude média dos erros, sendo mais sensível aos grandes erros por elevar as diferenças individuais ao quadrado, sendo comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (S_t - F_t)^2}{N}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Na qual:

t = dia em que há dado de satélite disponível

S_t = cota altimétrica obtida por satélite (m)

F_t = cota *in situ* interpolada (m)

N = tamanho da série de dados

- RRMSE - *relative root mean square error* (raiz do erro quadrático médio relativo): obtido da mesma forma que o RMSE, mas as séries de satélite e das EFs são ajustadas pela subtração de suas médias, devido às referências altimétricas das séries serem diferentes. Assim, a comparação entre os dados é feita de forma relativa, observando apenas as oscilações (ou anomalias) das séries. A maioria dos estudos de validação de dados de AS utiliza esta métrica, assim é importante calculá-la para comparar os resultados a estas referências.

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n [(F_t - \bar{F}) - (S_t - \bar{S})]^2}{N}} \quad \text{Equação 3.4}$$

Na qual:

t = dia em que há dado de satélite disponível

F_t = cota *in situ* interpolada (m)

\bar{F} = média da série de cotas *in situ* interpoladas (m)

S_t = cota altimétrica obtida por satélite (m)

\bar{S} = média das cotas altimétricas obtidas por satélite (m)

N = tamanho da série de dados

- η_{eff} - Taxa de eficiência de amostragem da série de satélite, conforme proposto por Bercher (2008). Os outliers removidos da série das EVs durante o processamento dos dados no SWG impactam esta métrica.

$$\eta_{eff} = \left(\frac{N_{eff}}{N_{sat}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Equação 3.5}$$

Na qual:

N_{eff} = número de dados realmente obtidos

N_{sat} o número de dados esperados para um dado período

- Coeficiente de correlação

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (F_t - \bar{F})(S_t - \bar{S})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (F_t - \bar{F})^2][\sum_{i=1}^n (S_t - \bar{S})^2]}} \quad \text{Equação 3.6}$$

Na qual:

t = dia em que há dado de satélite disponível

F_t = cota *in situ* interpolada (m)

\bar{F} = média da série de cotas *in situ* interpoladas (m)

S_t = cota altimétrica obtida por satélite (m)

\bar{S} = média das cotas altimétricas obtidas por satélite (m)

3.4 **Vieses das missões altimétricas**

Calmant *et al.* (2013) foram os únicos a propor uma metodologia de estimativa de viés para uma missão altimétrica num sistema fluvial, no caso a Bacia Amazônica. Os autores escolheram um modelo que iguala o viés aos desvios (erros) médios entre as séries de satélite e *in situ* acrescidos de um termo para compensar a diferença de leituras das EVs e EFs no tempo e na distância. Este termo compensatório é baseado na equação de movimento harmônico para ajustar os dados de satélites à localidade de EFs niveladas com GPS geodésico (o nivelamento de EFs seguiu a mesma metodologia da presente pesquisa). Fez-se necessária a representação da oscilação de cotas no modelo, pois para rios amazônicos a variação diária de nível costuma atingir cerca de 30 cm entre as leituras *in situ* das 7h e das 17h (Calmant *et al.*, 2013; Silva A., 2010). No caso do Rio São Francisco, a média das oscilações diárias nas EFs é de 4 cm (mediana de 2cm) (Tabela 3.2).

Propõe-se nesta pesquisa uma estimativa de viés semelhante à realizada por Calmant *et al.* (2013) nos rios amazônicos, no sentido de utilizar os dados estações *in situ* niveladas para produzir um dado de nível d'água, de fonte alternativa, mais próximo possível do valor verdadeiro. Para compensar as distâncias entre EVs e EFs nos beneficiamos da proposta de interpolação dos dados *in situ* nivelados para estimar um nível d'água sincronizado à data e local de passagem do satélite. Como medida de precaução extra, a distância máxima entre as EVs e EFs foi limitada a 15 km, procurando-se assim minimizar erros decorrentes de uma interpolação linear simples. Foram utilizados dados das EVs e EFs referenciados no elipsoide, em consonância com a metodologia utilizada nos estudos realizados em Crétaux *et al.* (2009, 2011, 2013, 2018) no lago Issykul, considerado de pequeno porte. Em grandes superfícies de água (lagos grandes, rios amazônicos) é possível obter uma média representativa da altura geoidal ao longo do *track*, contudo em pequenos lagos esse tipo de cálculo pode agregar erros adicionais devido a falta de dados para obter adequadamente a declividade do geoide ao longo do *track* (Crétaux e Birkett, 2006). Ademais, os dados de satélite são gerados e fornecidos com referência no elipsoide e este modelo da superfície terrestre é mais adequado para realizar uma interpolação entre dados de EF e EV não coincidentes, devido às maiores oscilações do geoide, nem sempre bem representadas pelos modelos (Frappart *et al.*, 2006).

O viés médio (b_{sat}) foi então calculado para cada satélite conforme Equação abaixo, sendo composto por dois termos: o primeiro é obtido a partir da média dos erros médios das EVs selecionadas e o segundo se refere à incerteza, estimada a partir do desvio padrão dos dados utilizados. Lembrando que os erros médios utilizados já consideram a comparação dos dados

das EVs aos dados *in situ* sincronizados, dispensando a necessidade do termo de ajuste na equação de cálculo do viés.

$$b_{sat} = \frac{\sum_{i=1}^N ME_i}{N} \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (ME_i - \overline{ME})^2}{(N - 1)}}$$

Equação 3.7

Na qual:

b = viés médio

sat = cada satélite analisado: Envisat, Envisat-X, Saral, Jason-2 e 3, Cryosat, S-3A e B

i= índice referente a cada EV em análise

N= número total de estações virtuais utilizadas por satélite segundo os critérios de seleção das EVs (varia conforme o satélite)

ME = erro médio de cada EV

\overline{ME} = média dos MEs de todas as EVs utilizadas para um dado satélite

O cálculo do viés de satélite a partir da equação acima foi utilizado por Crétaux *et al.* (2018) no lago Issykul, com a ressalva de que no caso destes autores os erros médios resultaram dos desvios entre os dados de AS e medições diretas em campo em datas e horários sincronizados, com equipamentos e metodologias apropriadas, conforme mencionado no item 2.3.2 (Estimativa de viés dos dados de AS). Idealmente, os valores verdadeiros deveriam sempre obtidos em campo. Infelizmente, no âmbito da presente pesquisa foi inviável realizar campanhas de campo para medição direta dos dados nível d'água em datas comuns à passagem do satélite em decorrência dos custos envolvidos e da pandemia de COVID-19.

3.5 Declividade da linha d'água

A declividade é a variável hidráulica que pode ser derivada diretamente dos dados de nível de AS, considerando as distâncias entre as EVs. Deve ser observado um agrupamento adequado da série de dados disponíveis, de maneira tal que representem uma visão do estado do rio idealmente num mesmo dia, ou pelo menos num mesmo mês ou agrupados por período seco/chuvoso, a depender do comportamento do cotograma do rio ao longo do ano hidrológico.

Para traçar a declividade da linha d'água os valores de altitude devem estar referenciados no geóide, visando seu significado físico. Assim, as séries de nível das EFs (já livres de vieses) foram ajustadas utilizando diferentes modelos de ondulação geoidal, compreendendo o EGM96 e EGM08, Mapgeo2015, EIGEN-6C4 e XGM19. Estes modelos foram selecionados por serem

os mais largamente utilizados no contexto brasileiro e mundial. O intuito é averiguar se há diferenças significativas entre os modelos e qual representa melhor as declividades esperadas para o RSF, considerando as características físicas e hidráulicas dos seus trechos: remansos, presença de quedas, corredeiras, etc...

Propõe-se a construção de perfis de linha d'água para os dados de EFs e EVs, separadamente e em conjunto. Primeiramente, assume-se que a linha d'água entre as estações pode ser representada por uma reta, o que é uma simplificação do escoamento em canais fluviais, especialmente nas situações de dados espaçados por dezenas de quilômetros. Apesar de não se tratar de uma representação totalmente fidedigna, esta estimativa propicia uma informação usualmente indisponível. Raramente se dispõe de séries de declividade de linha d'água, por ser uma atividade de campo dispendiosa. Ademais, o perfil da linha d'água retrata a realidade daquele(s) dia(s) de levantamento, para aquelas condições de escoamento, extravasamento da calha, etc... Uma caracterização completa da declividade demandaria levantamentos por longos períodos de tempo e em diferentes condições, visando caracterizar o fluxo em diferentes níveis/condições e refletir, inclusive, os diferentes coeficientes de rugosidade médios de cada configuração.

O RSF trata-se de um curso d'água com cotograma bem definido ao longo do ano hidrológico (Figura 4.1), com período chuvoso iniciando em outubro e recessão tipicamente começando em abril. Neste contexto, faz sentido testar a obtenção de perfis de linha d'água e de declividade mensais para o período em análise, bem como um perfil para o período chuvoso e outro para o período seco.

A área de estudo para cálculo da declividade da linha d'água se restringiu ao trecho entre as EFs Pirapora e Carinhanha (Figura 3.2) em função da maior disponibilidade de dados das EFs (menos falhas), compreendendo: séries de nível, séries de parâmetros hidráulicos medidos disponíveis, bem como levantamentos recentes de seção transversal.

Os dados de perfil foram comparados aos dados do SRTM e aos valores encontrados na publicação da ANA (2003) da Bacia do Rio São Francisco, que foi a única referência com valores de declividade encontrada. Nos relatórios do MMA (2006) e CBHSF (2004, 2016) as declividades mencionadas foram retiradas de ANA (2003). No caso dos perfis das EVs a comparação aos perfis das EFs também foi feito.

Os dados do SRTM utilizados para comparação foram processados a partir de uma das ferramentas disponíveis no SWG (Figura 3.6), que faz um refinamento dos dados do SRTM

visando manter a coerência ao longo do curso d'água. Os detalhes do processamento estão descritos em Maillard e Pereira (2017). Os níveis do SRTM foram ajustados para o modelo geoidal Mapgeo2015.

Considerando a disponibilidade de dados das EFs, com grande resolução temporal, e dados das EVs com significativa cobertura espacial, a proposta foi exaurir as possibilidades de obtenção de perfis longitudinais e de declividades, em diferentes escalas temporais e diferentes fontes de dados. A etapa final consistiu em propor um modelo de declividades mensais e por período do ano hidrológico mesclando dados de EF e EVs e aplicando um filtro espacial aliado a regressão linear. As etapas executadas para obtenção dos perfis (longitudinais e de declividade) são apresentadas em forma esquemática na Figura 3.11 e descritas em detalhe nos itens a seguir. Os perfis da linha d'água e de declividade média foram comparados aos dados das referências disponíveis: ANA (2003) e o SRTM.

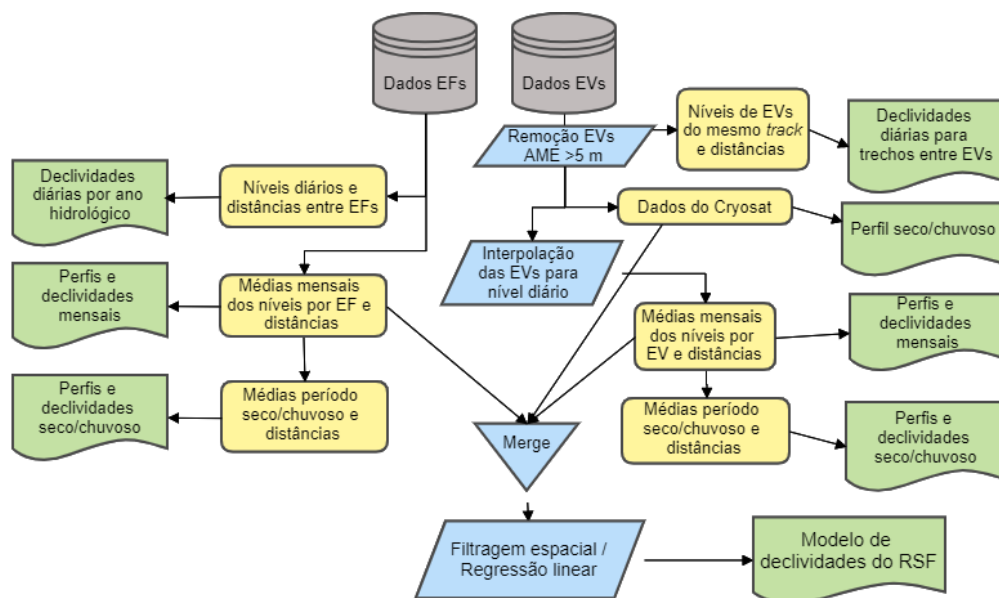


Figura 3.11 – Fluxograma das etapas realizadas para obtenção dos perfis longitudinais e de declividades com dados de EFs e EVs em separado e em conjunto.

3.5.1 Construção de perfis a partir das séries de EFs

Inicialmente foi feita uma análise das declividades diárias por ano hidrológico. Para cada dia de um ano hidrológico, as declividades por trecho são calculadas a partir dos níveis diários nas EFs a montante e jusante e a respectiva distância entre estas. Na sequência, as declividades de um mesmo dia são conectadas ao longo do rio, permitindo caracterizar trechos de maior/menor declividade e como se dá a variação num mesmo ano hidrológico e de um ano para outro.

Ademais, essa análise possibilita identificação de comportamentos anômalos, de falhas e erros nas séries das EFs.

Na sequência, para cada EF, os dados diários de cotas altimétricas das EFs foram separados por mês do ano e calculou-se a média de cota característica do mês. Então as cotas médias mensais das EFs são conectadas, obtendo-se o perfil longitudinal do trecho em análise por mês. Da mesma forma são obtidos perfis de linha d'água médios para os meses de período seco e para os meses de período chuvoso. Para as declividades mensais as etapas são as mesmas. Esses diferentes agrupamentos dos dados possibilitam identificar a existência de padrões e/ou anomalias no comportamento do rio, constituindo informações de grande aplicabilidade em estudos de hidrodinâmica fluvial, modelagem hidrológica e hidráulica, previsão de vazões e projetos de estruturas hidráulicas.

A elevada resolução temporal dos dados *in situ* propicia uma densidade de dados que garante a representatividade de oscilação de cotas no período, por outro lado a resolução espacial fica aquém dos dados de satélite. Para as sete EFs do trecho em estudo, a distância média é de 76 km, variando 41 km a 118 km.

3.5.2 Construção de perfis a partir das séries de EVs

Primeiramente foram eliminadas as EVs que apresentassem AME superior a 5,0 m na comparação com os dados *in situ* interpolados, visando diminuir a contaminação do perfil com dados espúrios.

No caso das declividades diárias, a frequência de passagem dos satélites é um fator limitante. A abordagem inicial aplicada foi obter a declividade naqueles dias em que o satélite cruza o rio em mais de um ponto, ou seja, para uma mesma data calcula-se a diferença de nível entre duas EVs consecutivas do mesmo satélite e divide-se pela distância entre as duas. Na Figura 3.5 visualiza-se que todos os satélites utilizados apresentam esse potencial, já que possuem ao menos um *track* que intercepta o rio em diferentes pontos do RSF.

Numa segunda etapa, para os satélites de órbita fixa, as séries de cada EV foram interpoladas para o nível diário e na sequência, visando diminuição dos desvios gerados, foram calculadas as médias mensais. Para tanto foram testados dois métodos: linear e spline Akima. A spline proposta por Akima (1970) consiste em uma função por partes composta de um conjunto de polinômios cúbicos aplicados a intervalos sucessivos de pontos. O ajuste é feito localmente objetivando a obtenção de uma curva final mais suave e natural possível, obrigatoriamente

passando pelos pontos iniciais disponíveis. Apesar da necessidade de interpolação nos vários dias em que não há passagem do satélite, a ideia é que a média mensal seja mais representativa da situação do curso d'água do que um (ou alguns) dado(s) único(s) num dado mês. A Figura 3.12 traz um exemplo dos benefícios da interpolação: o único dado obtido pelo S-3B no mês de outubro de 2019 provavelmente se refere a um dos níveis mais baixos averiguados neste mês, e utilizá-lo de maneira isolada, desconsiderando as estimativas da interpolação (anteriores e posteriores) acarretaria uma subestimativa da média mensal. Após a obtenção das médias mensais a partir das séries interpoladas para as EVs, foram calculados os perfis mensais e para o período seco/chuvoso.

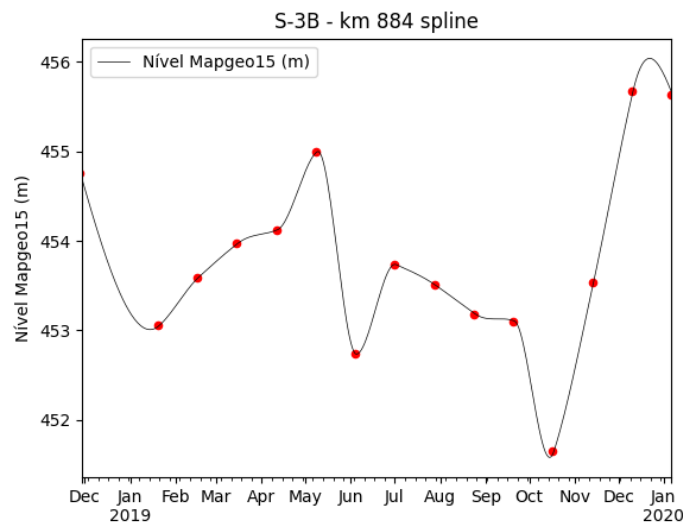


Figura 3.12 – Série de nível do S-3B no km 884 do RSF interpolada pelo método spline

No caso do Cryosat, como não há séries de nível numa mesma EV não é viável a interpolação para o nível diário. Por outro lado, a elevada resolução espacial deste satélite viabilizou a obtenção direta do perfil longitudinal para os períodos chuvoso e seco.

3.5.3 Modelo de declividades a partir de dados de EVs e EFs

Por fim, propõe-se a construção de um modelo de declividades utilizando todos os dados disponíveis, aliando a elevada resolução temporal e acurácia dos dados das EFs à resolução espacial das dezenas de EVs obtidas. Apesar da menor acurácia e possíveis valores espúrios dos dados de AS é interessante avaliar se o uso dos dados de EVs permite refinar melhor as alterações da linha d'água nos trechos entre estações fluviométricas.

O modelo proposto foi inspirado na metodologia de Moreira (2016) para filtragem de dados de perfil longitudinal de rios amazônicos obtidos com GPS geodésico acoplado a um barco. O autor dispunha de uma significativa quantidade de dados ao longo dos cursos d'água de

interesse (resolução média de 100 a 200 m), mas com a presença de alguns dados espúrios, inerentes ao processo de levantamento executado. Os dados foram obtidos ao longo de alguns dias consecutivos de realização do levantamento a partir da navegação dos cursos d'água. Por se tratar de dados de nível obtidos de uma mesma fonte (GPS geodésico), em dias consecutivos, a filtragem realizada por Moreira (2016) pôde ser mais direta, consistindo na seleção espacial dos dados, remoção dos outliers (observando o desvio padrão) e regressão linear. Em função da variedade de fonte de dados em diferentes datas, fez-se necessário propor um esquema mais complexo para análise dos dados de EFs e EVs.

No contexto desta pesquisa, os dados de nível das EVs de todos os satélites conjuntamente tem potencial de propiciar uma resolução espacial média de 11 km no trecho entre a EF Pirapora e Carinhanha, desconsiderando EVs coincidentes. Contudo, espera-se a existência de valores espúrios devido aos erros inerentes aos dados de altimetria. Visando minimizar o impacto destes valores de nível incoerentes e representar a declividade numa escala temporal adequada foram utilizados os dados de nível médios mensais das EFs, bem como das EVs. Para os satélites de órbita fixa foram utilizados os dados após a interpolação e no caso do Cryosat os níveis obtidos foram utilizados diretamente, já que não foi viável interpolar. Assim, a ideia foi testar diferentes valores de filtragem espacial até encontrar uma resolução espacial ótima para o conjunto de dados médios mensais de EVs e EFs, em que as declividades sejam representativas da realidade do curso d'água. As etapas consistiram em:

- Plotar mês a mês ou agrupadas por período seco/chuvoso, as médias mensais de nível das EVs (interpoladas e do Cryosat) e EFs;
- Seleção dos dados de nível de um trecho do rio num dado intervalo (janela) espacial de ' d ' km;
- Ajuste de regressão (linear e ponderada) nos dados iniciais;
- Remoção dos outliers segundo critério de faixa interquartil (FIQ) (*outliers* inferiores são valores abaixo de $Q_1 - 1,5FIQ$ e superiores valores acima de $Q_3 + 1,5FIQ$);
- Ajuste de regressão final (linear e ponderada) nos dados sem outliers;
- Cálculo da declividade média para a janela em análise a partir da reta de regressão;
- Deslocamento da janela em $(1-i)*d$ km para análise do próximo trecho, onde ' i ' é um percentual de sobreposição de janelas a ser testado com os valores 0, 25 e 50%, ou seja, metade da janela é a sobreposição máxima e nenhuma sobreposição é o mínimo.

As opções de janela espacial foram definidas em 10, 25, 50 e 100 km, no intuito de avaliar o impacto de diferentes resoluções espaciais na acurácia das declividades obtidas. Observou-se também a distância média de 76 km entre as EFs, de 1 a 51 km para as EVs de satélites de órbita fixa e 0.8 a 28 km para EVs do Cryosat no trecho.

Além da regressão linear (RL), foram utilizadas duas opções de regressão ponderada (RP1 e RP2). Considerando a maior acurácia dos dados de EFs, o uso da regressão ponderada RP1 objetivou testar se atribuir um peso mais significativo a estes pontos na regressão resultaria numa melhora do modelo de declividades. Também foi averiguado se atribuir um peso menor ao Cryosat impacta nos resultados, haja vista que este satélite não teve seus dados interpolados (RP2). A Tabela 3.5 apresenta os pesos adotados para cada fonte de dados nos diferentes tipos de regressão testados.

Tabela 3.5 – Pesos adotados por tipos de regressão testados

<i>Fonte de dados</i>	<i>Tipos de regressão testados</i>		
	Regressão linear (RL)	Regressão ponderada 1 (RP1)	Regressão ponderada 2 (RP2)
EFs	1,0	2,0	2,0
EVs – satélite de órbita fixa	1,0	1,0	1,0
Cryosat	1,0	1,0	0,5

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das séries de dados *in situ*

Para obtenção dos dados *in situ* foram consideradas 12 dentre as 28 EFs da calha do São Francisco, por possuírem nivelamento altimétrico. A série histórica da maior parte das estações teve início na década de 50 e 60, sendo a mais antiga a estação Juazeiro, que possui registros de cota desde 1914. As cotas altimétricas do zero da régua obtidos a partir do nivelamento altimétrico das estações são apresentadas na Tabela 4.1. As séries históricas das EFs foram obtidas do site Hidroweb (ANA, 2021) e ajustadas com o respectivo valor de nivelamento do zero da régua informado na Tabela 4.1. Ademais foi feito um trabalho de consistência visando remoção de erros grosseiros e ajustes em função da atividade de rebaixamento de algumas régua.

Tabela 4.1 – Estações com nivelamento altimétrico no Rio São Francisco (WGS84)

Código	Nome	Latitude	Longitude	Altitude do zero da régua(m)	
				Elipsoide	Mapgeo2015
41135000	Pirapora Barreiro	-17,3693	-44,9431	469,38	481,58
42210000	Cachoeira da Manteiga	-16,6575	-45,0811	447,49	461,00
43200000	São Romão	-16,3718	-45,0664	443,85	457,30
44200000	São Francisco	-15,9498	-44,8682	437,90	450,95
44290002	Pedras de Maria da Cruz	-15,6004	-44,3954	432,06	444,47
44500000	Manga	-14,7593	-43,9330	420,70	433,97
45298000	Carinhanha	-14,3059	-43,7654	416,91	430,21
45480000	Bom Jesus da Lapa	-43,4362	-13,2566	403,30	417,89
46150000	Ibotirama	-43,2230	-12,1840	392,19	408,31
46360000	Morpará	-43,2840	-11,5533	384,19	400,57
48020000	Juazeiro	-9,4062	-40,5042	344,81	357,83
48290000	Santa Maria da Boa Vista	-8,8098	-39,8240	332,15	343,81

A Figura 4.1 apresenta as séries de nível d'água das estações fluviométricas niveladas, após consistência, entre 2002 e 2020 e a Tabela 4.2 traz as estatísticas básicas de cada EF. Até a última atualização realizada neste estudo para estes dados (jan/2021), as séries das EFs de interesse estavam disponibilizadas até junho/2020 nos melhores casos, mas algumas terminavam em dezembro/2019. Com o início da pandemia de Covid-19 ficaram comprometidas as atividades de coleta e envio dos dados pelos observadores, bem como digitação e subsequente disponibilização pela ANA.

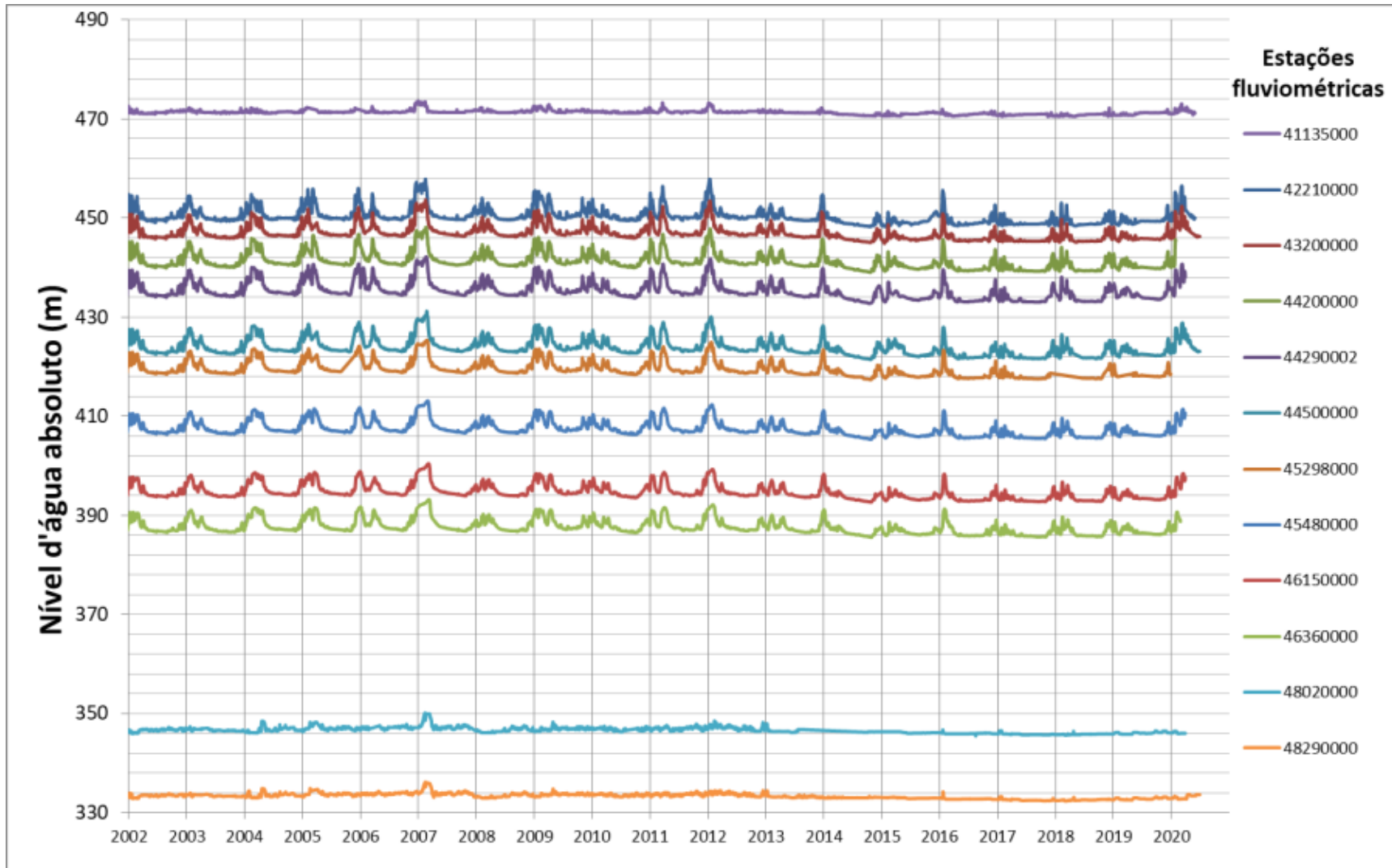


Figura 4.1 – Séries temporais de nível d'água médio diário das estações fluviométricas niveladas nos trechos: Três Marias a Sobradinho e Sobradinho a Santa Maria a Boa Vista

Tabela 4.2 – Estatísticas das séries de nível d'água das EFs de interesse no RSF de 2000 a 2020 em metros

Nome	N dados	Média	Mediana	Moda	Desvio				Mínimo	Máximo	Intervalo max-min	Amplitude média anual
					padrão	Variância	Curtose	Assimetria				
Pirapora Barreiro	7332	471,32	471,32	471,28	0,40	0,16	5,26	1,38	470,50	473,62	3,12	1,50
Cachoeira da Manteiga	7340	450,37	450,01	449,89	1,53	2,34	3,69	1,76	448,29	457,89	9,60	5,68
São Romão	7323	446,95	446,61	445,45	1,41	1,99	3,24	1,66	444,89	453,68	8,80	5,18
São Francisco	7214	441,23	440,84	440,84	1,56	2,45	2,53	1,53	439,04	448,15	9,11	5,55
Pedras M. da Cruz	7255	434,64	434,06	433,18	1,59	2,51	2,08	1,54	432,56	441,17	8,61	5,71
Manga	7276	423,16	422,60	421,72	1,53	2,36	2,14	1,52	421,04	430,19	9,15	5,52
Carinhanha	6792	419,49	419,12	418,82	1,47	2,16	1,85	1,37	417,39	425,35	7,96	4,63
Bom Jesus da Lapa	7276	407,48	407,10	406,32	1,46	2,13	1,24	1,23	405,33	413,10	7,77	4,57
Ibotirama	7223	394,72	394,34	392,85	1,47	2,17	1,04	1,18	392,66	400,43	7,77	4,42
Morpará	7268	387,66	387,26	387,19	1,46	2,14	0,98	1,17	385,57	393,19	7,62	4,36
Juazeiro	6575	346,60	346,60	345,91	0,60	0,37	3,80	1,08	345,45	350,08	4,63	1,35
Santa Maria da Boa Vista	7426	333,33	333,34	332,97	0,51	0,26	2,23	0,67	332,33	336,15	3,82	1,20

Nome	Quartis para cálculo outliers					Total de Outliers		
	1°Q	3°Q	AIQ	Lim inf.*	Lim sup.**	Inf.	Superiores	%Sup.
Pirapora Barreiro	471,09	471,49	0,40	470,49	472,09	0	263	4%
Cachoeira da Manteiga	449,47	450,80	1,33	447,48	452,79	0	598	8%
São Romão	446,06	447,40	1,34	444,05	449,41	0	514	7%
São Francisco	440,26	441,76	1,50	438,01	444,01	0	520	7%
Pedras M. da Cruz	433,58	435,27	1,69	431,05	437,81	0	467	6%
Manga	422,14	423,79	1,65	419,66	426,27	0	439	6%
Carinhanha	418,62	420,01	1,38	416,54	422,08	0	519	8%
Bom Jesus da Lapa	406,56	408,09	1,53	404,27	410,39	0	473	7%
Ibotirama	393,78	395,38	1,60	391,39	397,78	0	407	6%
Morpará	386,74	388,28	1,53	384,44	390,58	0	487	7%
Juazeiro	346,11	347,00	0,89	344,78	348,34	0	65	1%
Santa Maria da Boa Vista	332,95	333,69	0,74	331,84	334,80	0	59	1%

*Lim. Inf = Mínimo - 1,5 * AIQ ** Lim. sup = Máximo + 1,5 * AIQ

Na Figura 4.1 nota-se a similaridade dos cotogramas para o trecho entre Três Marias e Sobradinho, enquanto as estações Juazeiro (48020000) e Santa Maria da Boa Vista (48290000) apresentam uma oscilação de níveis bem menor em função do controle de vazão exercido por Sobradinho, especialmente a partir de 2013 com início do período de estiagem severa ocorrido na bacia do RSF. A amplitude e desvio padrão das cotas (Tabela 4.2) das estações a jusante de reservatórios é bem menor que as demais. Todos os dados apresentam assimetria positiva e ausência de outliers inferiores. A maior quantidade de outliers superiores foi encontrada nas EFs CManteiga e Carinhanha (8% dos dados), possivelmente em decorrência da chegada de afluentes significativos a montante destas EF, sendo o Rio das Velhas e Rio Carinhanha, respectivamente.

Visando identificar um padrão (ou sua inexistência) no comportamento das oscilações das cotas ao longo do RSF foram obtidas as Funções Acumuladas de Probabilidades (FAPs) das EFs de interesse (Figura 4.2). Para tanto são utilizadas as oscilações de nível d'água em torno da média, também chamadas de anomalias. É notório que as EFs Pirapora (41135000), Juazeiro (48020000) e SMBVista (48290000) possuem comportamento diferente das demais, sofrendo intensamente da regulação proporcionada pelo reservatório de Sobradinho no caso das duas últimas EFs e de Três Marias no caso de Pirapora. São FAPs significativamente mais inclinadas que as demais, refletindo a pequena oscilação de nível em torno da média. A jusante da EF Pirapora desagua o Rio das Velhas, que corresponde com cerca de 13% da vazão média total do RSF (Pereira *et al.*, 2007), conseqüentemente esse comportamento já se mostra distinto na EF seguinte, de Cachoeira da Manteiga (42210000). Esta última EF e as demais possuem comportamento bastante semelhante, com cerca de 65% das cotas abaixo da média, reforçando a assimetria positiva dos dados. Nas EFs PMCruz e Manga (curvas rosa e vermelha) nota-se uma leve distinção de comportamento até a probabilidade de 20%, indicando que essas duas EFs apresentam oscilações mas significativas nos períodos de menor cota.

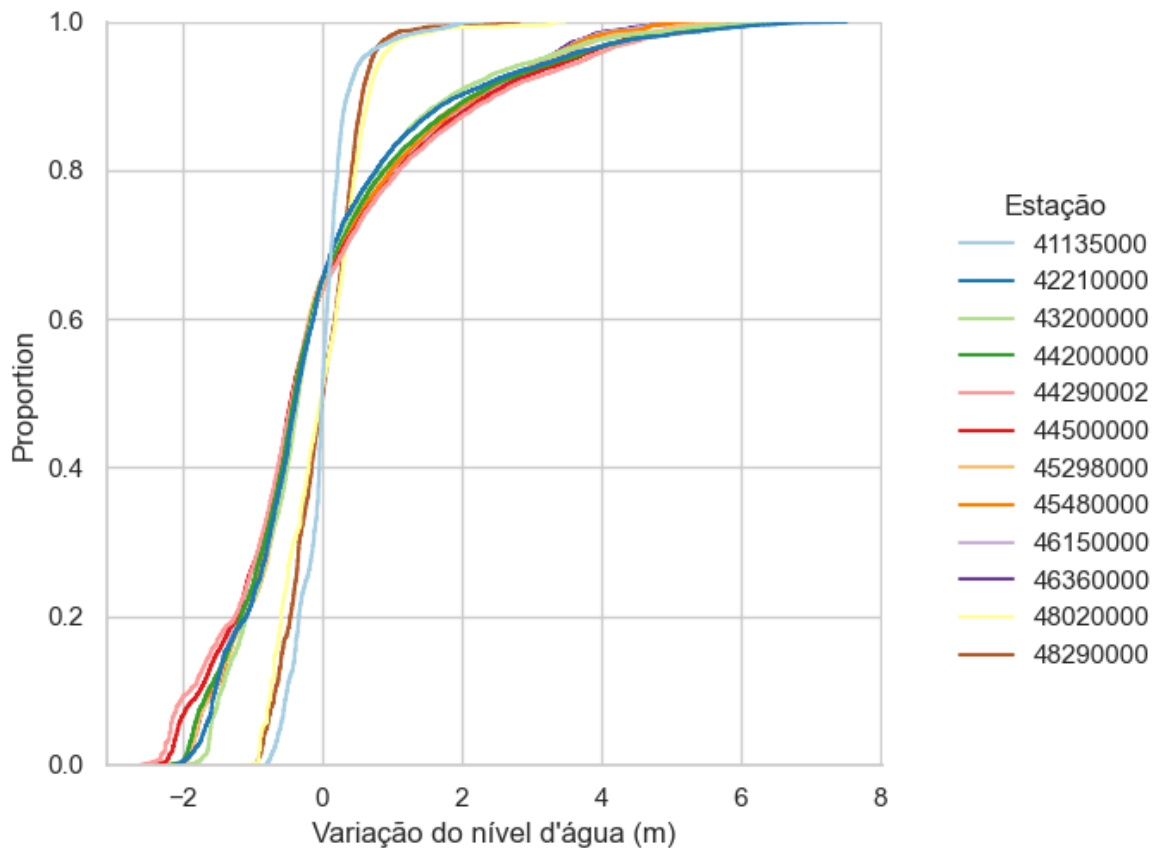


Figura 4.2 Função Acumulada de Probabilidades da oscilação de níveis das EFs de interesse no RSF

As séries de parâmetros hidráulicos medidos *in situ* foram analisadas para o trecho de interesse do cálculo de declividades, que por limitações práticas se restringiu entre as EFs de Pirapora a Carinhanha. A Tabela 4.3 apresenta as estatísticas dos parâmetros medidos nas EFs deste trecho para toda a série histórica, visando considerar o maior número possível de dados, já que as medições acontecem apenas algumas vezes no ano. Nas EFs Manga e Pedras de Maria da Cruz as vazões médias são inferiores as da EF a montante (São Francisco). Uma justificativa seria o fato de se tratarem de vazões medidas em datas diferentes, não a média de longo termo. Contudo, esta queda na vazão é uma característica deste trecho do RSF, em decorrência do carste e de retiradas significativas de vazão (CBHSF, 2016). As velocidades médias medidas estiveram entre 0,59 a 0,78 m/s, não diferindo significativamente de uma estação para outra. A Figura 4.3 apresenta os perfis transversais mais recentes, em escalas diferentes para cada eixo, de modo a facilitar a visualização. Observando a amplitude das cotas, as profundidades e a extensão transversal do canal, é razoável considerar seções aproximadamente retangulares e o funcionamento do rio como um grande canal para este trecho, com largura significativamente superior a profundidade do escoamento.

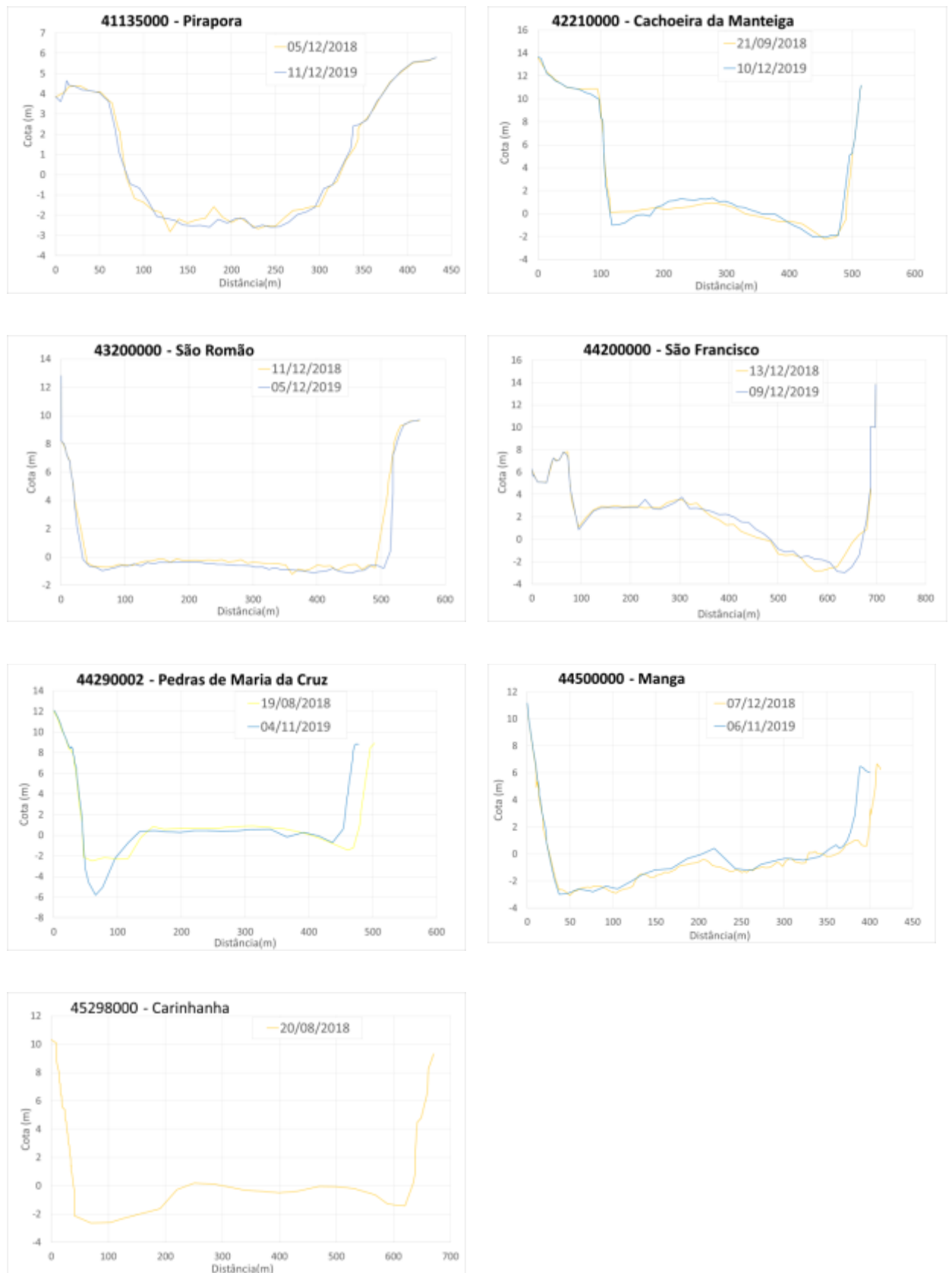


Figura 4.3 – Seções transversais medidas no RSF para as EFs no trecho entre Pirapora e Carinhanha

Tabela 4.3 – Estatísticas das séries parâmetros medidos nas EFs de interesse para cálculo de declividades no RSF

Estação		Vazão (m ³ /s)			Área (m ²)			Largura (m)		
Código	Nome	N	Média	Min - Max	Média	Min - Max	Média	Min - Max		
41135000	Pirapora	285	786	116 - 3275	1250	832 - 2016	376	228 - 480		
42210000	Cmanteiga	165	1090	208 - 4470	1312	441 - 3696	387	347 - 429		
43200000	SRomão	323	1484	186 - 6912	2012	1007 - 4659	386	269 - 694		
44200000	SFrancisco	315	2083	298 - 13757	2310	598 - 18594	537	249 - 3286*		
44290002	PMCruz	216	1898	340 - 9117	2289	647 - 6629	530	229 - 632		
44500000	Manga	270	1629	288 - 7033	2384	675 - 5594	483	345 - 587		
45298000	Carinhanha	330	2088	383 - 17447	2463	828 - 24239	610	357 - 4440*		

Estação		Velocidade (m/s)			Profundidade (m)		
Código	Nome	N	Média	Min - Max	Média	Min - Max	
41135000	Pirapora	285	0.59	0.14 - 1.93	3.34	2.22 - 6.04	
42210000	Cmanteiga	165	0.77	0.47 - 1.22	3.35	1.18 - 9.28	
43200000	SRomão	323	0.65	0.18 - 1.58	5.23	2.87 - 10.71	
44200000	SFrancisco	315	0.78	0.36 - 1.58	4.30	1.05 - 9.42	
44290002	PMCruz	216	0.75	0.48 - 1.38	4.23	1.30 - 10.78	
44500000	Manga	270	0.62	0.15 - 1.58	5.03	1.83 - 10.63	
45298000	Carinhanha	330	0.78	0.38 - 1.54	3.99	1.17 - 9.82	

*As larguras superiores a 1 km da série histórica foram medidas em 1979 e 1980

4.2 Interpolação dos dados in situ

A metodologia de interpolação no tempo e espaço (ITE) pressupõe a existência de duas EFs com nivelamento altimétrico, uma a montante e outra a jusante da EV. Consequentemente a validação dos dados de AS foi limitada a dois trechos do RSF (Figura 4.4): 1) EF Pirapora a EF Morpará (trecho com 10 EFs, Figura 4.5 a, b e c) e 2) EF Juazeiro a EF Santa Maria da Boa Vista (trecho com estas duas EFs, Figura 4.5 d). Com esta seleção foram obtidas 76 EVs para validação dos dados de AS das missões Envisat, Envisat-X, Saral, Jason-2 e 3, Sentinel-3A e 3B.

A validação dos dados da missão Cryosat foi feita a parte e é apresentada no item (4.5), devido às características de cobertura espacial da missão e inexistência de uma EV fixa com série temporal de dados.



Figura 4.4 – Área de estudo e articulações 1 a 4 com as EVs (VHSs- *Virtual hydrological stations*) e EFs (ISHS – *in situ hydrological stations*) em detalhe

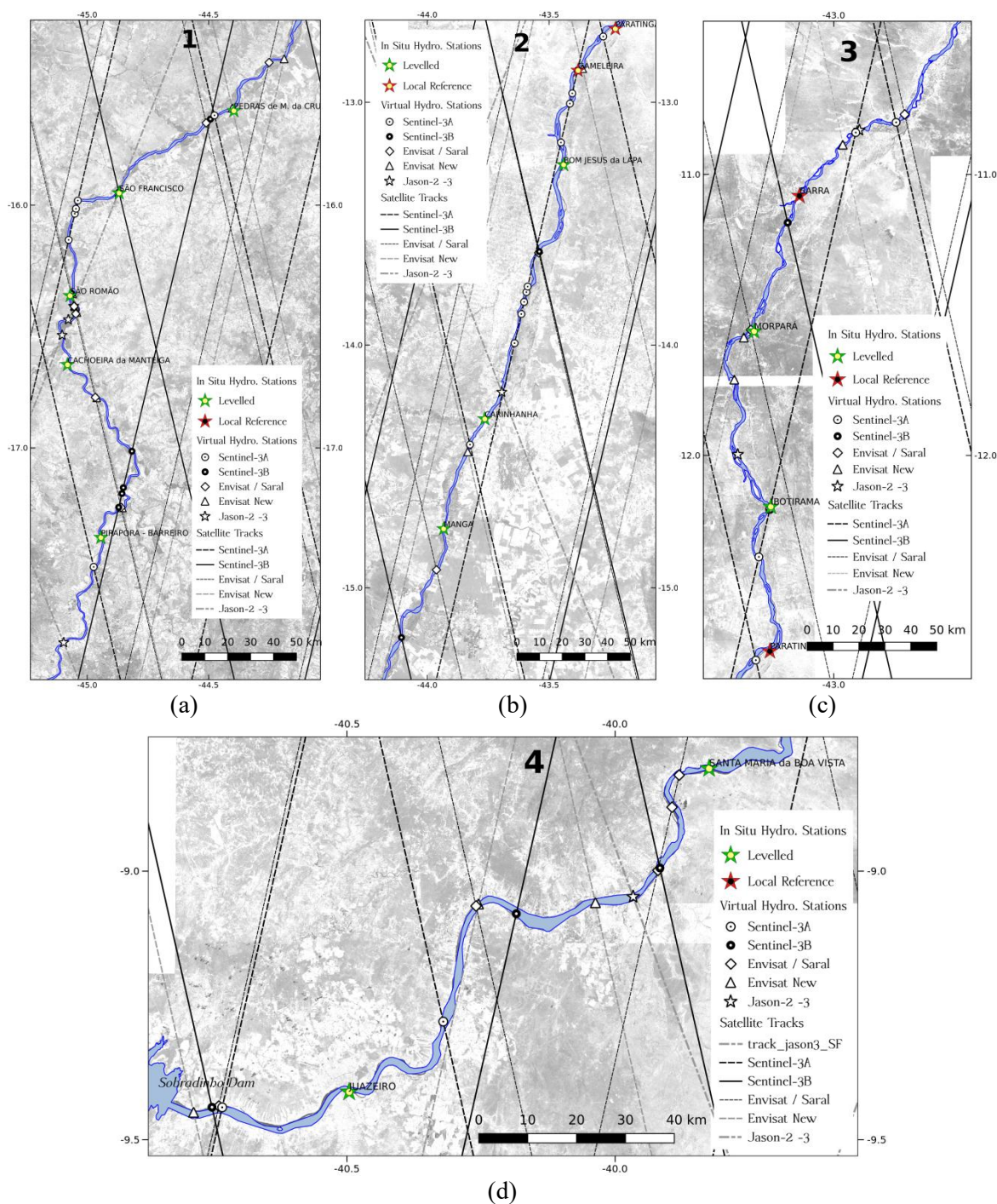


Figura 4.5 – Trechos do RSF utilizados na validação dos dados

A validação dos dados das 76 EVs foi dividida em grupos considerando os critérios de distância entre EF e EV e os tipos de interpolação dos dados *in situ* propostos (Figura 4.6). No primeiro grupo o critério de seleção foi a distância de 15 km entre EF e EV, resultando na seleção de 33 EVs. Para este grupo, além da IT e ITE, foi feita a comparação direta entre os dados da EF e da EV, de maneira absoluta e relativa (RRMSE) com ajuste das séries pelas médias. O objetivo é analisar o quanto a análise relativa pode subestimar os erros. O segundo grupo engloba as demais 43 EVs, para as quais foi executada apenas a IT e ITE. Acredita-se que a distância

superior a 15 km é significativa para uma comparação direta considerando a declividade média do Médio RSF de 10 cm/km (Tabela 3.1, fonte: ANA, 2003). Por fim, o conjunto de 76 EVs foi analisado usando a ITE para avaliar a performance das diferentes missões.

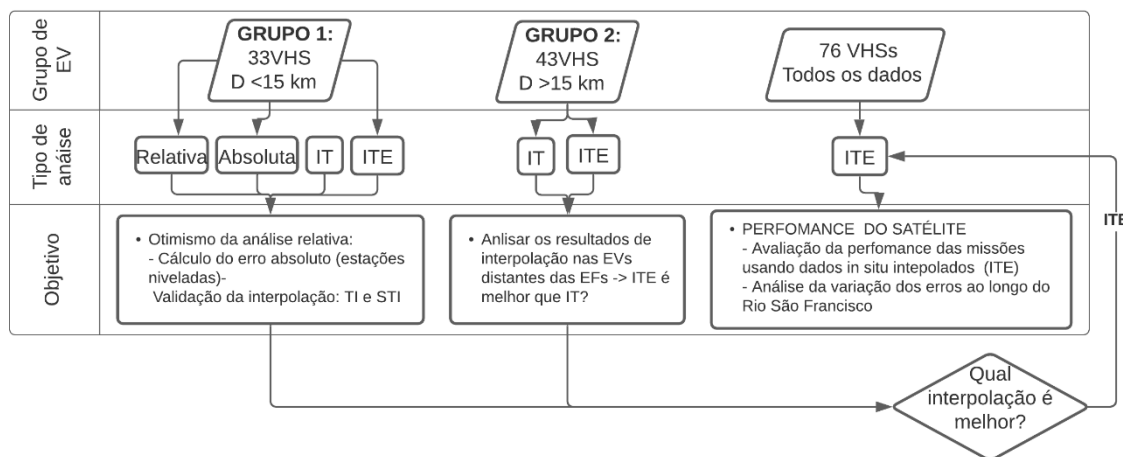


Figura 4.6 – Fluxograma dos grupos de EVs e tipos de análise executadas (IT=interpolação temporal e ITE=interpolação no tempo e espaço)

A Tabela 4.4 apresenta o quantitativo de EVs em cada grupo por satélite.

Tabela 4.4 -Número de EVs de cada satélite por grupo de análise

Satellite	Envisat	Saral	EnvisatX	Jason-2	Jason-3	S-3A	S-3B	Total
Grupo 1 (D<15km)	6	6	5	5	5	4	2	33
Grupo 2 (D>15km)	7	7	7	2	2	11	7	43
Total	13	13	12	7	7	15	9	76

4.2.1 Grupo 1: 33EVs com D< 15 km de EFs

Todas as métricas listadas no item 3.3.3 foram calculadas para as 33 EVs e estão apresentadas na Tabela 4.5. As primeiras colunas trazem informações referentes às EVs: a EF mais próxima e a distância até a mesma, o satélite a que refere, o tamanho da série de dados (N) e a taxa de eficiência amostral (N_{eff}). As demais colunas foram agrupadas por métrica e as siglas indicam qual análise se trata: abs (absoluta); rel (relativa, ajustada pelas médias), IT (interpolação no tempo) e ITE (interpolação no tempo e no espaço).

Também foi calculada a melhoria (%) do AME e RMSE de um tipo de análise em relação às demais, por exemplo:

- a melhoria do AME com a ITE em relação a análise absoluta é dada por: $(\text{AME}_{\text{ABS}} - \text{AME}_{\text{ITE}}) / \text{AME}_{\text{ABS}}$

- a avaliação de quão otimista a análise relativa é em relação a uma outra análise é dada por:

$$(\text{RMSE}_{\text{outra}} - \text{RMSE}_{\text{relativa}}) / \text{RMSE}_{\text{outra}}$$

No caso do coeficiente de correlação R, a ordem das variáveis no numerador é invertida, pois com a interpolação é esperado um aumento na correlação entre os dados de satélite e *in situ*, por exemplo:

- a melhoria do R com a IT em relação a análise absoluta é dada por: $(R_{IT} - R_{ABS}) / R_{ABS}$

Como no cálculo de ME os desvios positivos e negativos se anulam, a análise de melhoria dessa métrica não foi feita.

Os valores de RRMSE obtidos (0,13 m a 6,29 m, média 1,37 m, mediana 0,94 m) são compatíveis com os encontrados em literatura para rios de médio (decímetros a alguns metros) e até mesmo grande porte (alguns decímetros) (vide Tabela 2.3). Isto confirma a viabilidade do uso de altimetria por satélite em rios mais estreitos (largura inferior a 1 km), especialmente para as missões mais recentes.

Dentre as 33 EVs, 31 resultaram em valores de RMSE absoluto (0,61 m a 6,11 m, média 2,09 m, mediana 1,91 m) próximos aos de RMSE relativos da literatura, exceto em duas estações do Saral que apresentam resultados acima de 40 m em todas as métricas (Tabela 4.5). Nestas EVs do Saral (próximas as EFs PMCruz e SMBVista) acontece o fenômeno conhecido como perda de ancoragem, quando o altímetro sobrevoa uma região significativamente mais elevada que o rio antes de cruzá-lo e o *tracker* não ajusta a janela de captura de dados a tempo de obter a informação da superfície de água. Portanto, os valores de elevação registrados se referem à área antes de atravessar o rio. Esse fenômeno foi relatado por Biancamaria *et al.* (2017) em rios estreitos, sendo relatados valores de erro de até 100 m para EVs do Saral. Assim, na Tabela 4.5 é apresentada a média e a mediana em duas opções: com todas as EVs e desconsiderando as duas EVs problemáticas do Saral. Pela mesma razão, em alguns gráficos os *outliers* do Saral foram ocultados e estão indicados por um asterisco, objetivando melhor visualização dos demais resultados.

Tabela 4.5 – Estatísticas de erros para o grupo 1: 33 EVs (D<15 km)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EV mais próxima	Informações da EV				ME (m)			RMSE (m)				RRMSE x			Melhoria RMSE(%)		
	Dist (km)	Satélite	N	Neff (%)	abs	IT	ITE	rel	abs	IT	ITE	Abs (%)	IT (%)	ITE (%)	IT x abs	ITE x abs	ITE x IT
Cmanteiga	+15	Jason 2	282	96	0,23	0,23	1,37	1,81	1,83	1,83	2,26	1,1	1,1	20	0,0	-23	-23
Cmanteiga	+15	Jason 3	159	96	-0,1	-0,1	1,07	0,98	0,98	0,96	1,42	0,0	-1,8	31	2,0	-45	-48
SRomão	-15	Jason 2	284	97	2,79	2,8	1,7	1,04	2,98	2,98	2,03	65	65	49	0,0	32	32
SRomão	-15	Jason 3	163	98	2,2	2,2	1,07	0,93	2,39	2,39	1,42	61	61	35	0,0	41	41
SRomão	-12	Envisat	83	93	1,74	1,75	1,16	0,79	1,91	1,91	1,38	59	59	43	0,0	28	28
SRomão	-12	Saral	25	71	1,32	1,32	0,69	0,75	1,52	1,52	0,97	51	51	23	0,0	36	36
SRomão	-10	Envisat-X	12	63	1,89	1,89	1,27	0,48	1,95	1,95	1,35	75	75	64	0,0	31	31
SRomão	-7	Envisat-X	13	68	1,78	1,78	1,28	0,84	1,97	1,97	1,50	57	57	44	0,0	24	24
SRomão	-6	Envisat	84	94	2,19	2,20	1,95	1,07	2,44	2,45	2,22	56	56	52	-0,4	9,0	9,4
SRomão	-6	Saral	23	66	2,03	2,03	1,61	1,85	2,75	2,75	2,49	33	33	26	0,0	9,5	9,5
SRomão	-6	Jason 2	284	97	1,80	1,80	1,21	0,61	1,90	1,89	1,34	68	68	54	0,5	29	29
SRomão	-6	Jason 3	163	98	1,58	1,57	1,01	0,39	1,63	1,62	1,08	76	76	64	0,6	34	33
SRomão	+1	Envisat	83	93	1,18	1,19	1,21	1,08	1,60	1,62	1,64	33	33	34	-1,3	-2,5	-1,2
SRomão	+1	Saral	24	69	0,58	0,58	0,59	0,94	1,11	1,11	1,12	15	15	16	0,0	-0,9	-0,9
SRomão	+1	Envisat-X	12	63	0,82	0,82	0,94	0,21	0,84	0,84	0,95	75	75	78	0,0	-13	-13
SFrancisco	+1	S-3B	21	84	0,58	0,61	0,87	0,56	0,80	0,83	1,02	30	33	45	-3,7	-28	-23
SFrancisco	+3	Jason 2	251	86	0,96	0,97	2,38	2,12	2,33	2,33	3,16	9,0	9,0	33	0,0	-36	-36
SFrancisco	+3	Jason 3	147	89	0,72	0,73	1,90	2,26	2,38	2,37	2,95	5,0	5,0	23	0,4	-24	-24
PMCruz	-13	Envisat	62	70	3,82	3,82	2,53	1,20	4,00	4,01	2,80	70	70	57	-0,2	30	30
PMCruz	-13	Saral	4	11	49,3	49,3	48,0	6,29	49,71	49,70	48,36	87	87	87	0,0	2,7	2,7
PMCruz	-13	S-3B	23	92	1,00	0,99	0,08	0,48	1,11	1,11	0,43	57	57	-12	0,0	61	61
PMCruz	-7	S-3A	37	63	3,39	3,56	2,94	5,08	6,11	6,32	5,98	17	20	15	-3,4	2,1	5,4
PMCruz	+1	Envisat-X	6	32	3,37	3,37	3,55	4,86	5,91	5,93	5,99	18	18	19	-0,3	-1,4	-1,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EV mais próxima	Informações da EV			Neff (%)	ME (m)			RMSE (m)				RRMSE x			Melhoria RMSE(%)		
	Dist (km)	Satélite	N		abs	IT	ITE	rel	abs	IT	ITE	Abs (%)	IT (%)	ITE (%)	IT x abs	ITE x abs	ITE x IT
Carinhanha	-15	S-3A	58	98	0,95	0,95	-0,12	0,64	1,14	1,15	0,70	44	44	8,9	-0,9	39	39
Carinhanha	+15	Jason 2	291	99	0,59	0,59	1,98	1,08	1,23	1,23	2,23	12	12	52	0,0	-81	-81
Carinhanha	+15	Jason 3	93	56	0,20	0,20	1,60	0,58	0,61	0,62	1,70	5,0	6,0	63	-1,6	-179	-174
BJLapa	+13	S-3A	58	98	-0,8	-0,8	0,10	0,13	0,85	0,85	0,16	85	85	19	0,0	81	81
Ibotirama	+1	S-3A	39	66	0,52	0,51	0,40	0,69	0,86	0,86	0,80	20	20	14	0,0	7,0	7,0
Morpara	-5	Envisat-X	14	74	1,77	1,77	1,61	0,77	1,93	1,93	1,76	60	60	56	0,0	8,8	8,8
SMBoaVista	-11	Envisat	84	94	2,39	2,39	1,23	1,35	2,75	2,75	1,95	51	51	31	0,0	29	29
SMBoaVista	-11	Saral	13	37	2,11	2,12	0,37	0,73	2,24	2,24	0,38	67	67	-92	0,0	83	83
SMBoaVista	-4	Envisat	84	94	2,13	2,13	1,65	1,10	2,40	2,40	1,96	54	54	44	0,0	18	18
SMBoaVista	-4	Saral	13	40	42,9	42,9	42,7	1,59	42,93	42,89	42,78	96	96	96	0,1	0,3	0,3
Média			91	77	4,18	4,19	4,00	1,37	4,76	4,77	4,49	46	46	36	-0,2	6,1	6,5
Mediana			58	86	1,74	1,75	1,27	0,94	1,93	1,93	1,64	54	54	35	0,0	9,0	9,4
Média*			96	80	1,48	1,48	1,33	1,21	2,08	2,09	1,84	43	43	33	-0,3	6,4	6,8
Mediana*			62	89	1,58	1,57	1,23	0,93	1,91	1,91	1,5	51	51	34	0,0	9,5	9,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EV mais próxima	Informações da EV				ME (m)			RMSE (m)				RRMSE x			Melhoria RMSE(%)		
	Dist (km)	Satélite	N	Neff (%)	abs	IT	ITE	rel	abs	IT	ITE	Abs (%)	IT (%)	ITE (%)	IT x abs	ITE x abs	ITE x IT
Cmanteiga	+15	Jason 2	282	96	0,23	0,23	1,37	1,81	1,83	1,83	2,26	1,1	1,1	20	0,0	-23	-23
Cmanteiga	+15	Jason 3	159	96	-0,1	-0,1	1,07	0,98	0,98	0,96	1,42	0,0	-1,8	31	2,0	-45	-48
SRomão	-15	Jason 2	284	97	2,79	2,8	1,7	1,04	2,98	2,98	2,03	65	65	49	0,0	32	32
SRomão	-15	Jason 3	163	98	2,2	2,2	1,07	0,93	2,39	2,39	1,42	61	61	35	0,0	41	41
SRomão	-12	Envisat	83	93	1,74	1,75	1,16	0,79	1,91	1,91	1,38	59	59	43	0,0	28	28
SRomão	-12	Saral	25	71	1,32	1,32	0,69	0,75	1,52	1,52	0,97	51	51	23	0,0	36	36
SRomão	-10	Envisat-X	12	63	1,89	1,89	1,27	0,48	1,95	1,95	1,35	75	75	64	0,0	31	31
SRomão	-7	Envisat-X	13	68	1,78	1,78	1,28	0,84	1,97	1,97	1,50	57	57	44	0,0	24	24
SRomão	-6	Envisat	84	94	2,19	2,20	1,95	1,07	2,44	2,45	2,22	56	56	52	-0,4	9,0	9,4
SRomão	-6	Saral	23	66	2,03	2,03	1,61	1,85	2,75	2,75	2,49	33	33	26	0,0	9,5	9,5
SRomão	-6	Jason 2	284	97	1,80	1,80	1,21	0,61	1,90	1,89	1,34	68	68	54	0,5	29	29
SRomão	-6	Jason 3	163	98	1,58	1,57	1,01	0,39	1,63	1,62	1,08	76	76	64	0,6	34	33
SRomão	+1	Envisat	83	93	1,18	1,19	1,21	1,08	1,60	1,62	1,64	33	33	34	-1,3	-2,5	-1,2
SRomão	+1	Saral	24	69	0,58	0,58	0,59	0,94	1,11	1,11	1,12	15	15	16	0,0	-0,9	-0,9
SRomão	+1	Envisat-X	12	63	0,82	0,82	0,94	0,21	0,84	0,84	0,95	75	75	78	0,0	-13	-13
SFrancisco	+1	S-3B	21	84	0,58	0,61	0,87	0,56	0,80	0,83	1,02	30	33	45	-3,7	-28	-23
SFrancisco	+3	Jason 2	251	86	0,96	0,97	2,38	2,12	2,33	2,33	3,16	9,0	9,0	33	0,0	-36	-36
SFrancisco	+3	Jason 3	147	89	0,72	0,73	1,90	2,26	2,38	2,37	2,95	5,0	5,0	23	0,4	-24	-24
PMCruz	-13	Envisat	62	70	3,82	3,82	2,53	1,20	4,00	4,01	2,80	70	70	57	-0,2	30	30
PMCruz	-13	Saral	4	11	49,3	49,3	48,0	6,29	49,71	49,70	48,36	87	87	87	0,0	2,7	2,7
PMCruz	-13	S-3B	23	92	1,00	0,99	0,08	0,48	1,11	1,11	0,43	57	57	-12	0,0	61	61
PMCruz	-7	S-3A	37	63	3,39	3,56	2,94	5,08	6,11	6,32	5,98	17	20	15	-3,4	2,1	5,4
PMCruz	+1	Envisat-X	6	32	3,37	3,37	3,55	4,86	5,91	5,93	5,99	18	18	19	-0,3	-1,4	-1,0
Carinhanha	-15	S-3A	58	98	0,95	0,95	-0,12	0,64	1,14	1,15	0,70	44	44	8,9	-0,9	39	39
Carinhanha	+15	Jason 2	291	99	0,59	0,59	1,98	1,08	1,23	1,23	2,23	12	12	52	0,0	-81	-81

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EV mais próxima	Informações da EV				ME (m)			RMSE (m)				RRMSE x			Melhoria RMSE(%)		
	Dist (km)	Satélite	N	Neff (%)	abs	IT	ITE	rel	abs	IT	ITE	Abs (%)	IT (%)	ITE (%)	IT x abs	ITE x abs	ITE x IT
Carinhanha	+15	Jason 3	93	56	0,20	0,20	1,60	0,58	0,61	0,62	1,70	5,0	6,0	63	-1,6	-179	-174
BJLapa	+13	S-3A	58	98	-0,8	-0,8	0,10	0,13	0,85	0,85	0,16	85	85	19	0,0	81	81
Ibotirama	+1	S-3A	39	66	0,52	0,51	0,40	0,69	0,86	0,86	0,80	20	20	14	0,0	7,0	7,0
Morpara	-5	Envisat-X	14	74	1,77	1,77	1,61	0,77	1,93	1,93	1,76	60	60	56	0,0	8,8	8,8
SMBoaVista	-11	Envisat	84	94	2,39	2,39	1,23	1,35	2,75	2,75	1,95	51	51	31	0,0	29	29
SMBoaVista	-11	Saral	13	37	2,11	2,12	0,37	0,73	2,24	2,24	0,38	67	67	-92	0,0	83	83
SMBoaVista	-4	Envisat	84	94	2,13	2,13	1,65	1,10	2,40	2,40	1,96	54	54	44	0,0	18	18
SMBoaVista	-4	Saral	13	40	42,9	42,9	42,7	1,59	42,93	42,89	42,78	96	96	96	0,1	0,3	0,3
Média			91	77	4,18	4,19	4,00	1,37	4,76	4,77	4,49	46	46	36	-0,2	6,1	6,5
Mediana			58	86	1,74	1,75	1,27	0,94	1,93	1,93	1,64	54	54	35	0,0	9,0	9,4
Média*			96	80	1,48	1,48	1,33	1,21	2,08	2,09	1,84	43	43	33	-0,3	6,4	6,8
Mediana*			62	89	1,58	1,57	1,23	0,93	1,91	1,91	1,5	51	51	34	0,0	9,5	9,5

Para avaliação do otimismo da **análise relativa** foi utilizado o RMSE, por ser amplamente utilizado nos estudos de AS. O termo otimista é aqui utilizado no sentido da análise relativa tender a subestimar os erros. A análise relativa (colunas 13 a 15 da Tabela 4.5 e Figura 4.7) é em média:

- 46% mais otimista que a análise absoluta (sem interpolar)
- 46% mais otimista que a IT
- 36% que a interpolação ITE

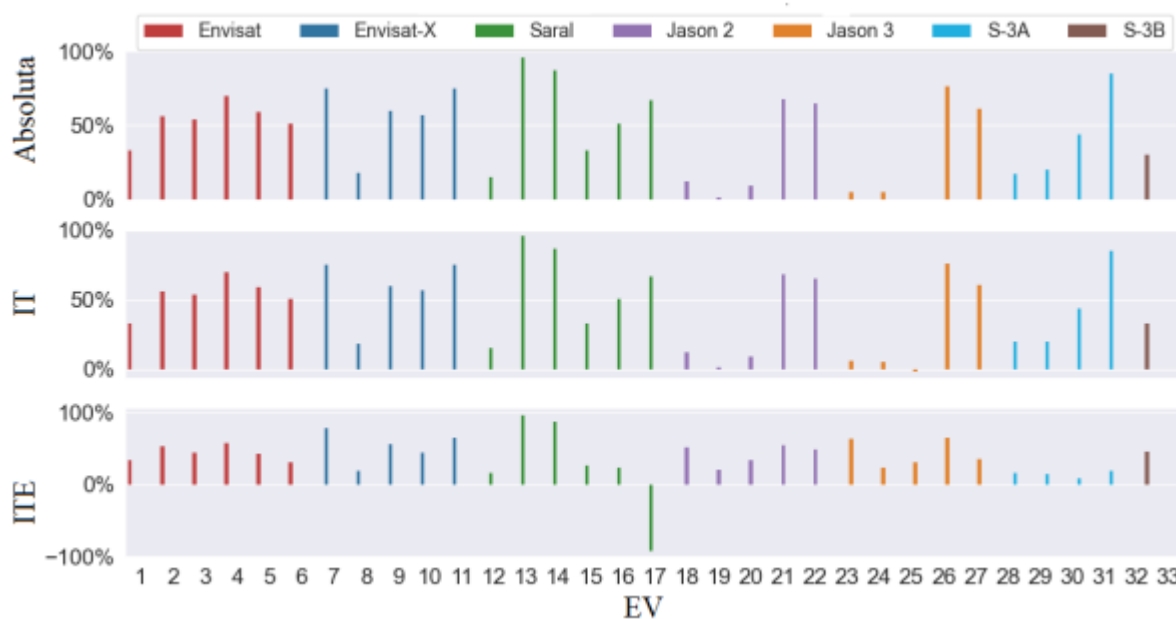


Figura 4.7 – Otimismo da análise relativa em relação as demais análises por EV (otimismo = $(RMSE_{analise} - RMSE_{relativa}) / RMSE_{analise} * análises = IT, ITE, absoluta$)

A análise relativa não foi mais otimista em apenas três casos: em uma EV em que a IT apresenta RMSE ligeiramente menor (-1,8%) e em duas EVs que a ITE diminuiu o RMSE (em -12% e -92%). Observando a mediana, o RMSE absoluto foi 1,93 m enquanto o relativo foi 0,94 m (colunas 11 e 9 da Tabela 4.5), uma diferença de quase 1 m. Para a ITE, a mediana de RMSE foi 0,29 m menor que análise absoluta e a relativa (1,64 m para ITE e 1,93 m para análise absoluta e IT) (colunas 12 e 11 da Tabela 4.5). Na Figura 4.8 visualiza-se essa redução de RMSE proporcionada pela ITE.

A **interpolação temporal (IT)** não produziu diferenças significativas no RMSE e AME em relação à análise absoluta (Figura 4.8). Na média há uma piora de 0,2% no RMSE e 0,3% no AME (colunas 16 e 22 da Tabela 4.5), o que pode indicar que a oscilação do nível d'água não ocorre de forma linear entre os horários de leitura das régua. Outra hipótese é que as leituras

nem sempre sejam feitas nos horários padronizados (7h e 17h), comprometendo a produção de dados sincronizados ao horário da passagem de satélite.

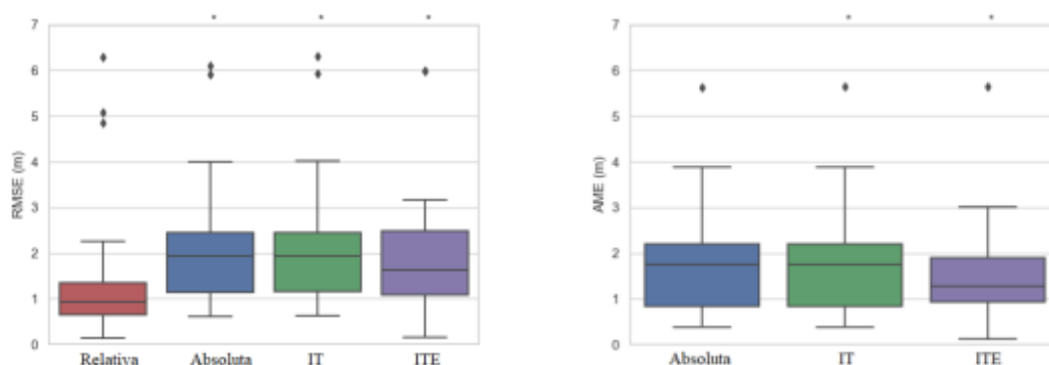


Figura 4.8 – RMSE e AME para os diferentes tipos de análise (*2 EVs do Saral ocultadas)

A interpolação no tempo e espaço (ITE):

- Em termos de RMSE, foi em média 6,1% melhor que a análise absoluta e 6,5% melhor que a IT (colunas 17 e 18 da Tabela 4.5)
- Em 22 das 33 EVs a melhoria em relação a IT é de 29% em média
- Em 11 EVs a ITE piora os resultados de RMSE (média -39%). São EVs em que utilizar os dados de uma segunda EF (mais distante) para produção de níveis d'água sincronizados é pior que a comparação absoluta direta. Em sete desses 11 casos a distância entre a EV e a EF mais próxima era 3 km ou menos, o que significa que a ITE agrega dados de uma EF muito mais distante (as EFs se situam em média 90 km uma da outra).

O ME (colunas 6 a 8) e o AME (colunas 19 a 24 da Tabela 4.5) na média geral pioraram com a ITE em relação à análise absoluta (AME piora 11,6%). Nas 11 EVs em que a ITE piora os resultados, os valores são mais significativos (ME piora 338% e AME 95% na média) que nas 22 EVs em que há melhora (ME média 38% e AME média de 34%). A IT não provê alterações significativas nessas métricas em relação à análise absoluta.

O sinal do ME pode indicar uma tendência geral do(s) altímetro(s) em sub ou superestimar os níveis d'água (Tabela 4.5), lembrando que os desvios são obtidos pelas diferenças entre as séries de satélite subtraídas da séries *in situ*. Considerando a **análise absoluta** e devido à declividade do rio, era esperado ME positivo para as EVs a montante de EF (20 das 33 EVs) e ME negativo para EVs a jusante de EFs (7 das 33 EVs). As demais seis EVs são basicamente coincidentes com EF e em função da deriva da órbita nominal de até 1 km, a cada passagem do satélite os pontos podem cair a montante ou a jusante da EF. Todas as EVs a montante e as seis

coincidentes apresentaram ME positivo e dentre as 7 EVs a jusante apenas duas apresentaram ME negativo. Assim parece haver uma tendência geral dos altímetros de superestimar o nível d'água, o que indica prováveis valores de correções geofísicas e de propagação subestimados (Equação 2.2) ou a própria limitação de funcionamento de altímetros em rios mais estreitos.

Para o coeficiente de correlação o ideal são valores próximos a 1,0 indicando forte correlação positiva entre os dados de satélite e os dados in situ. Na **análise absoluta** R variou de -0,15 a 0,99 (média de 0,62). Para quatro EVs a correlação é negativa, duas são do Saral, que apresenta os problemas descritos anteriormente e as outras duas são do S-3A e Envisat-X nas proximidades da EF Pedras de Maria da Cruz. As especificidades do trecho desta EF serão discutidas no item 4.4 (Análise dos erros ao longo do Rio São Francisco). A **IT** não promoveu alterações significativas na correlação (Figura 4.9). A **ITE** propiciou uma melhoria na correlação entre os dados de satélite e in situ, com 75% dos dados com correlação acima de 0,60 (3º bloxplot da Figura 4.9).

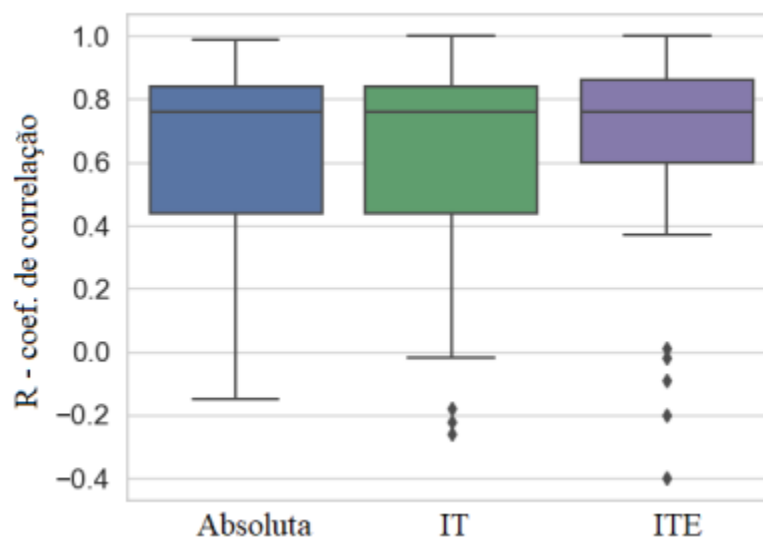


Figura 4.9 - Coeficiente de correlação das 33VHS para cada tipo de análise

4.2.2 Grupo 2: 43EVs com D> 15 km de EFs

Este grupo se refere às EVs cuja EF mais próxima está a mais de 15 km de distância. A Tabela 4.6 apresenta os resultados das estatísticas para este grupo de EVs.

Tabela 4.6 – Estatísticas de erros para o grupo 2: 43 EVs (D>15 km)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Informações da EV			ME (m)		AME (m)			RMSE (m)			R		
Distância a nascente (km)	Satélite	N eff (%)	IT	ITE	IT	ITE	Melhoria (%)	IT	ITE	Melhoria (%)	IT	ITE	Melhoria (%)
687	S-3B	92%	-9,99	-6,07	9,99	6,07	39%	10,05	6,15	39%	0,80	0,84	5,0%
688	Envisat	25%	-7,01	-2,96	7,01	2,96	58%	7,14	3,20	55%	0,64	0,69	7,8%
688	Saral	74%	31,06	35,19	31,06	35,19	-13%	31,66	35,74	-13%	-	-0,12	61%
689	Envisat-X	42%	-7,37	-3,24	7,37	3,24	56%	7,51	3,55	53%	0,65	0,57	-12%
699	S-3B	88%	-11,20	-4,84	11,20	4,84	57%	11,25	4,91	56%	0,82	0,87	6,1%
723	S-3B	92%	-5,08	-3,54	11,17	3,54	68%	11,68	3,57	69%	0,12	0,93	675%
756	Saral	71%	3,70	-0,75	3,70	0,75	80%	3,72	0,80	78%	0,97	0,97	0,0%
756	Envisat-X	79%	4,20	-0,25	4,20	0,34	92%	4,22	0,39	91%	0,97	0,98	1,0%
756	Envisat	89%	4,01	-0,19	4,01	0,77	81%	4,14	1,14	72%	0,85	0,86	1,2%
848	S-3A	95%	-2,37	0,08	2,37	0,14	94%	2,39	0,20	92%	0,96	0,98	2,1%
866	S-3A	86%	4,41	2,60	4,41	2,67	39%	5,60	4,34	23%	-	-0,20	-18%
980	Saral	43%	-0,63	2,23	1,14	2,28	-100%	1,60	2,68	-68%	0,50	0,46	-8,0%
980	Envisat	92%	-0,08	2,72	0,65	2,72	-318%	0,79	2,82	-257%	0,90	0,90	0,0%
989	Envisat-X	47%	-1,26	2,58	1,43	2,58	-80%	1,48	2,68	-81%	0,88	0,90	2,3%
1012	S-3B	88%	3,20	0,24	5,78	0,26	96%	5,79	0,32	94%	0,15	0,99	560%
1051	Saral	34%	3,35	1,45	3,35	1,45	57%	3,48	1,72	51%	0,48	0,50	4,2%
1051	Envisat	96%	3,90	2,00	3,90	2,00	49%	3,92	2,03	48%	0,98	0,97	-1,0%
1142	S-3A	69%	-1,37	0,32	1,40	0,32	77%	1,44	0,44	69%	0,82	0,92	12%
1182	S-3A	85%	-4,26	0,30	4,26	0,30	93%	4,28	0,35	92%	0,93	0,99	6,5%
1187	S-3A	98%	-4,85	0,84	4,85	0,84	83%	4,88	0,94	81%	0,79	0,87	10%
1206	S-3A	98%	5,74	0,79	5,74	0,83	86%	5,98	1,68	72%	0,65	0,39	-40%
1206	Saral	29%	5,49	1,18	5,49	1,18	79%	5,58	1,62	71%	0,81	0,74	-8,6%
1206	Envisat	93%	5,64	1,22	5,64	1,22	78%	5,70	1,50	74%	0,86	0,86	0,0%
1211	S-3B	88%	5,44	1,15	5,44	1,15	79%	5,51	1,34	76%	0,60	0,73	22%

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Informações da EV			ME (m)		AME (m)			RMSE (m)			R		
Distância a nascente (km)	Satélite	N eff (%)	IT	ITE	IT	ITE	Melhoria (%)	IT	ITE	Melhoria (%)	IT	ITE	Melhoria (%)
1290	S-3A	90%	-3,75	-0,57	3,75	0,60	84%	3,76	0,64	83%	0,98	0,98	0,0%
1302	S-3A	98%	-4,85	-0,53	4,85	1,15	76%	5,01	1,38	72%	0,82	0,82	0,0%
1305	Envisat-X	95%	-4,65	0,20	4,65	0,27	94%	4,66	0,31	93%	0,98	0,99	1,0%
1323	S-3A	100%	-6,08	-0,34	6,56	0,92	86%	6,66	1,18	82%	0,30	0,60	100%
1371	S-3A	98%	1,72	-0,40	1,72	0,43	75%	1,75	0,49	72%	0,98	0,98	0,0%
1421	Jason 3	98%	-0,58	1,60	0,62	1,60	-158%	0,66	1,65	-150%	0,94	0,91	-3,2%
1421	Jason 2	98%	-0,36	1,77	0,41	1,77	-332%	0,47	1,81	-285%	0,98	0,96	-2,0%
1452	Envisat-X	53%	3,47	1,26	3,47	1,26	64%	3,51	1,33	62%	0,86	0,85	-1,2%
1979	S-3A	98%	-2,85	0,26	2,85	0,38	87%	2,85	0,48	83%	0,81	0,51	-37%
2009	Envisat	98%	-4,85	0,99	4,85	1,14	76%	4,98	1,50	70%	0,32	0,24	-25%
2009	Envisat-X	89%	-3,06	1,50	5,00	1,50	70%	5,19	1,71	67%	0,17	0,21	24%
2009	Saral	69%	-2,64	2,26	5,75	2,26	61%	5,97	5,30	11%	0,21	0,00	-100%
2016	S-3B	76%	6,85	0,26	6,85	0,26	96%	6,85	0,27	96%	0,87	0,89	2,3%
2036	Envisat-X	95%	5,84	1,28	5,84	1,28	78%	6,02	1,95	68%	0,36	0,35	-2,8%
2045	Jason 2	99%	5,98	2,27	5,98	2,27	62%	6,63	3,56	46%	0,00	0,02	*
2045	Jason 3	81%	14,47	10,87	14,47	10,87	25%	15,05	11,63	23%	0,04	0,02	-50%
2051	Envisat	94%	3,17	0,29	3,17	0,36	89%	3,29	0,94	71%	0,61	0,62	1,6%
2051	Saral	66%	2,89	0,44	2,89	0,92	68%	3,17	2,06	35%	-	-	-75%
2052	S-3B	92%	1,87	-0,98	1,87	0,98	48%	1,88	0,99	47%	0,04	-0,07	-
Média		81%	0,87	1,29	5,37	2,51	39%	5,54	2,87	37%	0,62	0,66	27%
Mediana		89%	-0,08	0,44	4,65	1,18	75%	4,88	1,62	69%	0,81	0,85	0%

Para a **IT** o ME oscilou entre -11,2 m e 31,06 m (Coluna 4 da Tabela 4.6), sendo negativo em 22 EVs e positivo nas outras 21. Com a **ITE**, o ME ficou entre -6,07 m a 35,19 m e em nove EVs o ME passou de negativo para positivo, totalizando 30 EVs com ME positivo. Assim, na ITE 70% das EVs apontam tendência a superestimar os níveis d'água.

Os erros após o ajuste de dados *in situ* propiciado pela ITE são notavelmente menores do que com a IT, sendo que para ITE 20 EVs apresentam erros submétricos e para IT apenas quatro EVs. Tal fato fica evidente com a análise da média de AME: 5,37 m para IT e 2,51 m para ITE, ou seja, para IT os erros absolutos de IT são maiores que o dobro dos erros absolutos da ITE.

O RMSE oscilou entre 0,20 m e 35,74 m, com média 2,87 m e mediana 1,62 m. Em 86% das 43 EVs, o RMSE melhora em média 64% (coluna 11 da Tabela 4.6 e Figura 4.10) e o AME em média de 70% (coluna 8 da Tabela 4.6 e Figura 4.11).

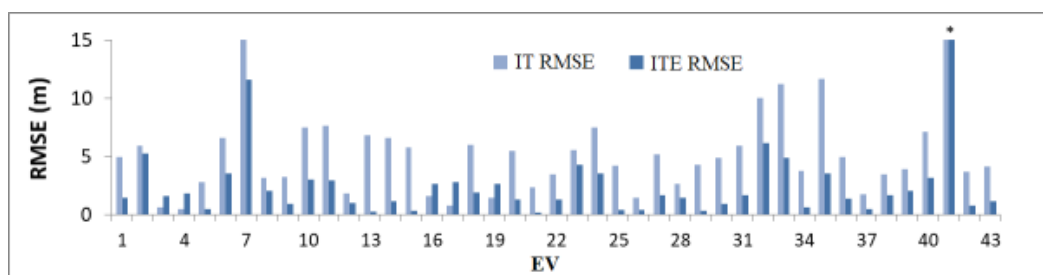


Figura 4.10 – RMSE das 43 EVs do grupo 2 para IT e para ITE

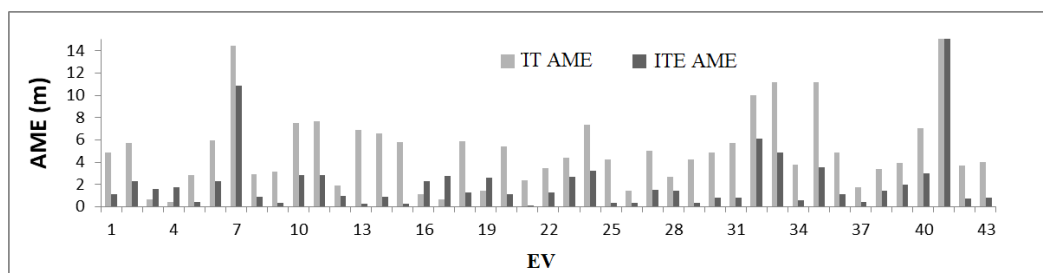


Figura 4.11 – AME das 43 EVs do grupo 2 para IT e para ITE

A **ITE** promoveu uma melhoria na correlação entre os dados de satélite e *in situ* elevando a mediana de 0,81 para 0,85 (Figura 4.12).

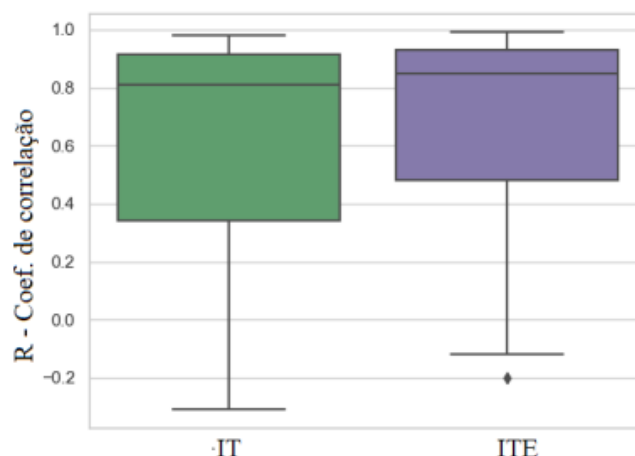


Figura 4.12 – Coeficiente de correlação das 43 EVs do grupo 2 para IT e para ITE

4.2.3 Validação da metodologia ITE

Para as EFs situadas entre outras duas EFs, foram geradas séries interpoladas (ITE) para comparação com a série histórica *in situ*. Os resultados de erros e coeficiente de correlação apresentados na Tabela 4.7 e Figura 4.13.

Tabela 4.7 – Erros para as cotas interpoladas (ITE) comparadas às cotas *in situ* monitoradas no local da EF

EF	Distância à EF (km)		ME (m)	AME (m)	RMSE (m)	R
	montante	jusante				
Pirapora	-	113	-	-	-	-
CManteiga	113	41	3,10	3,10	3,13	0,99
SRomao	41	63	-0,19	0,24	0,27	0,99
SFrancisco	63	68	-0,25	0,31	0,36	0,99
PMCruz	68	119	0,06	0,25	0,33	0,98
Manga	119	54	1,08	1,10	1,15	0,97
Carinhanha	54	129	-0,91	0,92	0,98	0,97
BJLapa	129	141	-0,12	0,14	0,19	0,99
Ibotirama	141	82	0,37	0,39	0,41	0,99
Morpará	82	-	-	-	-	-
Média	90	90	-	0,81	0,85	0,98
Mediana	82	82	-	0,35	0,39	0,99
Média*	-	-	-	0,48	0,53	0,98
Mediana*	-	-	-	0,31	0,36	0,99

*Excluindo os resultados de Cachoeira da Manteiga

Os dados gerados com a interpolação apresentaram um bom ajuste aos dados monitorados na EF, com coeficiente de correlação superior a 0,97 em todas as EFs testadas. Para a EF CManteiga eram esperados resultados ruins, pois há um trecho de corredeiras entre esta EF e a de montante (EF Pirapora), alterando significativamente a linha d'água. Desconsiderando os resultados da EF CManteiga, a mediana do AME das demais EFs é de 0,31 m e do RMSE é 0,36 m.

Foram obtidos valores excelentes para as EFs SRomao, SFrancisco, PMCruz e BJJLapa (AME médio de 0,24 m). Estas três primeiras EFs são subsequentes, mostrando que para este trecho a (ITE) tem excelente performance, com erros de até 0,36 m, compatíveis até mesmo com resultados de análise relativa em estudos de AS em grandes rios (Tabela 2.3). A EF BJJLapa apresenta os melhores resultados mesmo estando a 129 km da EF a montante e 141 km da EF a jusante. Já as EFs Manga e Carinhanha distam apenas 54 km uma da outra, apresentaram resultados ruins e estão delimitadas por EFs com bons resultados: EF PMCruz a montante e BJJLapa a jusante. Para o trecho da EF Manga, os resultados ruins podem decorrer da situação de diminuição de vazão (Tabela 4.3), sendo essa incongruência pode ser justificada pelo relevo cárstico da região ou mesmo a retirada de valores significativos de vazão.

Neste contexto, conclui-se que a ITE é uma metodologia válida para produção de dados *in situ* sincronizados aos dados das EFs no tempo e espaço.

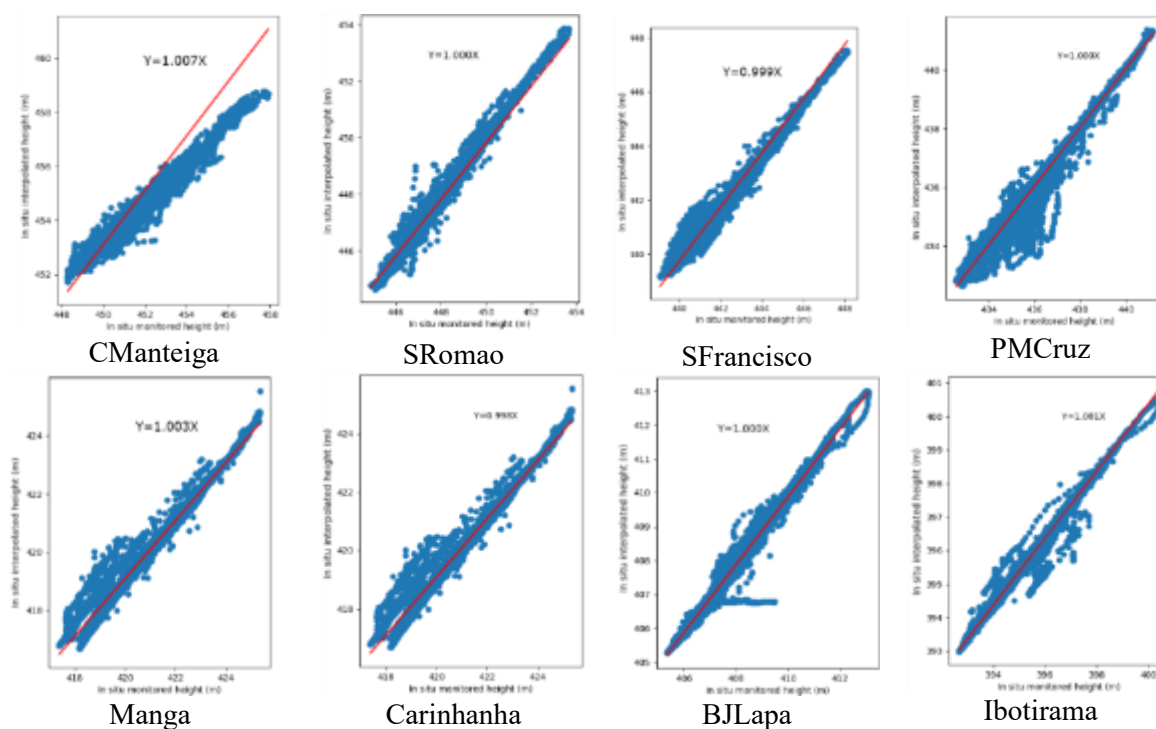


Figura 4.13 – Regressão linear entre as cotas interpoladas e cotas *in situ* monitoradas para as EFs

4.3 Performance dos satélites com órbita fixa

Para análise de performance, as respectivas EVs de cada satélite foram agrupadas e calculou-se a média e a mediana das métricas analisadas (Tabela 4.8). Os melhores resultados de média e mediana para cada métrica estão destacados em **negrito sublinhado**. Os resultados da ITE para as 76 EVs, agrupados por satélite, estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 - Estatísticas médias por satélite (melhores valores em destaque)

Satélite	N° EVs	η_{eff} (%)		ME (m)		AME (m)		RMSE (m)		R	
		Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana	Média	Mediana
Envisat	13	87%	93%	1.06	1.22	1.62	1.24	1.93	1.95	0.67	0.79
Envisat-X	12	67%	66%	1.00	1.28	1.77	1.31	1.96	1.61	0.70	0.86
Saral	13	52%	66%	10.46	1.45	10.64	1.45	11.23	2.06	0.38	0.46
Jason 2	7	96%	97%	1.81	1.77	1.82	1.77	2.34	2.23	0.66	0.73
Jason 3	7	88%	96%	2.73	1.60	2.73	1.60	3.12	1.65	0.64	0.75
S-3A	15	89%	98%	0.44	0.26	0.84	0.48	1.32	0.70	0.68	0.84
S-3B	9	88%	88%	-1.43	0.08	2.04	0.98	2.11	1.02	0.88	0.89

Tabela 4.9 – Erros e correlação para as 76 EVs agrupadas por satélite

ID da EV	Distância a nascente (km)	Satélite	Neff (%)	ME (m)	AME (m)	RMSE (m)	R
1	688	Envisat	25%	-2.96	2.96	3.20	0.69
2	756	Envisat	89%	-0.19	0.77	1.14	0.86
3	809	Envisat	93%	1.16	1.18	1.38	0.89
4	814	Envisat	94%	1.95	1.98	2.22	0.73
5	821	Envisat	93%	1.21	1.21	1.64	0.79
6	938	Envisat	70%	2.53	2.68	2.80	0.79
7	980	Envisat	92%	2.72	2.72	2.82	0.90
8	1051	Envisat	96%	2.00	2.00	2.03	0.97
9	1206	Envisat	93%	1.22	1.22	1.50	0.86
10	2009	Envisat	98%	0.99	1.14	1.50	0.24
11	2051	Envisat	94%	0.29	0.36	0.94	0.62
12	2069	Envisat	94%	1.23	1.24	1.95	0.01
13	2075	Envisat	94%	1.65	1.65	1.96	0.37
		Envisat Média	87%	1.06	1.62	1.93	0.67
		Envisat Mediana	93%	1.22	1.24	1.95	0.79
14	689	Envisat-X	42%	-3.24	3.24	3.55	0.57
15	756	Envisat-X	79%	-0.25	0.34	0.39	0.98
16	811	Envisat-X	63%	1.27	1.27	1.35	0.94
17	814	Envisat-X	68%	1.28	1.34	1.50	0.79
18	822	Envisat-X	63%	0.94	0.94	0.95	1.00
19	952	Envisat-X	32%	3.55	5.65	5.99	-0.09
20	989	Envisat-X	47%	2.58	2.58	2.68	0.90
21	1305	Envisat-X	95%	0.20	0.27	0.31	0.99
22	1452	Envisat-X	53%	1.26	1.26	1.33	0.85
23	1470	Envisat-X	74%	1.61	1.61	1.76	0.86
24	2009	Envisat-X	89%	1.50	1.50	1.71	0.21
25	2036	Envisat-X	95%	1.28	1.28	1.95	0.35
		Envisat-X Média	67%	1.00	1.77	1.96	0.70
		Envisat-X Mediana	66%	1.28	1.31	1.61	0.86
26	688	Saral	74%	35.19	35.19	35.74	-0.12
27	756	Saral	71%	-0.75	0.75	0.80	0.97
28	809	Saral	71%	0.69	0.69	0.97	0.87
29	814	Saral	66%	1.61	1.83	2.49	0.43
30	821	Saral	69%	0.59	0.78	1.12	0.78
31	938	Saral	11%	47.95	47.95	48.36	-0.02

<i>ID da EV</i>	<i>Distância a nascente (km)</i>	<i>Satélite</i>	<i>Neff (%)</i>	<i>ME (m)</i>	<i>AME (m)</i>	<i>RMSE (m)</i>	<i>R</i>
32	980	Saral	43%	2.23	2.28	2.68	0.46
33	1051	Saral	34%	1.45	1.45	1.72	0.50
34	1206	Saral	29%	1.18	1.18	1.62	0.74
35	2009	Saral	69%	2.26	2.26	5.30	0.00
36	2051	Saral	66%	0.44	0.92	2.06	-0.07
37	2069	Saral	37%	0.37	0.37	0.38	0.75
38	2075	Saral	37%	42.73	42.73	42.78	-0.40
		Saral Média	52%	10.46	10.64	11.23	0.38
		Saral Mediana	66%	1.45	1.45	2.06	0.46
39	794	Jason 2	96%	1.37	1.37	2.26	0.60
40	806	Jason 2	97%	1.70	1.71	2.03	0.73
41	814	Jason 2	97%	1.21	1.22	1.34	0.93
42	887	Jason 2	86%	2.38	2.38	3.16	0.62
43	1139	Jason 2	99%	1.98	1.99	2.23	0.79
44	1421	Jason 2	98%	1.77	1.77	1.81	0.96
45	2045	Jason 2	99%	2.27	2.27	3.56	0.02
		Jason 2 Média	96%	1.81	1.82	2.34	0.66
		Jason 2 Mediana	97%	1.77	1.77	2.23	0.73
46	794	Jason 3	96%	1.07	1.07	1.42	0.77
47	806	Jason 3	98%	1.07	1.08	1.42	0.75
48	814	Jason 3	98%	1.01	1.01	1.08	0.94
49	887	Jason 3	89%	1.90	1.90	2.95	0.39
50	1139	Jason 3	56%	1.60	1.60	1.70	0.67
51	1421	Jason 3	98%	1.60	1.60	1.65	0.91
52	2045	Jason 3	81%	10.87	10.87	11.63	0.02
		Jason 3 Média	88%	2.73	2.73	3.12	0.64
		Jason 3 Mediana	96%	1.60	1.60	1.65	0.75
53	848	S-3A	95%	0.08	0.14	0.20	0.98
54	866	S-3A	86%	2.60	2.67	4.34	-0.20
55	945	S-3A	63%	2.94	3.02	5.98	-0.20
56	1109	S-3A	98%	-0.12	0.48	0.70	0.75
57	1142	S-3A	69%	0.32	0.32	0.44	0.92
58	1182	S-3A	85%	0.30	0.30	0.35	0.99
59	1187	S-3A	98%	0.84	0.84	0.94	0.87
60	1206	S-3A	98%	0.79	0.83	1.68	0.39
61	1266	S-3A	98%	0.10	0.12	0.16	0.99
62	1290	S-3A	90%	-0.57	0.60	0.64	0.98
63	1302	S-3A	98%	-0.53	1.15	1.38	0.82
64	1323	S-3A	100%	-0.34	0.92	1.18	0.60
65	1371	S-3A	98%	-0.40	0.43	0.49	0.98
66	1392	S-3A	66%	0.40	0.40	0.80	0.84
67	1979	S-3A	98%	0.26	0.38	0.48	0.51
		S-3A Média	89%	0.44	0.84	1.32	0.68
		S-3A Mediana	98%	0.26	0.48	0.70	0.84
68	687	S-3B	92%	-6.07	6.07	6.15	0.84
69	699	S-3B	88%	-4.84	4.84	4.91	0.87
70	723	S-3B	92%	-3.54	3.54	3.57	0.93

<i>ID da EV</i>	<i>Distância a nascente (km)</i>	<i>Satélite</i>	<i>Neff (%)</i>	<i>ME (m)</i>	<i>AME (m)</i>	<i>RMSE (m)</i>	<i>R</i>
71	887	S-3B	84%	0.87	0.94	1.02	0.86
72	938	S-3B	92%	0.08	0.36	0.43	0.90
73	1012	S-3B	88%	0.24	0.26	0.32	0.99
74	1211	S-3B	88%	1.15	1.15	1.34	0.73
75	2016	S-3B	76%	0.26	0.26	0.27	0.89
76	2052	S-3B	92%	-0.98	0.98	0.99	0.93
		S-3B Média	88%	-1.43	2.04	2.11	0.88
		S-3B Mediana	88%	0.08	0.98	1.02	0.89
		Média Geral	68%	2.47	3.21	3.57	0.65
		Mediana geral	89%	1.16	1.23	1.63	0.79

4.3.1 η_{eff} – taxa de eficiência amostral

A taxa de eficiência amostral resulta de uma série de fatores, mas é adequado dizer que na média geral de ciclos para um conjunto de EVs é representativa da habilidade do satélite em gravar dados em situações ordinárias. A Figura 4.14 apresenta os resultados de eficiência amostral (η_{eff}) por missão. O satélite Jason-2 se destaca das demais missões, em suas sete EVs os valores variaram de 86% a 99% (média de 96%). Em termos de mediana (Tabela 4.8), o S-3A (mediana=98%) supera o Jason-2 (mediana=97%). As duas piores eficiências amostrais médias são do Envisat-X (67%) e Saral (52%). As demais missões (Envisat, Jason-3 e as S-3B) apresentam resultados parecidos de η_{eff} , para a maior parte das EVs a eficiência foi acima de 80%. Interessante observar que o Envisat é a missão mais antiga e apresenta eficiência amostral semelhante às missões mais recentes. Ressalta-se que para o S-3B e Envisat-X há menos ciclos disponíveis, tornando a média menos representativa. Boa parte dos outliers da Figura 4.14 se refere ao fenômeno de perda de ancoragem e a casos de deriva lateral da órbita nominal do satélite.

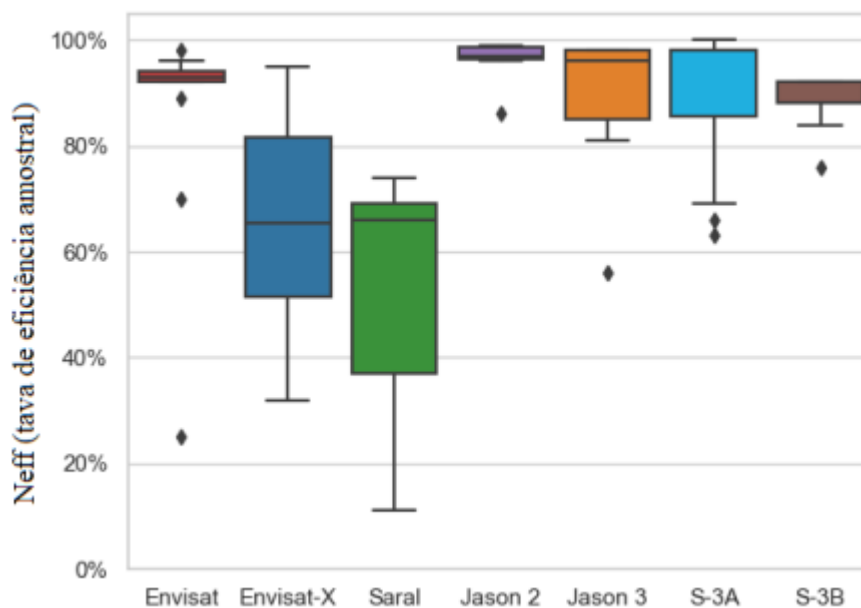


Figura 4.14 – Taxa de eficiência amostral por satélite

Uma série de fatores pode causar baixo η_{eff} . O primeiro deles é o funcionamento do *tracker*, que caso abra a janela de gravação muito cedo ou muito tarde, perde-se a superfície de água, o que comumente ocorre nas mudanças abruptas de relevo. Essa problemática foi parcialmente resolvida pelo OLT mode (*open loop tracking mode*). Outra causa de falha na gravação dos dados é a deriva em relação à órbita nominal, que é uma característica típica da AS, agravada nos trechos em que o *track* é aproximadamente paralelo ao rio.

4.3.2 RMSE e AME

As tendências de RMSE e AME (Figura 4.15) são bem semelhantes, mas é notório que o RMSE atribui mais peso aos valores extremos, o que fica bem evidente para o Saral em decorrência de seus três outliers. Os menores valores de RMSE e AME são da missão Sentinel-3, contudo o S-3B apresenta uma das maiores dispersões nos resultados, pois em três das nove EVs o RMSE e AME são superiores a 3 m (EVs 68 a 70 da Tabela 4.9). Para os demais satélites as distribuições de valores de AME e RMSE são semelhantes conforme a missão: Envisat na órbita original e estendida (medianas de 1,24 a 1,95 m) e Jason-2 e 3 (medianas de 1,60 a 2,23 m), com destaque para um outlier significativo do Jason-3 (EV 52: AME=10,87 m e RMSE = 11,63 m). O Saral apresenta a pior performance com médias de AME e RMSE superiores a 10 m, porém medianas compatíveis aos demais satélites (AME=1,45 m e RMSE = 2,06 m). Portanto, nas EVs em que não ocorreu perda de ancoragem, os resultados do Saral se aproximam das outras missões.

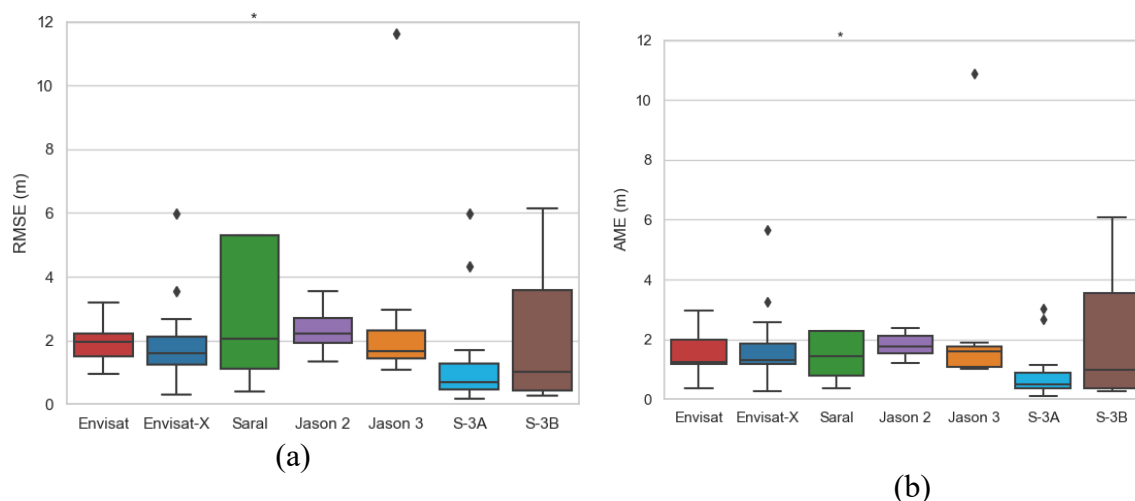


Figura 4.15 – Métricas resumidas por satélite (a) RMSE (b) AME (*3 outliers do Saral ocultados)

4.3.3 Erro médio - ME

No caso de ME, a análise não deve se ater as medidas de tendência central, que podem estar distorcidas no caso de satélites com algumas EVs com ME positivo e outras com ME negativo. Ademais a presença de um ou mais outliers pode comprometer significativamente a média dos resultados. Assim é complexo fazer uma ordenação do melhor para o pior resultado considerando esta métrica, sendo pertinente uma análise da distribuição do ME para as EVs de cada satélite (Figura 4.16).

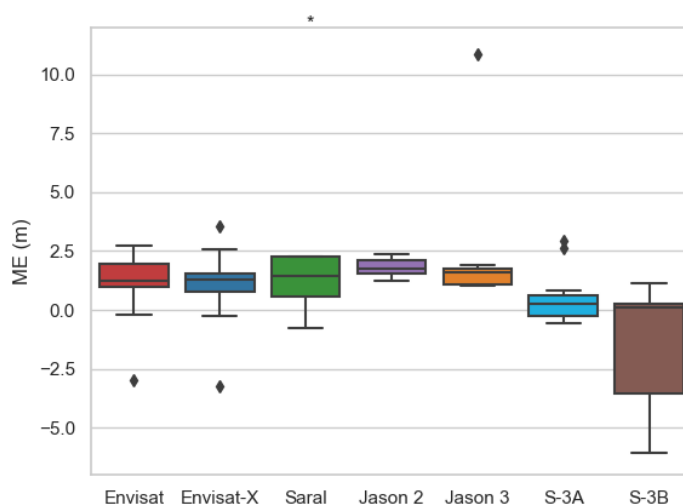


Figura 4.16 - ME por satélite (*3 outliers do Saral ocultados)

Observando a mediana, os satélites S-3 apresentam os menores ME enquanto os demais variam entre 1,0 e 2,0m. É notório que S-3A é o satélite com maior número de EVs com ME próximo à zero. S-3B possui seis de suas nove EVs com ME abaixo de 1,43m (valor absoluto), mas há três EVs com valores mais significativos (EVs 68 a 70). Todas as EVs da missão Jason

apresentaram ME positivo. Das sete EVs do Jason-3, seis tiveram ME abaixo de 2,0 m, mas a EV52 é um outlier com ME de quase 11 m comprometendo o resultado geral. As EVs do Jason-2 apresentaram ME entre 1,21 m e 2,83 m. Nas missões Envisat e Envisat-X não há outliers e o maior ME é de 3,2m. Para missão Saral, desconsiderando as três EVs com ME superior a 30 m, os resultados de ME foram parecidos com os demais satélites, sendo o menor valor absoluto 0,37 m.

Das 76 EVs, 82% apresentaram ME positivo, conforme mencionado anteriormente, há uma tendência geral dos altímetros de superestimar o nível d'água. Mesmo comparando os dados de satélite aos dados *in situ* sincronizados no tempo e espaço (supostamente mais próximos do valor verdadeiro), os desvios são em sua grande maioria positivos. A missão Jason parece ser a mais propensa a superestimar os níveis d'água, já que em todas as EVs o ME foi positivo. Para a missão Saral, Envisat e Envisat-X a maioria das EVs também apresentou ME positivo: 92%, 85% e 83% dos casos, respectivamente. Essa tendência é menos pronunciada, mas ainda presente na missão S-3A (67% das EVs tem ME positivo) e praticamente não existe no S-3B, que tem 56% das EVs com ME positivo (média -1,43 m e mediana 0,08 m). Vale destacar que resultado obtido pelo S-3B é influenciado pelos valores de ME negativos obtidos de 3 das suas 9 EVs no trecho entre a EF Pirapora e CManteiga, o que acontece com todos os satélites do trecho.

Os valores de nível d'água maiores que os *in situ* podem decorrer de correções geofísicas e de propagação subestimadas nos cálculos do range (distância entre o satélite e o nível d'água obtida em função do tempo de retorno da onda emitida pelo altímetro e refletida pela superfície). Mas também podem ser resultado do processamento feito pelo *retracker* influenciado pelo *footprint* do altímetro que sobrepõe às margens do rio. Por fim, pode ser resultado do processamento pelo próprio SWG. Contudo, esses níveis de erro têm sido encontrados por vários outros autores e sempre com tendência positiva (vide Tabela 2.3: Jarihani *et al.*, 2013; Tourian *et al.*, 2016; Biancamaria *et al.*, 2017; Crétaux *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2020).

4.3.4 Coeficiente de correlação – R

Os dados do S-3B são os que apresentaram maior correlação aos dados sincronizados das EFs, entre 0,73 e 0,99 (Figura 4.17). O Saral apresenta os piores resultados com correlação média de 0,38. Os demais satélites se agrupam em dois níveis de performance. No primeiro grupo estão os satélites Envisat-X e S-3A, com 50% das EVs com correlação superior a 0,86 e 0,84,

respectivamente. O segundo grupo apresenta desempenho inferior e inclui Envisat, Jason-2 e 3, caracterizados por médias em torno de 0,65 e medianas abaixo de 0,80.

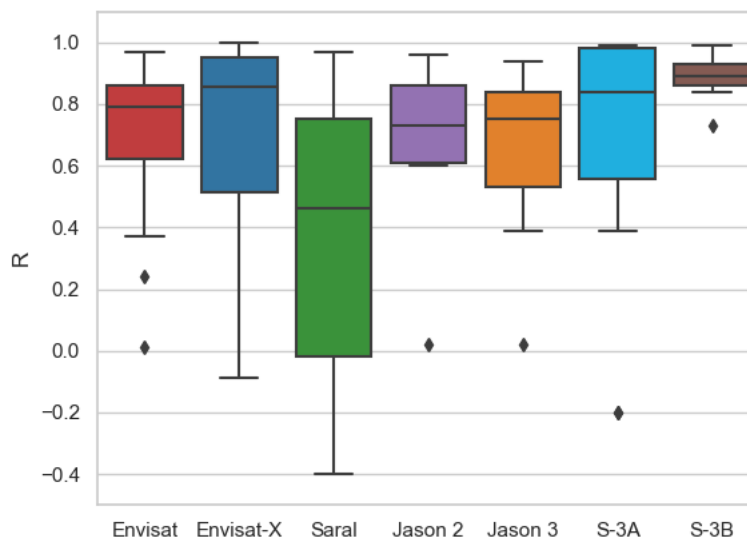


Figura 4.17 - Métricas resumidas por satélite (a) ME (b) R (*3 outliers do Saral ocultados)

4.3.5 Análise geral da performance

A missão Sentinel-3 apresentou resultados melhores que as demais em todas as métricas. A única exceção é feita para a média de taxa de eficiência amostral, em que Jason-2 mostrou resultados mais consistentes para o conjunto de EVs analisadas, enquanto S-3A apresenta a melhor mediana. Oito das 15 EVs do S-3A tiveram η_{eff} igual ou superior a 98%, contudo as EVs 55, 57 e 66 apresentam η_{eff} entre 63% e 69%, o que abaixa a média geral.

O S-3A se destaca com os menores valores de ME, AME e RMSE. Para o S-3B 67% das EVs têm bons resultados para estas métricas, mas as três EVs problemáticas localizadas no trecho entre a EF Pirapora e a EF Cachoeira da Manteiga (discussão sobre esse trecho do RSF no item 4.4) apresentaram valores elevados. Para o coeficiente de correlação, o S-3B apresenta os melhores resultados, inclusive nas três EVs problemáticas, o R foi maior que 0,84. Conclui-se que o satélite está captando a variação do nível d'água em consonância com a oscilação dos níveis *in situ*, mas provavelmente há um viés nos dados deste trecho, o que eleva as métricas de estimativa de erros absolutos.

Envisat é a missão mais antiga e apresenta eficiência amostral semelhante às missões mais recentes. Realmente é um marco para as missões altimétricas. A fase estendida da missão Envisat apresentou performance semelhante a fase inicial, exceto para a taxa de performance em que teve o segundo pior resultado (67%).

A missão Saral apresentou os problemas mecânicos de manutenção da órbita que ocasionaram o baixo η_{eff} . Ademais é a missão mais afetada pelo fenômeno de perda de ancoragem, produzindo *outliers* significativos que comprometem a média geral dos resultados. Observando a mediana das métricas AME e RMSE os resultados do Saral não destoam tanto das demais missões, indicando que nas EVs em que não ocorre perda de ancoragem o satélite apresenta resultados compatíveis com as demais missões.

A missão Jason apresentou resultados excelentes de taxa de eficiência amostral, o que é relevante considerando a grande quantidade de ciclos da missão: 293 ciclos nos nove anos de operação do Jason-2 até sua mudança de órbita e 166 ciclos para Jason-3 (de 2016 até a consolidação deste estudo). Contudo em termos de AME, RMSE e ME, Jason-2 e Jason-3 se revezaram na penúltima posição no ranking de resultados, à frente apenas do Saral. Nenhuma das métricas de erro do J-2 e J-3 ficou abaixo de 1,0 m. Percebe-se uma pequena melhoria do Jason-2 para Jason-3 considerando as medianas das métricas (Tabela 4.8), que não é mais significativa devido aos resultados ruins da EV52 (próxima a EF SMBVista) para o Jason-3. Como Jason possui apenas sete EVs no trecho estudado, um *outlier* impacta bastante no panorama geral. Outra razão para performance ruim do Jason é o *footprint* maior que os demais satélites em função da altitude de órbita mais elevada. Para um rio de larguras abaixo de 1 km como o RSF o impacto de um *footprint* maior é significativo.

Considerando todas as métricas analisadas conclui-se que a missão Sentinel-3 consegue estimar o nível d'água com mais acurácia que as demais missões. A melhor performance do Sentinel-3 é atribuída à operação em modo SAR, que propicia um *footprint* reduzido, de cerca de 300 m ao longo do *track*. Assim, o dado de nível d'água pode ser capturado no RSF apesar das larguras inferiores a 1 km. Os bons resultados também se justificam pelo *open loop tracking mode*, atualizado em 2020 para a missão Sentinel-3 (ESA, 2021b). O Jason-3 também opera em OLT mode, mas não performou como a missão S-3, provavelmente em função de seu *footprint* de cerca de 10 km de diâmetro e operação em modo de baixa resolução (LRM). Estas conclusões reforçam a significativa melhoria propiciada pelo modo SAR e reiteram o caráter promissor das missões Jason-CS e SWOT, que possuem esse modo de operação.

4.4 Análise dos erros ao longo do Rio São Francisco

Vários autores apontaram que a configuração do rio e o contexto ambiental da EV afetam diretamente a qualidade dos dados de AS (Maillard *et al.*, 2015; Boergens *et al.*, 2016; Biancamaria *et al.*, 2017; Bogning *et al.*, 2018). Neste contexto, é importante avaliar os

resultados por trecho do RSF para explicar possíveis razões de baixa de qualidade de alguns resultados. A Tabela 4.10 e a Figura 4.18 (a) a (d) mostram os valores de erro e correlação ao longo do RSF. Nota-se que os valores de ME negativos se concentram no trecho inicial (entre o km 600 e o km 750), que também apresenta valores elevados de RMSE. A seguir é feita uma análise das 76 EVs agrupadas por trecho e as imagens da Figura 4.21 apresentam a cobertura do solo de alguns extratos ao longo do RSF.

Tabela 4.10 – Erros e correlação por trechos ao longo do RSF

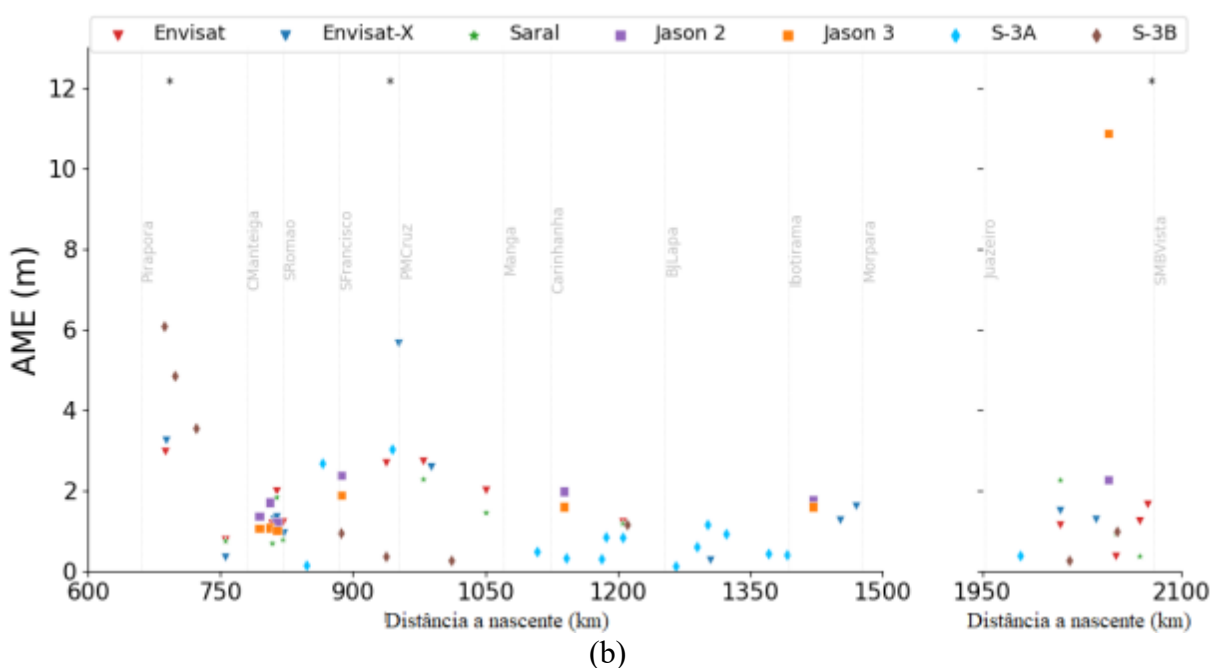
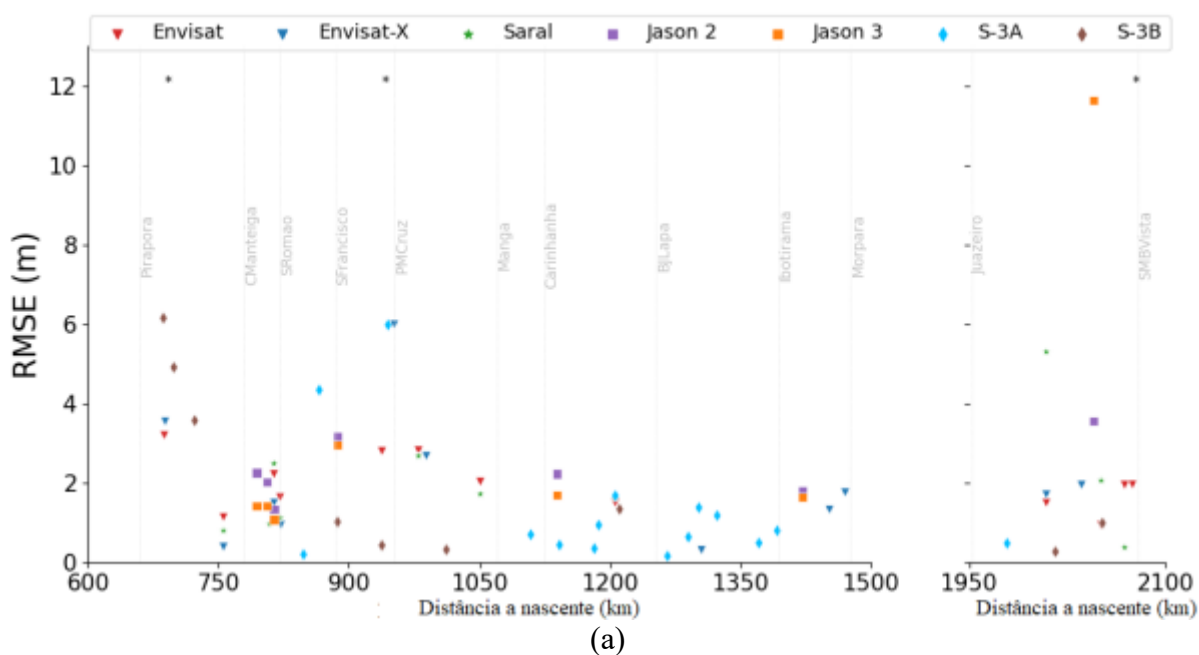
EVs montante- jusante	km		ID das EVs (Tabela 4.9)	η_{eff} (%)	AME (m)	R	RMS E (m)	DP do RMSE (m)
	início do trecho	N Evs						
Pirapora -Cac. Manteiga	666	9	68, 1, 26,14, 69, 70, 2, 15, 27	72%	6,41	0,73	6,61	10,46
Cac. Manteiga - São Romão	780	12	39,46,40,47,3,28,1 6,4,17,29,41,48	86%	1,31	0,78	1,62	0,48
São Romão- São Francisco	821	5	5,30,18,53,54	81%	1,15	0,67	1,65	1,42
São Francisco - PMCRuz	884	7	42,49,71,6,31,72,5 5	71%	8,46	0,48	9,24	16,05
PMCRuz - Manga	952	7	19,7,32,20,73,8,33	62%	2,42	0,66	2,61	1,6
Manga - Carinhanha/BJLapa	1070	10	56,43,50,57,58,59, 9,34,60,74	81%	0,99	0,77	1,25	0,58
BJLapa - Ibotirama	1253	7	61,62,63,21,64,65, 66	92%	0,56	0,89	0,71	0,41
Ibotirama - Morpara	1393	4	44, 51, 22, 23	81%	1,56	0,90	1,64	0,19
Juazeiro - SMBVista	1952	15	67,10,24,35,75,25, 45,52,11,36,12,37, 13,38	81%	4,55	0,30	5,16	10,42

EF Pirapora a EF Cachoeira da Manteiga

Nesta seção se concentram as EVs com ME negativo. A irregularidade da linha d'água causada pelas corredeiras a jusante da EF Pirapora explica parte desses resultados ruins. As primeiras três EVs (68, 1/26 e 14) são todas localizadas 20 km a jusante das corredeiras e apresentam resultados de RMSE maior que 3,0 m. As duas próximas EVs (69 e 70) são localizadas após a confluência com Rio das Velhas (um dos maiores afluentes do RSF, representando cerca de 13 % de sua descarga) e também apresentam RMSE superior a 3,0 m. As outras duas EVs (15 e 2/27) estão cerca de 20 km a montante da EF Cachoeira da Manteiga e mostram resultados melhores (RMSE entre 0,39 m e 1,14 m), pois na interpolação há uma influência maior da EF mais próxima, que não sofre de alterações significativas do escoamento fluvial.

EF Cachoeira da Manteiga a EF São Romão

Este trecho concentra 12 EVs em decorrência da existência de três grandes meandros do RSF (raios de 6 a 7 km) que são interceptados algumas vezes pelos *tracks* 921 do Envisat/Saral e 321 do Envisat-X. A média de RMSE para estas EVs é de 1,62 m com desvio padrão de 0,48 m. Os resultados são um pouco melhores que o trecho anterior, mas ainda ruins. Observa-se na Figura 4.21a que os *tracks* do Envisat e Envisat-X acompanham o rio longitudinalmente, então as formas de onda provavelmente são influenciadas pela presença de ilhas, bancos de areia e áreas alagadas. As EVs do Jason-2 e 3 (39, 40, 46 e 47) também são sujeitas a influência de vegetação propensa a inundações e ilhas em suas proximidades.



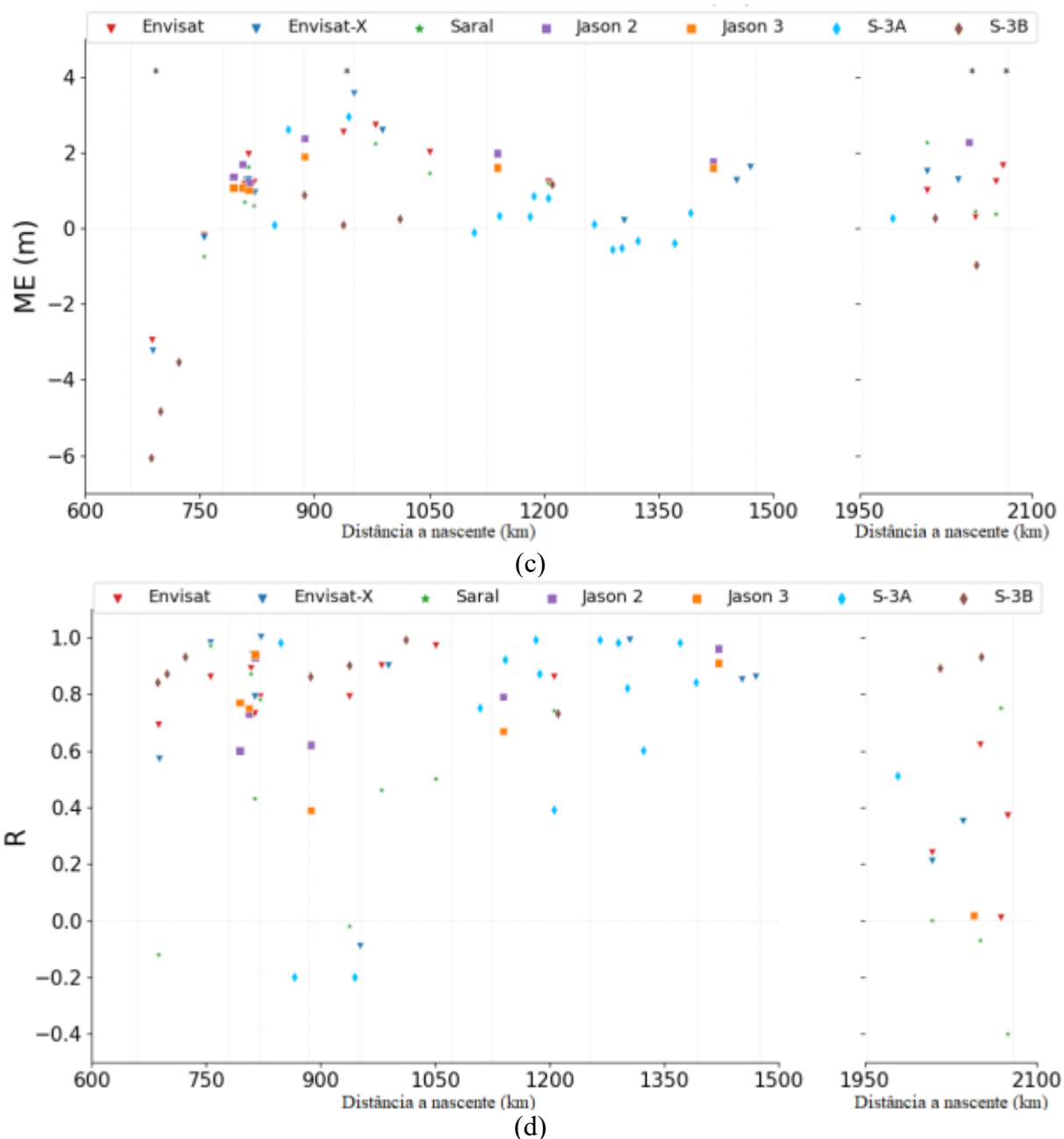


Figura 4.18 – Variação de erros ao longo do RSF: (a) RMSE (b) AME (c) ME (d) R

EF São Romão a EF São Francisco

Logo a jusante da EF São Romão há duas EVs do *track* 921 (uma do Envisat, outra do Saral) e uma EV do *track* 321 do Envisat-X. A média de RMSE destas três EVs é de 1,24 m. Outras duas EVs estão localizadas neste trecho, ambas do *track* 323 do S-3A (EVs 53 e 54). Enquanto a primeira apresenta um resultado excelente (RMSE de 0,20 m) a segunda resultou num RMSE de 4,34 m. Como o *track* 323 do S-3A é paralelo ao rio, em algumas passagens o satélite pode não cruzá-lo diretamente devido à deriva lateral da órbita e influência da topografia das margens. A Figura 4.19 (a) demonstra que os maiores erros estão relacionados às águas baixas e a Figura 4.19 (b) evidencia diferenças de 6 a 10 m entre os dados do S-3A e os dados *in situ*,

pois estão sendo capturadas as margens e não o nível d'água. A atualização do *open loop tracking comand* (OLTC) do S-3A em março de 2019 parece ter corrigido este erro, pois a partir dessa data há uma boa correspondência entre os dados *in situ* e de AS (Figura 4.19 b).

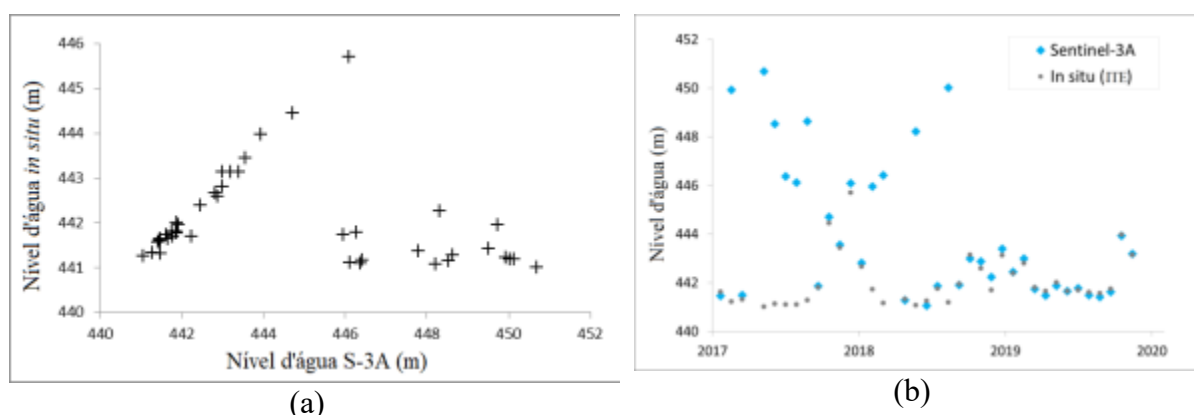


Figura 4.19 – Dados da EV 54 do S-3A e dados in situ: (a) Níveis d'água in situ x S-3A (b) Níveis d'água ao longo do tempo

A Figura 4.20 mostra os níveis d'água nas proximidades da EF São Romão para uma série de EVs localizadas a poucos quilômetros viabilizando combinar dados de cinco satélites diferentes para produzir quase 18 anos de dados contínuos. A figura apresenta também os dados *in situ* originais da EF (linha cinza contínua) e interpolados (pequenos pontos em cinza) para localidade de cada EV. É interessante notar como a interpolação melhora os resultados da validação, especialmente para a EV do S-3A que é situada mais distante da EF (27 quilômetros) (pequenos pontos cinzas próximos aos losangos azuis do S-3A).

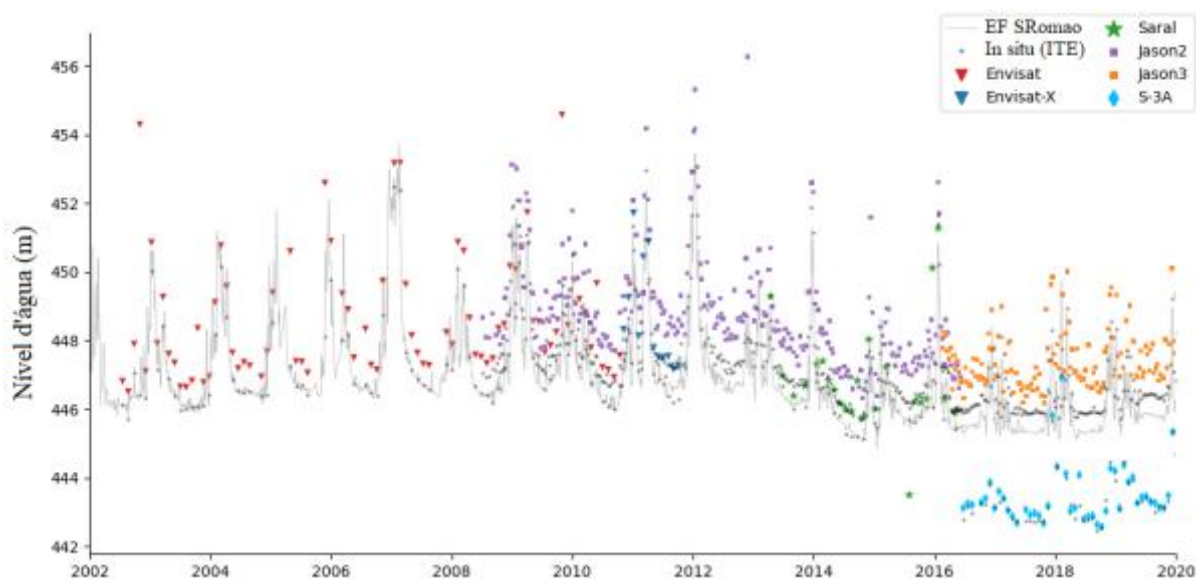


Figura 4.20 – Série temporal multimissão de níveis d'água nas proximidades da EF São Romão com dados in situ originais (linha contínua) e interpolados por EV (pontos em cinza)

EF São Francisco a EF Pedras de Maria da Cruz

Com exceção de duas EVs do S-3B (71 e 72) com bons resultados (RMSE de 1,02 m e 0,43 m, respectivamente) as outras cinco EVs mostraram valores de RMSE bastante elevados (2,80 m a 48,36 m). As quatro EVs próximas a EF Pedras de Maria da Cruz (6/31, 55, 19) com resultados ruins são todas de órbitas ascendentes (Figura 4.21 b) e tem η_{eff} inferior às demais, ocasionados pela presença de um penhasco de cerca de 100m na margem direita do RSF que é visualizado pelos satélites antes do rio. Contrariamente, as duas EVs do S-3B são de órbitas descendentes e não sofrem deste problema, especialmente considerando o OLTC utilizado pelos satélites S-3. Esse cenário de EVs com erros tão distintos resultou num RMSE elevado de 9,24 m e um desvio padrão ainda maior, de 16,05m.

EF Pedras de Maria da Cruz a EF Manga

As EVs deste trecho (satélites Envisat/Saral e Envisat-X) apresentaram RMSE entre 1,72 m e 5,99m, exceto uma EV do S-3B (RMSE de 0,32m). Este trecho é caracterizado por solo exposto em ambos os lados (Figura 4.21c), o que gera uma resposta forte ao radar podendo ocasionar um resultado inadequado no *retracker*. A EV do S-3B se localiza num trecho de mata ciliar densa, além do fato dos satélites S-3 demonstrarem performance mais acurada que os demais.

EF Manga a EF Bom Jesus da Lapa

A jusante da EF Manga há a EF Carinhanha, e entre estas apenas uma EV. Por este motivo a análise foi estendida a próxima EF, que é Bom Jesus da Lapa. Este trecho apresenta a segunda maior acurácia (RMSE médio de 1,25m com desvio padrão de 0,58m) especialmente porque dentre as nove EVs, cinco são do S-3A. Destas quatro são do mesmo *track* que é aproximadamente paralelo ao RSF ao longo de 80 km, cruzando o rio em diferentes pontos.

EF Bom Jesus da Lapa a EF Ibotirama

Neste trecho de 140 km há seis EVs do S-3A (sendo quatro do mesmo *track*) e uma do Envisat-X. Este trecho apresenta RMSE médio 0,71 m (desvio padrão de 0,41m) que é o melhor resultado dentre todos os trechos e é atribuído a boa performance do S-3A. A EV 66 é localizada numa curva ocasionando baixo η_{eff} (66%), pois em algumas passagens o satélite simplesmente não cruza o rio. As margens são cobertas por densa mata ciliar em muitos trechos, o que também contribui para os bons resultados.

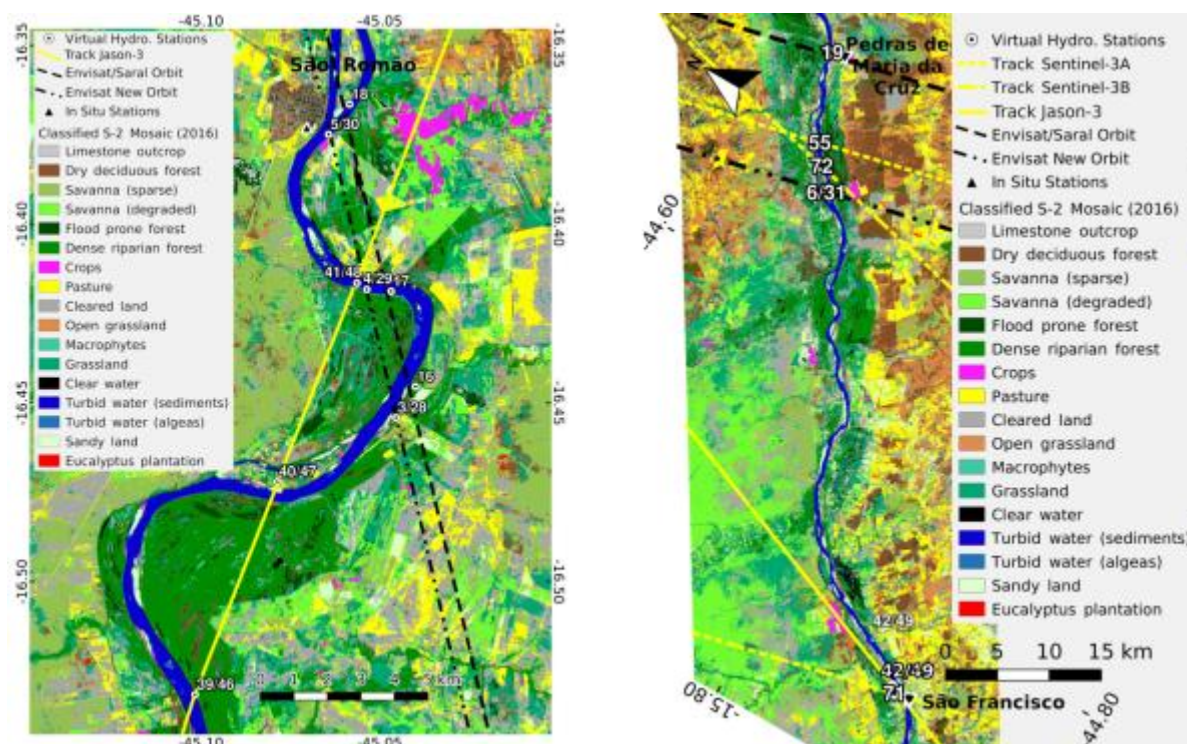
EF Ibotirama a EF Morpará

Apenas quatro EVs estão situadas neste trecho de 83 km: duas do Envisat-X e duas do Jason-2/3. Os resultados de RMSE oscilaram entre 1,33 m e 1,81 m e estão consistentes com outros resultados obtidos com estes satélites.

EF Juazeiro a EF Santa Maria da Boa Vista

A EF Juazeiro está situada cerca de 40 km à jusante do Reservatório de Sobradinho, portanto não é um trecho contíguo aos demais acima descritos. É o trecho com maior número de EVs, totalizando 15 com ao menos uma EV de cada satélite. No geral, os resultados são ruins, a média de RMSE é 5,16 m (desvio padrão de 10,42 m), mas cai para 1,31 m se as seis EVs do Saral e Jason são desconsideradas e 0,58m avaliando apenas as três EVs dos satélites S-3.

Nas EVs 45 e 52 do J-2 e J-3 há uma importante descontinuidade nos dados (Figura 4.22), sendo os resultados do J-3 muito piores que de seu antecessor. Ademais, nota-se na Figura 4.22 que a tendência a superestimar os níveis d'água do J-3 diminuiu um pouco antes de 2018. Essa mudança decorre da atualização do OLTC a bordo do J-3 realizada em agosto de 2017 (ESA, 2021b). A acurácia do OLTC pode afetar os resultados especialmente se a janela de gravação se fechar antes do pulso radar ter atingido a superfície de água e retornado à antena, em decorrência o retracker acaba interpretando um retorno das margens do rio, mais elevadas.



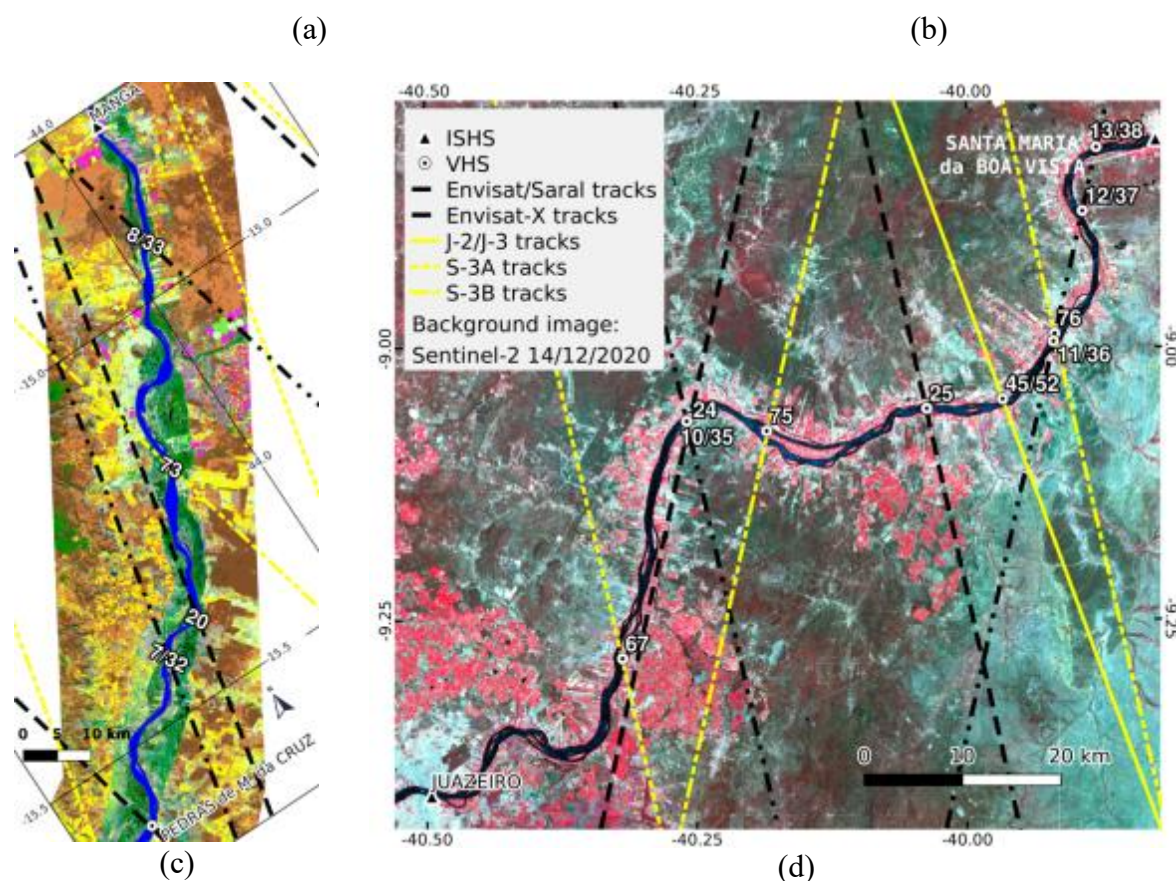


Figura 4.21 – Cobertura do solo nas proximidades de EFs do RSF: (a) São Romão (b) São Francisco (c) Pedras de Maria da Cruz (d) Juazeiro a Santa Maria da Boa Vista

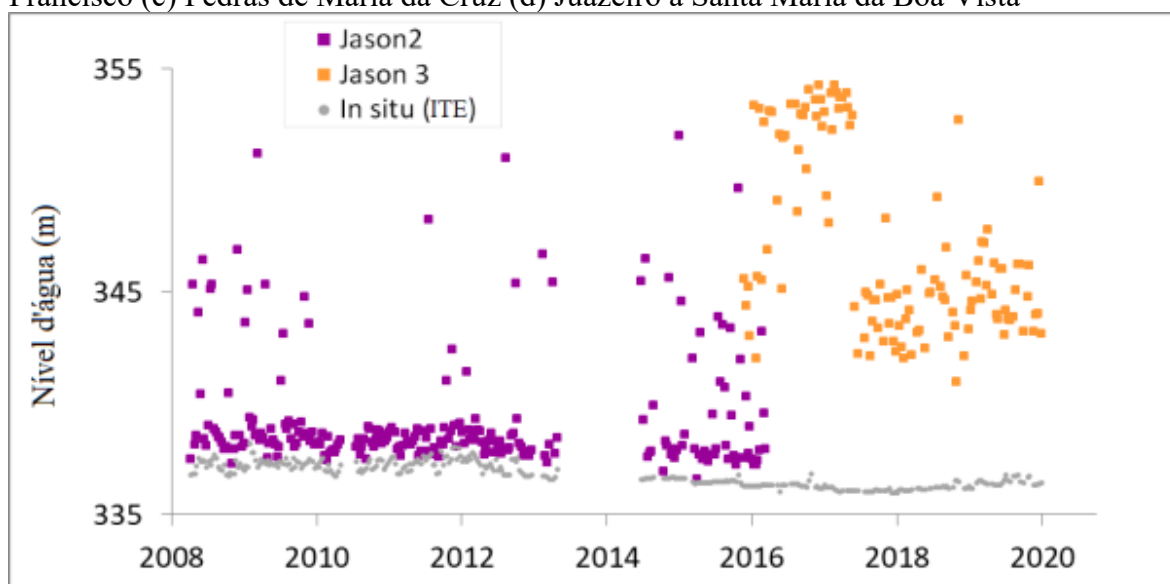


Figura 4.22 – Série temporal de níveis d'água nas EVs 45/52 do J-2 e J-3 e dados in situ interpolados (ITE)

4.5 Interpolação e performance do Cryosat

Para o Cryosat o conceito de EV não é pertinente, pois a cada passagem o satélite deriva cerca de 30 km, não havendo uma órbita fixa. Neste contexto, os dados foram processados para o período de 2010 a 2020 considerando cada ponto de intercessão dos *tracks* do Cryosat com o RSF como uma EV de uma única passagem. Ao todo foram obtidas 3528 EVs desde a barragem

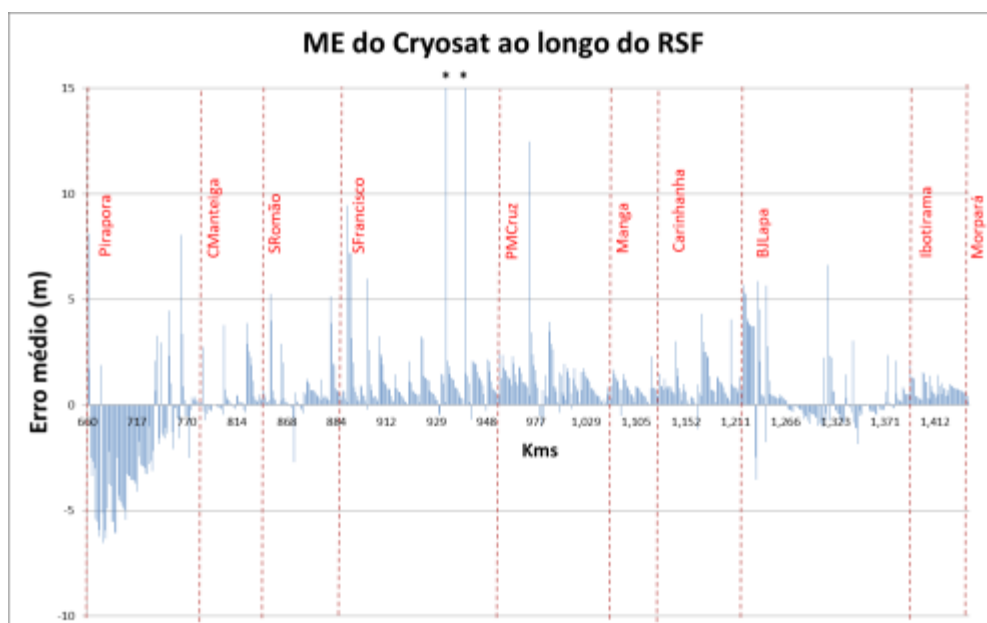
de Três Marias à foz do RSF (incluindo os reservatórios), ou seja, são 3528 pontos de dados ao longo de 10.2 anos (24/10/2010 a 31/12/2020) ou 10.1 ciclos do Cryosat (369 dias/ciclo), uma média de 346 pontos por ano ou 350 pontos por ciclo.

Para a validação absoluta aqui proposta, baseada na interpolação no tempo e espaço de dados *in situ*, só puderam ser utilizados os pontos de cruzamento situados entre duas EFs, portanto nos trechos entre a EF Pirapora e Morpará ou entre Juazeiro e Sta. M. Boa Vista. A validação se restringe também as datas em que há dados disponíveis nas EFs, sendo comum alguns períodos de falha. Considerando estes critérios de seleção, puderam ser validados a partir da ITE 850 pontos (ou EVs) do Cryosat, totalizando 84 EVs por ciclo do Cryosat. A Figura 4.23 apresenta a variação do ME ao longo do RSF e a Figura 4.24 o histograma de erros para o trecho de validação.

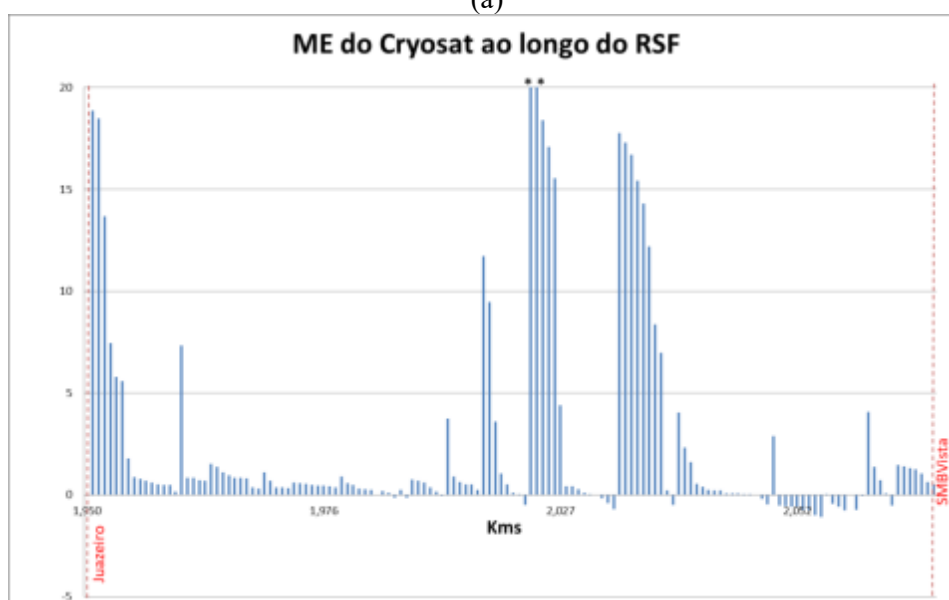
Considerando os *tracks* de um ciclo completo do Cryosat, obtém-se 430 potenciais EVs para todo o RSF (inclusive os reservatórios) e 117 EVs para o trecho de interesse da validação (Pirapora-Morpará e Juazeiro a Sta M. Boa Vista). Portanto o η_{eff} médio do Cryosat no período de estudo foi 81% para todo o RSF e 72% para o trecho de interesse, performance superior às missões Envisat-X e Saral, mas inferior a missão original Envisat, ao Jason e aos S-3 (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Taxa de eficiência amostral do Cryosat

	Período todo (2010-2020)		Por ciclo		η_{eff} (%)
	EVs potenciais	EVs válidas	EVs potenciais	EVs válidas	
Todo o RSF (inclusive lagos)	4336	3528	430	350	81%
Trecho de interesse	1180	850	117	84	72%



(a)



(b)

Figura 4.23 – Variação do ME para o Cryosat (a) entre as EFs Pirapora e CManteiga (b) entre as EFs Juazeiro e SMBVista (* 4 outliers superiores a 15m)

As EVs do Cryosat apresentaram ME negativo em 24,2% dos casos, concentrando-se nos trechos entre a EF Pirapora e Cachoeira da Manteiga e entre BJJLapa e Ibotirama. Em 64,4% das EVs o erro esteve entre -1,0 m e 1,0 m (Figura 4.24). Os trechos de erro absoluto abaixo de 0,20 m estão compreendidos entre a EF Bom Jesus da Lapa e Ibotirama, entre Juazeiro e Santa Maria da Boa Vista e entre a EF Cachoeira da Manteiga e São Romão. Os trechos de melhor performance coincidem com as demais missões, com exceção do segmento entre Juazeiro e Santa Maria da Boa Vista, onde o desempenho do Cryosat é misto (discussão a seguir).

Erros médios acima de 1,0 m e inferiores a 10 m foram averiguados em 27,2% das EVs, em sua maioria nos trechos entre Pirapora e Cachoeira da Manteiga (afetado pelas quedas) e com

15 EVs com erros acima de 10 m concentradas entre as EFs Juazeiro a Santa Maria da Boa Vista. Os quatro maiores erros são superiores a 20 m, sendo duas EVs próximas a PMCruz e duas entre Juazeiro e Santa Maria da Boa Vista. Esses dois trechos são caracterizados pelo fenômeno de perda de ancoragem, que afeta o Cryosat em algumas passagens.

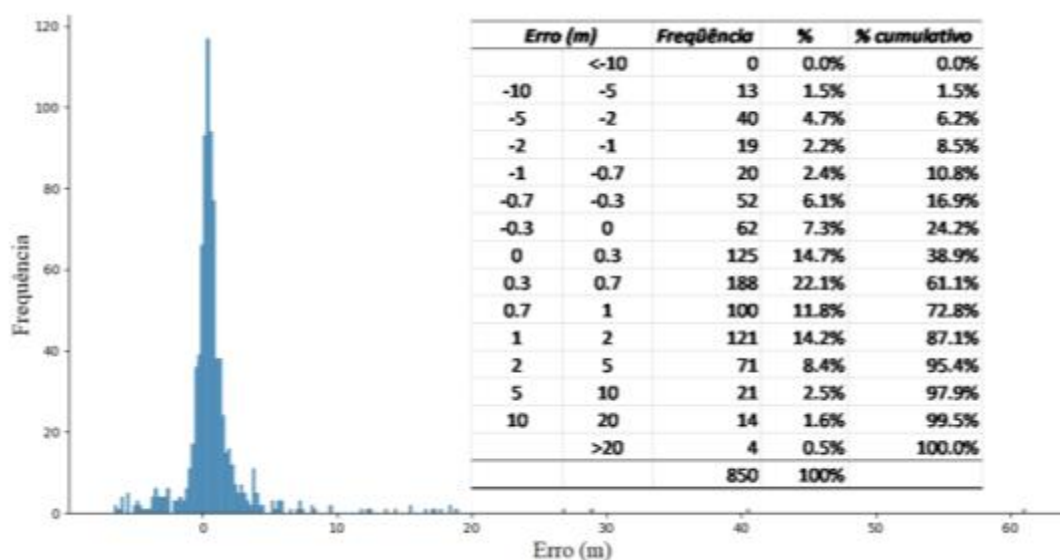


Figura 4.24 – Histograma dos erros médios das 850 EVs do Cryosat

A Tabela 4.12 apresenta as estatísticas de EVs localizadas a menos de 15 km das EFs. Nota-se que os valores de erros estão condizentes àqueles encontrados para os demais satélites, considerando EVs a menos de 15 km de EFs e a ITE como metodologia de produção de dados *in situ* (item 4.2 -Tabela 4.5). No caso da EF PMCruz, os dois outliers de ME superiores a 10 m são EVs a menos de 15 km e na Tabela 4.12 são apresentadas as estatísticas com e sem estes valores extremos.

Tabela 4.12 – Estatísticas médias das EVs do Cryosat a menos de 15 km das EFs e dos demais satélites para comparação (*desconsiderando 2 outliers de PMCruz)

Trecho	Km	N EVs		ME (m)	AME (m)	RMSE (m)	R
		Total	Validação (ITE)				
<i>Todo o RSF</i>	-	3528	850	0,95	1,62	3,98	0,99
<i>EVs a 15 km das EFs</i>							
Pirapora	666	14	6	-0,29	3,56	4,13	0,05
CManteiga	780	26	25	0,35	1,02	1,96	0,61
SRomao	821	30	30	0,64	0,70	1,19	0,67
SFrancisco	884	57	51	1,22	1,24	2,30	0,35
PMCruz	952	59	53	3,00	3,04	10,17	0,35
PMCruz*	952	57	51	1,13	1,16	1,33	0,93
Manga	1070	12	7	1,00	1,14	1,20	0,92
Carinhonha	1124	32	20	0,88	0,88	0,96	0,98
BJLapa	1253	26	22	0,75	0,91	1,52	0,78

Trecho	Km	N EVs		ME (m)	AME (m)	RMSE (m)	R
		Total	Validação (ITE)				
Ibotirama	1393	37	33	0,62	0,64	0,84	0,91
Morpará	1476	38	33	0,60	0,60	0,64	0,97
Juazeiro	1952	70	54	2,94	2,94	5,17	0,34
SMBVista	2079	50	15	0,83	1,01	1,39	0,20
<i>EVs a 15 km das EFs dos demais satélites</i>		-	33	4,00	4,11	4,49	0,63

O comportamento dos erros do Cryosat ao longo do RSF para as EVs próximas a EFs (distância <15 km) foi semelhante aos demais satélites, confirmando que as características ambientais dos trechos impactam a performance de diferentes missões, até mesmo do Cryosat que se distingue dos demais devido suas configurações de órbita.

Ressalva deve ser feita ao trecho Juazeiro a SMBVista, que concentra 25 EVs com erros pequenos (AME < 0,20 m) e 15 EVs com AME superior a 10 m. Algumas das EVs com melhores resultados se localizam próximas, num mesmo trecho de características ambientais, que EVs com resultados ruins (Tabela 4.13). Não foi possível detectar nenhum padrão de associação dos erros a data, órbitas ascendentes/descendentes ou ponto da EV, sendo a variação dos resultados atribuídos à operação do *retracker*.

Tabela 4.13 – ME e AME discrepantes para algumas EVs entre Juazeiro e SMBVista

Data - hora	Km no RSF	Nível d'água		ME (m)	AME (m)
		EV	In situ (ITE)		
02/11/2016 18:39	2027	338.06	338.24	-0.18	0.18
19/10/2011 13:56	2027	339.85	339.75	0.10	0.10
28/10/2014 07:10	2027	338.48	338.51	-0.03	0.03
12/11/2019 11:53	2027	338.63	338.62	0.01	0.01
29/01/2018 20:11	2033	336.61	337.32	-0.71	0.71
23/09/2015 02:51	2036	355.14	337.37	17.78	17.78
05/10/2019 01:50	2036	354.89	337.58	17.31	17.31
28/09/2017 14:20	2036	353.68	336.98	16.70	16.70
02/02/2019 01:56	2036	352.84	337.41	15.43	15.43
25/09/2016 08:36	2036	351.56	337.25	14.31	14.31
19/09/2014 21:06	2036	349.66	337.47	12.20	12.20

4.6 Estimativa de viés

A Tabela 4.14 apresenta os vieses estimados por missão. Para cada satélite, foram selecionadas as EVs situadas a menos de 15 km de uma das EFs niveladas, então o viés médio foi obtido a partir da média dos erros médios dessas EVs (Equação 3.7). A Tabela 4.14 apresenta também o valor mínimo e máximo obtido para o erro médio e o número de EFs e EVs utilizadas para cada satélite, pois há dados dos satélites nas proximidades (até 15 km) de apenas algumas das

12 EFs niveladas (com exceção do Cryosat que possui EVs próximas a todas EFs). Os *outliers* foram mantidos para cálculo das médias, uma vez que são representativos do funcionamento e performance dos altímetros de forma sistemática. Entretanto, no caso do Saral, das seis EFs possíveis duas foram descartadas, pois ocorre o fenômeno de perda de ancoragem ocasionando *outliers* próximos a 50 m. Utilizar esses valores de desvio na estimativa de viés seria inadequado, pois se trata de um fenômeno pontual, não sistemático.

Tabela 4.14 – Vieses estimados por missão para o RSF

Missão	Nº de EFs	Nº de EVs	Viés (m) Amplitude (m)		
			Médio	Mínimo	Máximo
Cryosat	12	348	0,96±0,97	-0,29	3,00
Envisat	3	6	1,62±0,54	1,16	2,53
Envisat-X	3	5	1,73±1,04	0,94	3,55
Jason 2	4	5	1,73±0,47	1,21	2,38
Jason 3	4	5	1,33±0,40	1,01	1,90
S-3A	4	4	0,83±1,42	-0,12	2,94
S-3B	2	2	0,48±0,56	0,08	0,87
Saral	3	4	0,82±0,55	0,37	1,61

Os vieses médios são todos positivos, corroborando com os valores encontrados na literatura por Calmant *et al.* (2013) para o Envisat no Rio Amazonas (1,044±0,212 m) e por Tourian *et al.* (2016) para diversos satélites no Rio Po (0,42 a 0,55 m), exceto o Cryosat para o qual o viés encontrado foi negativo (-1,19±0,05 m). O viés positivo indica uma tendência dos dados de AS superestimarem os níveis d'água. Apenas duas EVs dentre todas utilizadas nas estimativas de viés apresentaram erro médio negativo, uma é do Cryosat nas proximidades da EF Pirapora e a outra do S-3A perto da EF Carinhanha. Em termos absolutos, os vieses encontrados são um pouco superiores aos encontrados em rios (Calmant *et al.* (2013) e Tourian *et al.* (2016)) e significativamente superiores aos encontrados em lagos e oceanos (Tabela 2.4), bem como apresentam grande amplitude o que decorre de uma série de fatores conforme exposto:

- Diferenças na forma de onda do radar altimétrico num lago ou oceano (superfície especular) e num rio (mais turbulência);
- A largura inferior a 1 km do RSF contribui para contaminação das formas de onda com ecos de superfícies que não sejam água;
- Conforme Calmant *et al.* (2013), a influência do ambiente incluído na pegada do radar na forma de onda, provavelmente contribui para produzir um *shift* sistemático no posicionamento do tempo de viagem bidirecional, no eixo do tempo da distribuição de

energia para uma dada EV. Como o ambiente muda de uma EV para outra, isso explica a grande variação de valores de viés encontrados (parcela de precisão elevada);

- Erros nos modelos disponíveis nos dados de AS para correção do *range*, especialmente para o termo *wet* (pressão atmosférica) na Equação 2.1 (Calmant e Seyler, 2006; Crétaux *et al.*, 2018).
- Erros devido à qualidade dos dados de nível d'água utilizados na validação, por dois motivos. Primeiro porque a série de dados das EFs podem apresentar erros diversos (aqui já discutidos e que se tentou corrigir com a consistência mas podem persistir) e pode haver erros no cálculo da altitude absoluta do zero da régua. A segunda razão é em decorrência da interpolação linear dos dados das EFs, que mesmo numa distância pequena pode carregar erros para estimativa de viés.

Os vieses encontrados são representativos do RSF, pois conforme exposto as formas de onda são produzidas em função das características das EVs, inclusive da largura do rio. As correções aplicadas aos dados derivam de modelos variáveis conforme a localização do ponto, assim também contribuem para especificidade dos vieses observados. Contudo, certamente os valores aqui obtidos se aproximam mais de vieses esperados para cursos d'água de pequeno e médio porte do que os vieses encontrados na literatura para lagos, oceanos ou rios de grande porte, especialmente se as características ambientais das EVs forem similares as do RSF.

Os vieses obtidos foram subtraídos das séries altimétricas para cada missão. Essas séries livres de vieses foram utilizadas na obtenção de declividade apresentada no item 4.7.

4.7 Declividade da linha d'água

4.7.1 Análise dos modelos geoidais

As séries de nível das EFs, de 2002 a 2020, foram ajustadas com os modelos de ondulação geoidal EGM96 e EGM08, Mapgeo2015, EIGEN-6C4 e XGM2019. A Figura 4.25 apresenta o perfil longitudinal para o trecho de interesse com os valores médios dos níveis em cada EF. A diferença entre os dados sem geóide (referenciados no elipsoide) e os modelos geoidais, corresponde à ondulação geoidal, que oscila entre -12,20 m e -14,73 m para o trecho em estudo. A melhor identificação das diferenças entre os modelos pode ser feita através do perfil de declividades da linha d'água, apresentado na Figura 4.26. Dentre os modelos geoidais não há diferença significativa, com exceção do EGM96 que apresenta valores mais elevados em quase todo o trecho. Considerando a similaridade dos modelos geoidais, optou-se pela adoção do

Mapgeo2015, por se tratar de um modelo brasileiro calculado com cerca de 950.000 estações gravimétricas terrestres na América do Sul, sendo 450.000 dentro do Brasil. Assim, os perfis de linha d'água e declividades abordadas a seguir utilizam o Mapgeo2015 como geóide de referência.

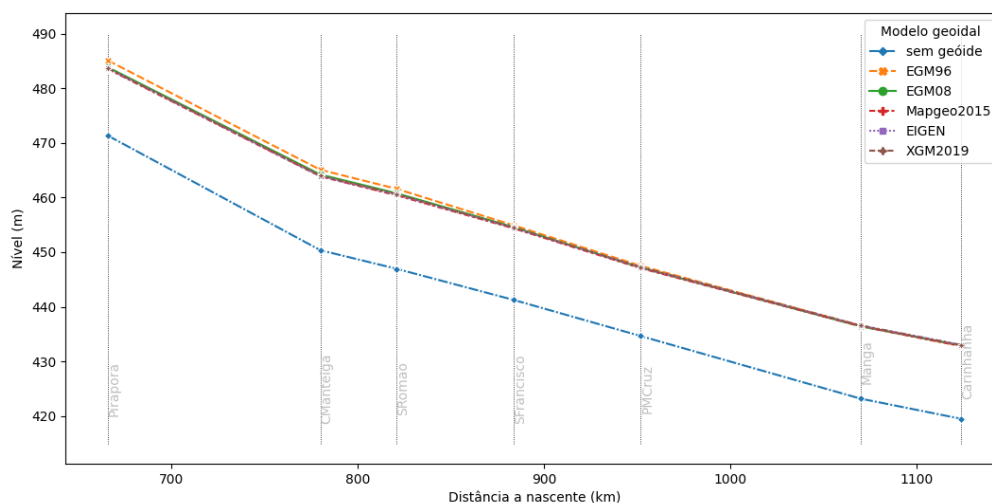


Figura 4.25 – Perfil longitudinal do RSF para diferentes modelos geoidais no trecho entre as EFs Pirapora e Carinhanha para as médias de nível d'água de 2002 a 2020

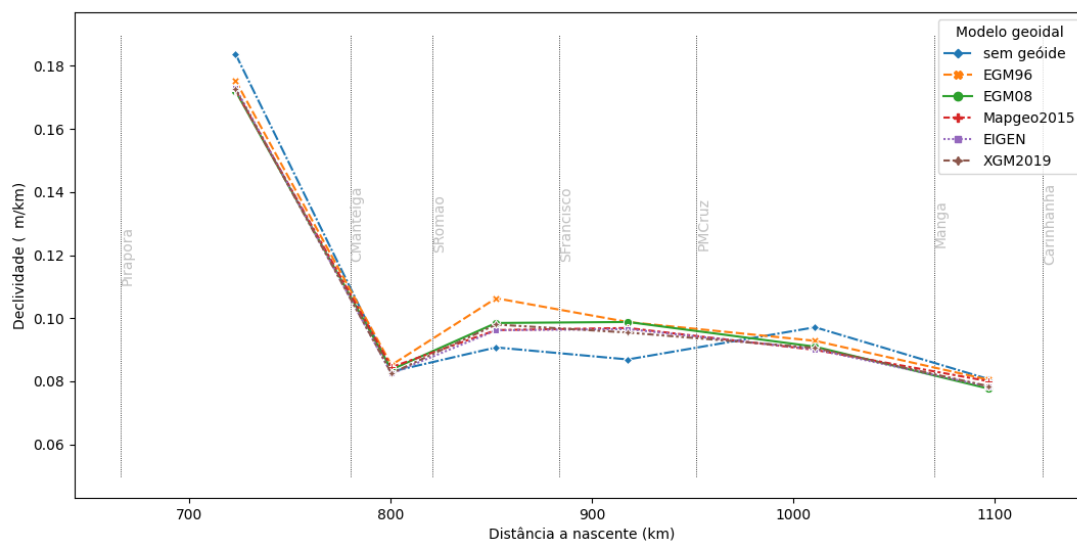


Figura 4.26 – Perfil de declividades da linha d'água do RSF para diferentes modelos geoidais no trecho entre as EFs Pirapora e Carinhanha para as declividades médias do período de 2002 a 2020

4.7.2 Declividade com dados das EFs

As declividades diárias entre as EF Pirapora e Carinhanha foram calculadas e plotadas por ano hidrológico, com distinção entre período seco e chuvoso, totalizando 18 perfis completos apresentados no Apêndice 4. A Figura 4.27 apresenta quatro destes perfis, compreendendo o

ano de maior cheia do período em análise (2006-2007), o de estiagem mais intensa (2014-2015), o primeiro (2001-2002) e último (2018-2019) ano completo da série. De maneira geral, as declividades são maiores no período seco para o trecho entre Pirapora e PMCruz, e a partir desta EF as declividades são maiores no período chuvoso. No ano de maior cheia (2006-2007) a dispersão de declividades no período chuvoso é mais significativa, especialmente entre Pirapora e São Romão. Este trecho está logo à jusante reservatório de Três Marias e com o aumento das defluências em períodos de cheia os cotogramas e declividades são mais impactados nestas EFs, atenuando à medida que a onda de cheia se propaga pelo RSF. No ano em que a estiagem foi mais severa (2014-2015) houve uma oscilação maior das declividades, sobretudo após a PMCruz.

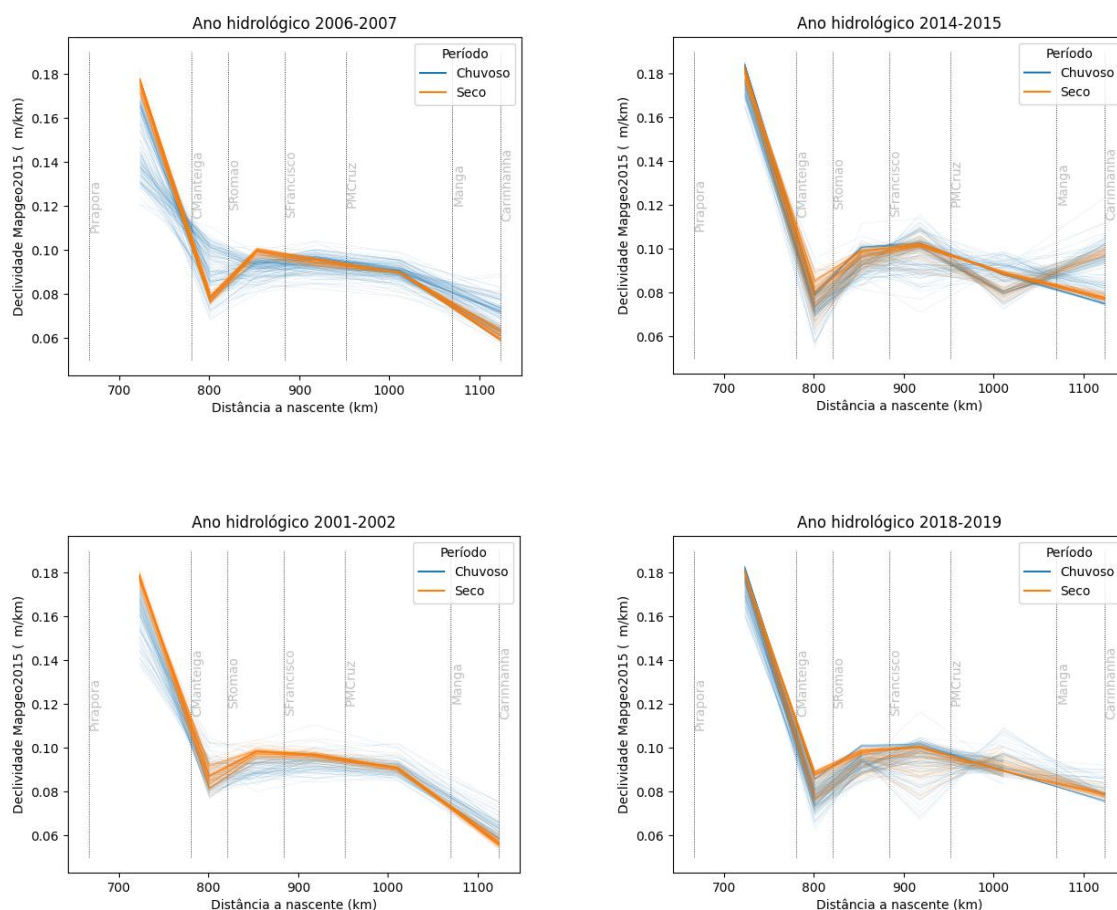


Figura 4.27 – Perfis diários de declividades da linha d'água do RSF para alguns anos hidrológicos

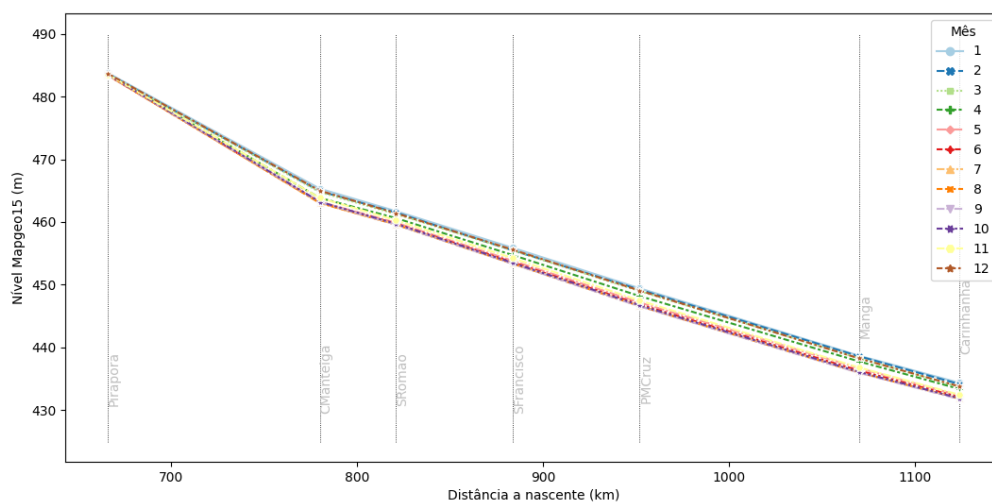
Para cada mês do ano foi calculada a cota característica em cada EF, então foram obtidos os perfis e declividades mensais, bem como para os períodos seco e chuvoso (Figura 4.28, Figura 4.29 e Tabela 4.15). Para o período em análise (2002-2020), janeiro é o mês de maiores cotas em todas as EFs, seguido de dezembro ou fevereiro, que se revezam como segundo mês de maiores cotas. Dentre os outros meses do período chuvoso, março apresenta cotas mais altas,

novembro tem cotas medianas e outubro cotas próximas aos meses de estiagem. Os meses mais secos são maio na EF Pirapora, julho em CManteiga e setembro nas demais EFs. Para os outros meses da estiagem, junho e agosto exibiram cotas mais baixas e abril cotas medianas.

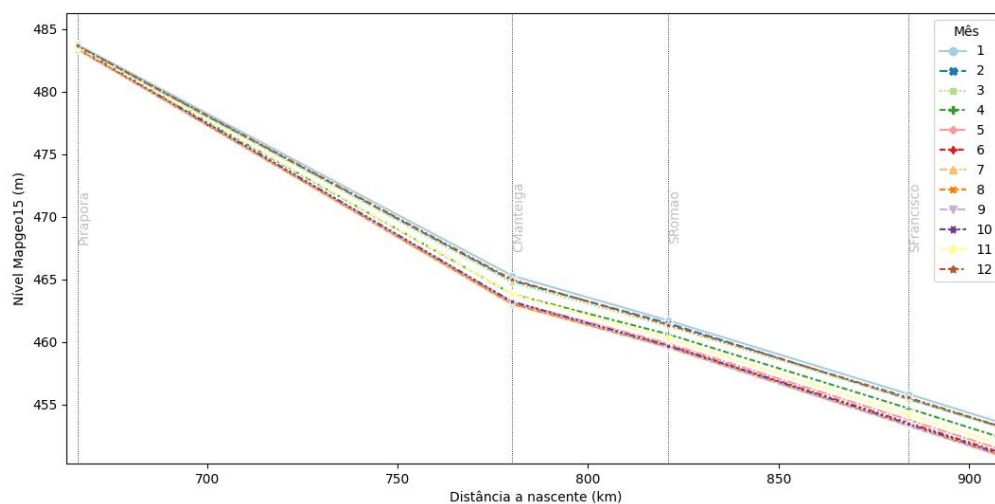
A Tabela 4.15 aponta que as alterações na declividade ao longo dos meses são pequenas, variando entre 4% e 11%. O trecho entre as EFs Pirapora e Cachoeira da Manteiga apresenta as maiores declividades, cerca do dobro das demais, o que era esperado em decorrência das corredeiras existentes e por se tratar da porção final da região do Alto RSF, onde as declividades da bacia são superiores. O trecho de menor declividade está entre a EF Manga e Carinhanha, aproximadamente na metade do Médio RSF, com declividades em torno de 0,10 m/km, condizentes com valores mencionados na literatura (ANA, 2003).

Na Figura 4.29 confirma-se o que foi identificado nos gráficos diários por ano hidrológico (Figura 4.27 e Apêndice 4) as declividades são maiores no período seco para o trecho entre Pirapora e CManteiga e SRomão a PMCruz, e maiores no período chuvoso, entre CManteiga e São Romão e a jusante de PMCruz. Conclui-se que as declividades são maiores no período chuvoso para os trechos de menor declividade média, ou seja, entre CManteiga e São Romão e entre PMCruz e Carinhanha.

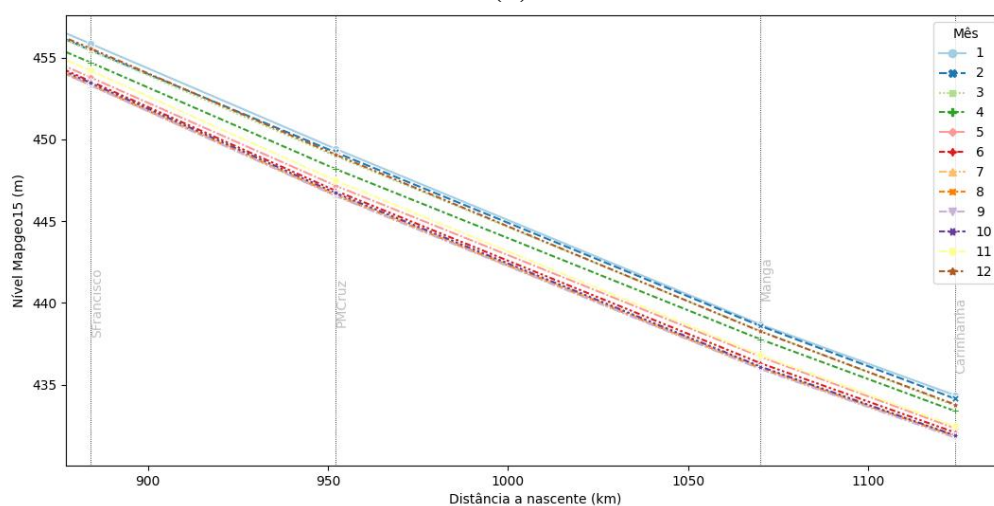
As alterações de declividade podem ocorrer devido a efeitos de remanso, alteração da seção de controle, alteração do regime de escoamento, transbordamento do fluxo para além da calha principal, podendo passar a incluir lagos marginais alterando significativamente o coeficiente de Manning do escoamento, etc..



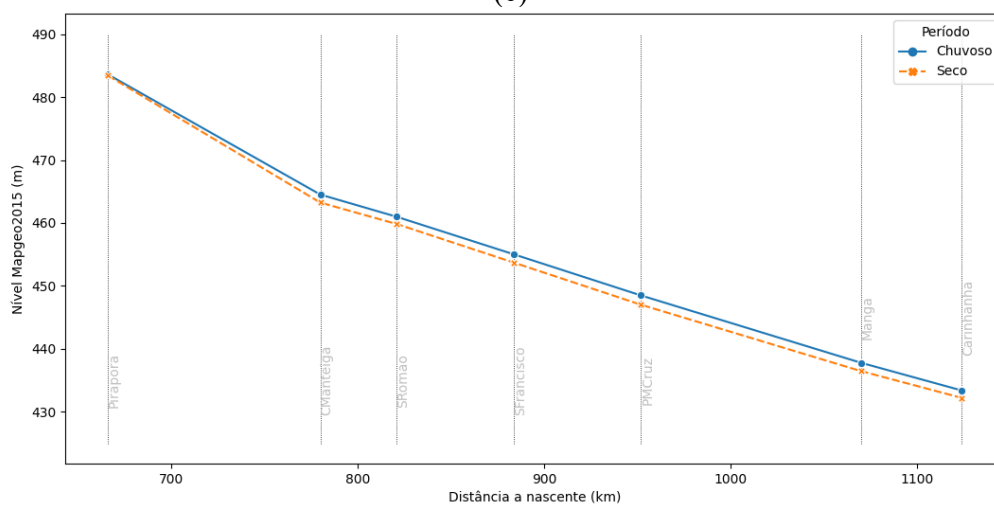
(a)



(b)

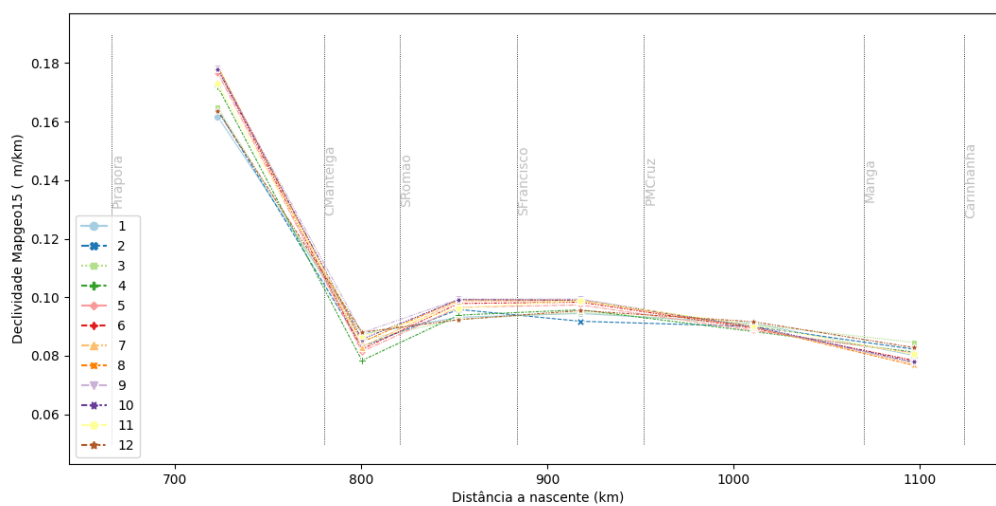


(c)

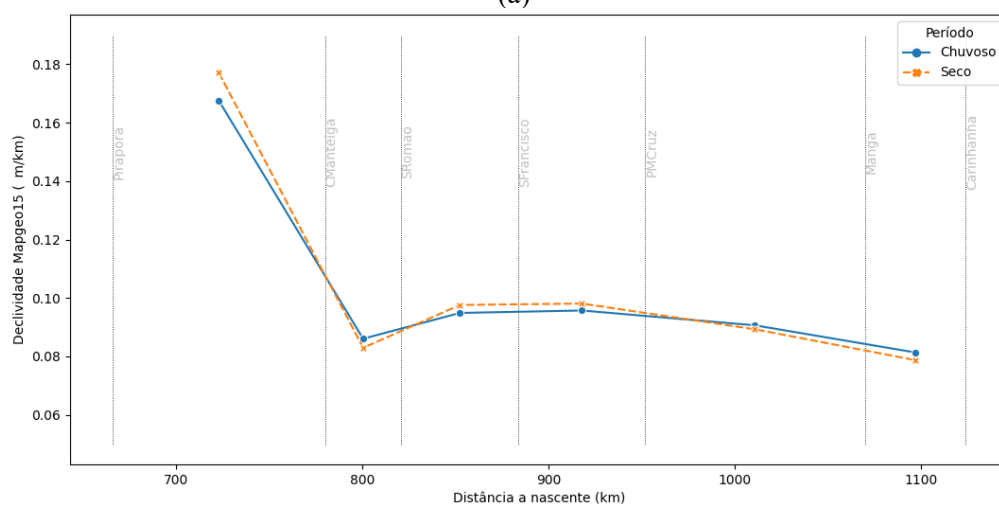


(d)

Figura 4.28 – Perfis de linha d'água do RSF a partir de cotas altimétricas *in situ* no trecho da EF Pirapora a EF Carinhanha (a) Médias mensais (2002 a 2020) (b) Médias mensais - detalhe da EF Pirapora a EF São Francisco (c) Médias mensais - detalhe da EF São Francisco a EF Carinhanha (d) Médias do período seco e chuvoso



(a)



(b)

Figura 4.29 – Perfis de declividade linha d'água do RSF a partir de cotas altimétricas *in situ* no trecho da EF Pirapora a EF Carinhanha para o período de 2002 a 2020 (a) Por mês (b) Para o período seco e chuvoso

Tabela 4.15 – Declividades médias mensais por trecho estudado no RSF obtidas a partir de dados das EFs (vermelho indica declividades mais elevadas e verde mais baixas)

Trecho	Pirapora - CManteiga	CManteiga- SRomao	SRomao- SFrancisco	SFrancisco- PMCruz	PMCruz- Manga	Manga- Carinhanha	
Extensão (km)	114	41	63	68	118	54	
Meses	1	0.162	0.087	0.093	0.094	0.091	0.080
	2	0.164	0.083	0.096	0.092	0.090	0.082
	3	0.165	0.085	0.092	0.095	0.091	0.085
	4	0.172	0.078	0.094	0.096	0.088	0.081
	5	0.177	0.081	0.097	0.097	0.089	0.081
	6	0.178	0.082	0.098	0.098	0.089	0.078
	7	0.179	0.083	0.099	0.099	0.090	0.077
	8	0.179	0.085	0.099	0.099	0.090	0.077
	9	0.178	0.088	0.099	0.099	0.090	0.078
	10	0.178	0.086	0.099	0.099	0.090	0.078
	11	0.173	0.087	0.096	0.099	0.090	0.081
	12	0.164	0.088	0.092	0.095	0.092	0.083
<i>Média geral</i>	0.172	0.085	0.096	0.097	0.090	0.080	
<i>Período seco</i>	0.177	0.083	0.098	0.098	0.089	0.079	
<i>Período chuvoso</i>	0.168	0.086	0.095	0.096	0.091	0.081	
<i>Mínimo</i>	0.162	0.078	0.092	0.092	0.088	0.077	
<i>Máximo</i>	0.179	0.088	0.099	0.099	0.092	0.085	
<i>Amplitude</i>	0.017	0.010	0.007	0.008	0.003	0.008	
<i>Amplitude/média(%)</i>	10%	11%	7%	8%	4%	10%	

4.7.3 Declividade com dados das EVs

Dados das EVs utilizados

As séries dos satélites tiveram seus vieses removidos e foram ajustadas com a ondulação geoidal do MAPGEO2015. Para os satélites de órbita fixa, no trecho e período em análise, foram obtidos 2677 pontos em 41 EVs, dos quais 125 pontos (4,7% ou 3 EVs) apresentavam erro médio absoluto (AME) superior a 5 m e foram desconsiderados. Para o satélite Cryosat foram obtidos 463 pontos, dos quais 25 (5,4%) apresentaram erro superior a 5 m e foram removidos. A Figura 4.30 apresenta este total de 2990 dados de nível válidos de satélites, para o trecho de interesse no período de 2002 a 2020, bem como as respectivas cotas *in situ* interpoladas pelo método ITE e o perfil para período seco e chuvoso obtido com dados das EFs. Os pontos com a mesma localização se referem a passagens de um mesmo satélite em datas (ciclos) diferentes ou, em algumas situações, são diferentes satélites com EVs coincidentes. Fazendo uma média geral das EVs para os períodos seco e chuvoso, obtém-se perfis próximos aos das EFs (Figura 4.31), porém com maior refinamento nos trechos entre as estações, graças a maior cobertura espacial das missões.

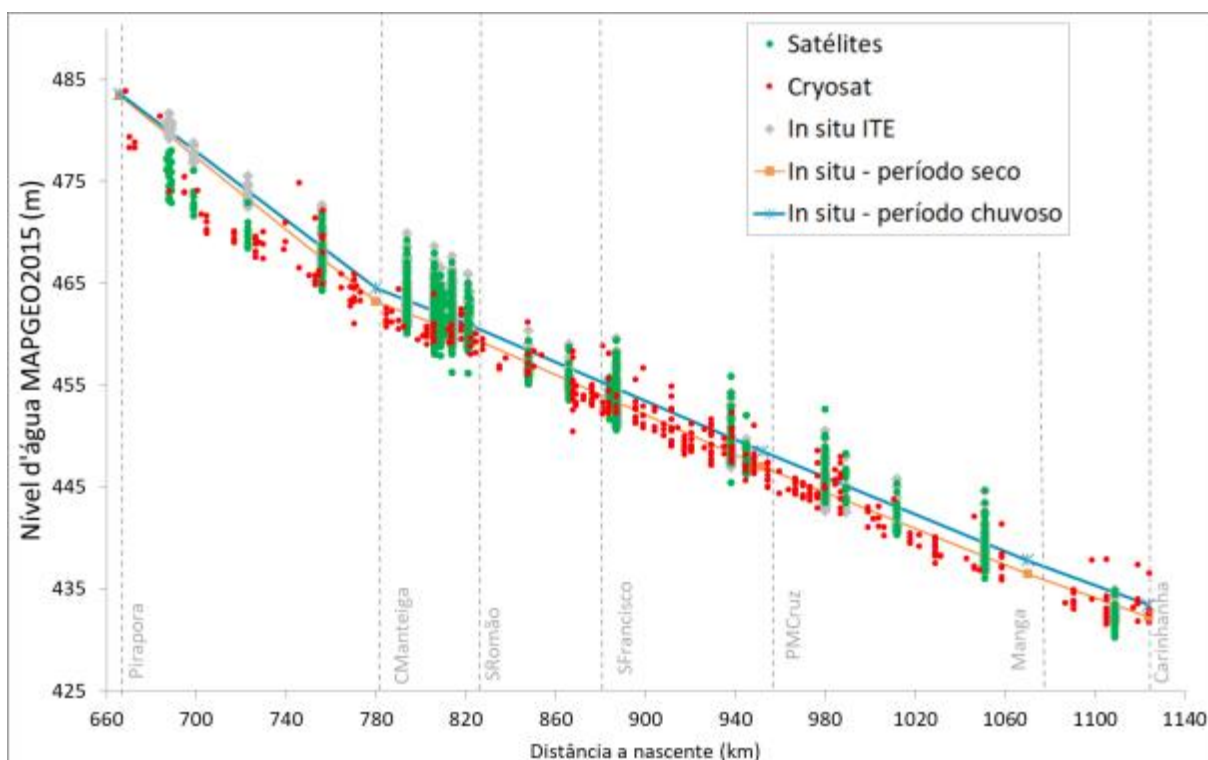


Figura 4.30 – Dados de satélite disponíveis e dados de EFs (interpolados pela ITE e médios para período seco/chuvoso) ao longo do RSF para o período de 2002 a 2020

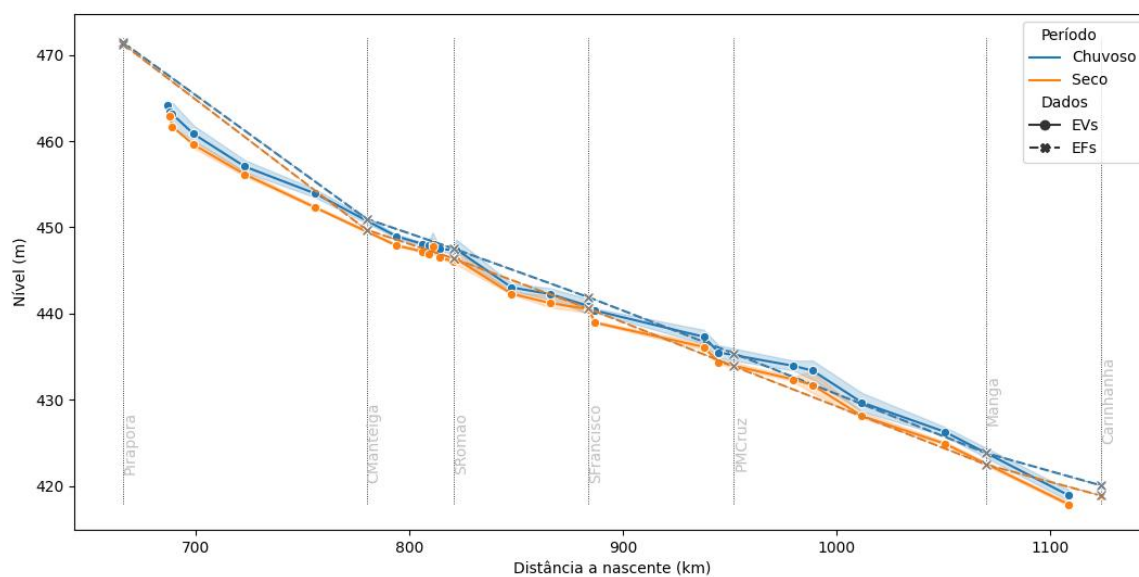
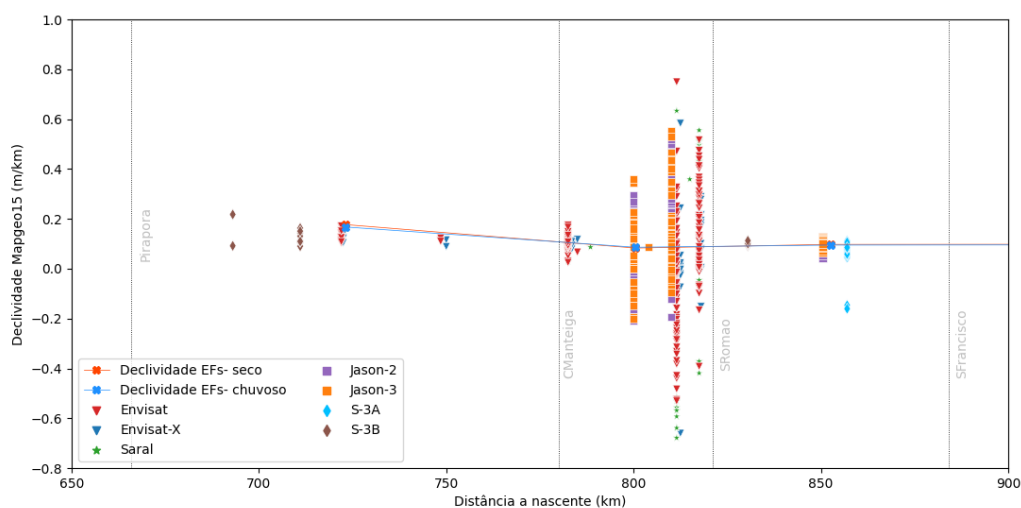


Figura 4.31 – Perfil da linha d'água para o período seco e chuvoso a partir de dados de todas as EVs versus EFs

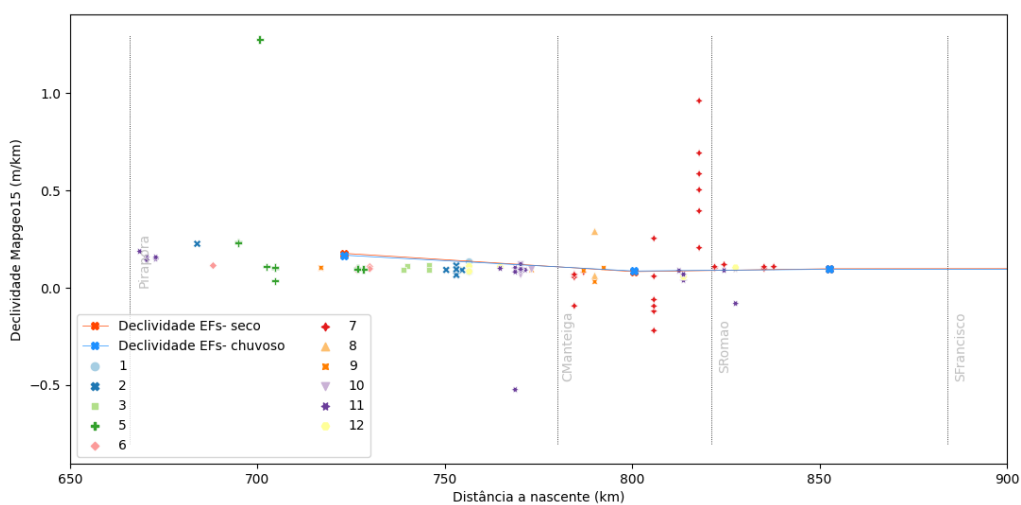
Declividades em dias de passagem do satélite

Para cálculo das declividades, inicialmente cada missão foi analisada em separado, para avaliar a possibilidade de obtenção da declividade da linha d'água naqueles dias em que o satélite cruza o rio, em diferentes pontos, numa mesma passagem. Todas as missões aqui utilizadas apresentaram essa potencialidade no trecho entre a EF Pirapora a EF São Francisco, entretanto

boa parte dos pares de pontos resultou em declividades negativas ou valores incoerentes de declividade para o trecho em análise (Figura 4.32 e Tabela 4.16). Os satélites Envisat, Saral e Jason-3 apresentaram os piores resultados e a missão Sentinel-3 os melhores. No caso do Cryosat, a maior parte dos valores anômalos ocorreu no mês de julho, quando as águas estão baixas e as margens mais expostas, comprometendo o desempenho de altímetros que operam em modo de baixa resolução e tem um grande *footprint*, como o Cryosat no RSF.



(a)



(b)

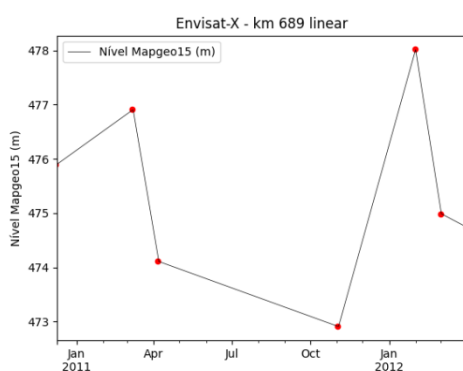
Figura 4.32 – Valores de declividade diárias a partir de EVs dos satélites (a) Missões de órbita fixa (b) Satélite Cryosat

Tabela 4.16 – Informações sobre as EVs utilizadas no cálculo das declividades diárias por satélite

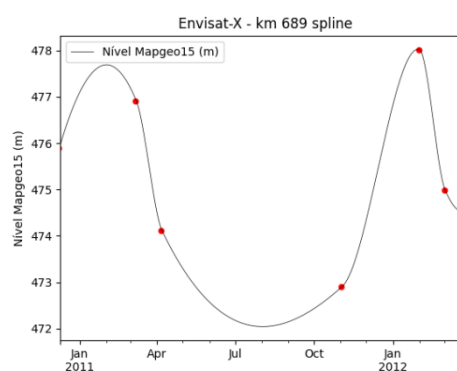
<i>Satélite</i>	<i>Nº EVs</i>	<i>Nº passagens pela EV no período (ciclos)</i>	<i>Distância média entre EVs (km)</i>	<i>Número de declividades negativas</i>
Cryosat	160	1	2	7
Envisat	5	89	33	62
Envisat-X	5	19	33	7
Saral	5	35	33	13
Jason-2	4	293	31	72
Jason-3	4	166	31	49
S-3A	2	59	18	2
S-3B	4	25	84	0

Interpolação dos dados das EVs para nível diário

Apesar do ganho em resolução espacial obtido com as EVs, a acurácia dos dados de satélite, na maior parte das vezes, não permitiu uma estimativa adequada da declividade da linha d'água a nível diário. Outra limitação decorre da baixa resolução temporal, que inviabiliza a obtenção de perfis num dado dia ou período, mesmo numa abordagem multimissão. Nesse sentido, foi realizada a interpolação das séries de cada satélite pelos métodos linear e spline Akima. Na Figura 4.33 nota-se que a interpolação com a spline de Akima proporciona séries mais suavizadas, próximas do que é averiguado nos cotogramas, especialmente nas EVs em que há poucos dados disponíveis. Assim, foram utilizadas as splines de Akima para interpolação dos dados das EVs para nível diário e cálculo das médias mensais por EV.



(a)



(b)

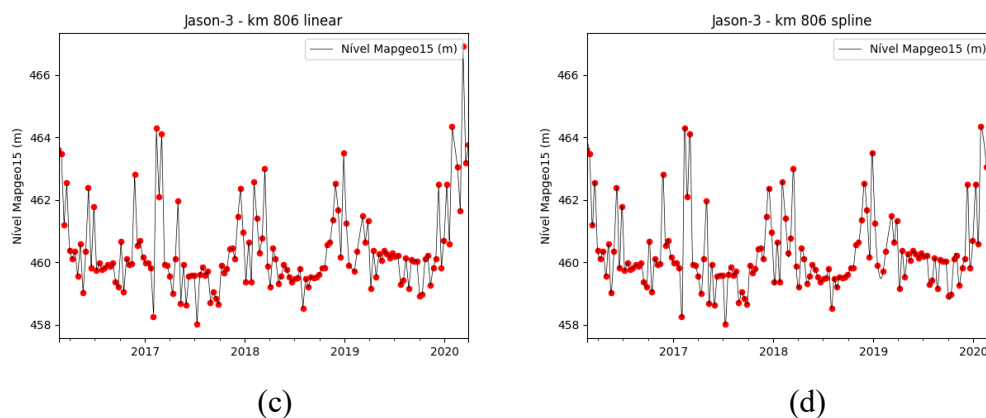


Figura 4.33 – Interpolação dos dados originais das EVs (pontos vermelhos) para o nível diário (linha preta contínua) (a) Interpolação linear - Envisat-X km 689 (b) Interpolação spline de Akima - Envisat-X km 689 (c) Interpolação linear - Jason-3 km 806 (d) Interpolação spline de Akima - Jason-3 km 806

De posse dos níveis médios mensais multimissão, as declividades foram calculadas considerando a distância entre todas as EVs disponíveis. Para as declividades mensais obtidas dessa forma, há uma melhora em relação às declividades obtidas em dias de passagem por satélites anteriormente calculadas, contudo ainda aparecem valores de declividade mensais anômalos, inclusive negativos (Figura 4.34).

A declividade obtida com os dados de EVs representa mais adequadamente o trecho de quedas à jusante da EF Pirapora do que os dados das EFs, sendo caracterizado por declividade mais elevadas no trecho das quedas, seguido de valores mais amenos. Em alguns trechos e, especialmente nas proximidades da EF SRomão, diferentes satélites cruzam o rio algumas vezes em poucos quilômetros, devido a existência de meandros. Em situações assim, a proximidade dos dados capturados resulta numa resolução espacial superior à própria acurácia do satélite, podendo acarretar dados espúrios. No caso da EF SRomão por exemplo, são três cruzamentos em menos de 10 km. Considerando a declividade média de 9 cm/km (Tabela 4.15), obtém-se um desnível total de aproximadamente 0,90 m, ou 0,45 m a cada cruzamento, valor superior a acurácia de alguns satélites.

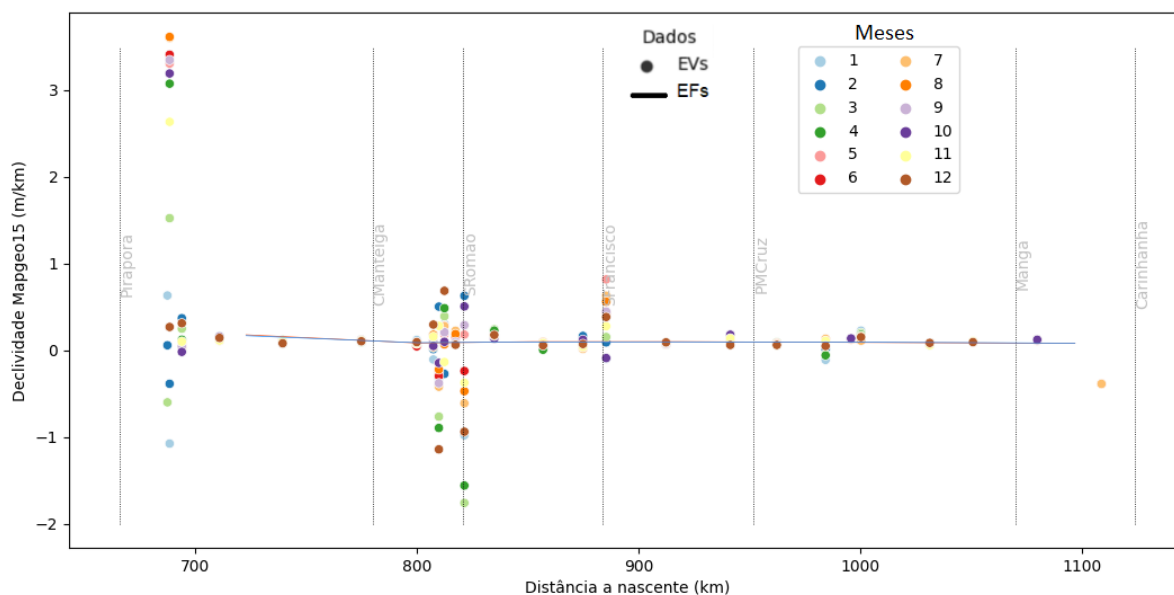


Figura 4.34 – Valores de declividade mensais a partir de dados das EVs interpolados para nível diário. Desconsiderando valores negativos e acima de 1,0 m/km, obtém-se o perfil de declividades mensais a seguir (Figura 4.35). Nota-se que de maneira geral os valores das EVs são compatíveis aos das EFs (linhas pretas), mas em alguns trechos/meses há uma diferença significativa, que pode decorrer da baixa acurácia do satélite para segmentos de poucos quilômetros ou refletir uma condição real, como se acredita para o trecho entre Pirapora e CManteiga.

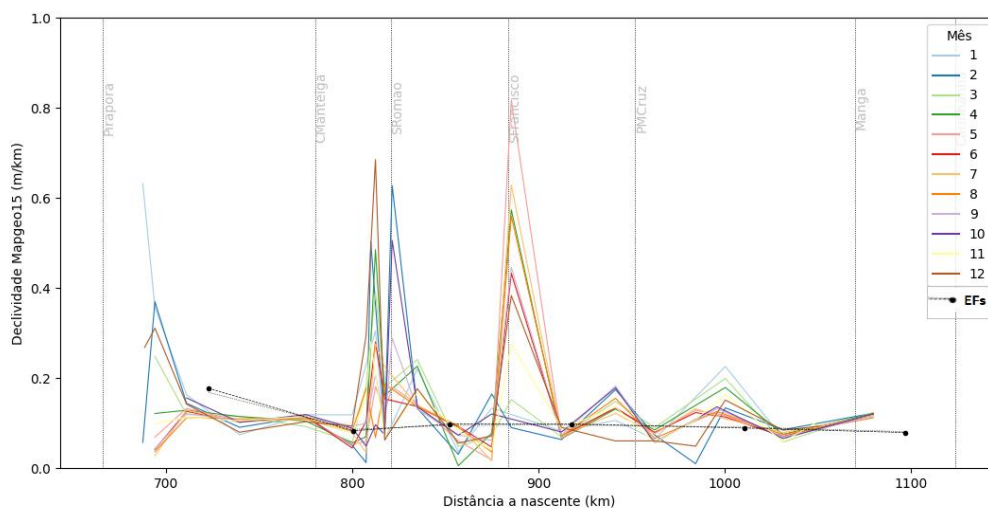


Figura 4.35 – Perfis de declividade mensais a partir de dados das EVs interpolados para nível diário sem outliers

Como o satélite Cryosat não permite a obtenção de séries de nível num mesmo ponto, não é viável aplicar a interpolação de dados de EV para nível diário. Por outro lado, a elevada resolução espacial permite a obtenção do perfil da linha d'água para o período chuvoso e seco com resultados mais próximos aos dados das EVs do que o SRTM (Figura 4.36).

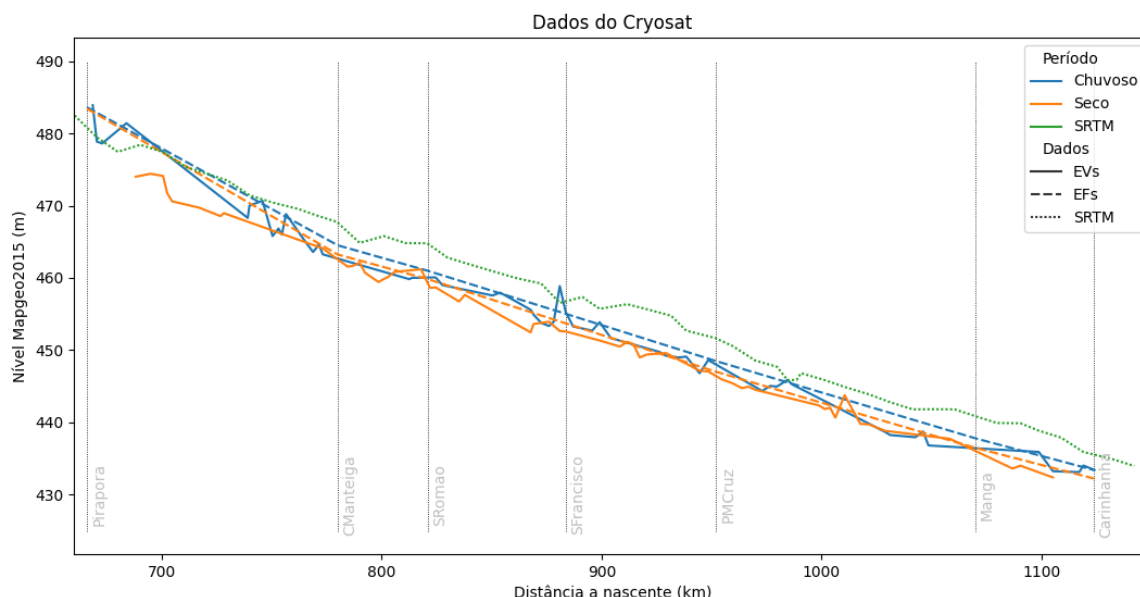


Figura 4.36 – Perfil da linha d’água com dados do Cryosat para período seco e período chuvoso

4.7.4 Modelo de declividades a partir de dados de EVs e EFs

Utilizando as etapas descritas no item 3.5.3 foram construídos os perfis de declividade para as diferentes opções de janela espacial, de sobreposição e regressão, sendo consideradas duas opções de escalas temporais: a mensal e por período do ano hidrológico (seco/chuvoso) (Tabela 4.17).

Tabela 4.17 – Opções de seleção e análise dos dados testadas para o modelo de declividades

<i>Escala temporal das declividades</i>	<i>Janela espacial de seleção (km)</i>	<i>Opções de sobreposição</i>	<i>Opções de regressão dos dados</i>
Mensal	100, 50, 25	0%, 25%, 50%	RL
Períodos seco/chuvoso	100, 50, 25, 10	0%, 25%, 50%	RL, RP1, RP2

A combinação dos valores das janelas espaciais de seleção às diferentes opções de sobreposição gera resoluções espaciais variadas para os perfis de declividade, conforme Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Resoluções espaciais dos perfis de declividade

<i>Janela espacial de seleção (km)</i>	<i>Opções de sobreposição</i>		
	<i>0%</i>	<i>25%</i>	<i>50%</i>
	Resoluções espaciais (km)		
<i>100</i>	100	75	50
<i>50</i>	50	37.5	25
<i>25</i>	25	18.75	12.5
<i>10</i>	10	7.5	5

A análise foi iniciada pela maior janela espacial (100 km) em direção a menor, procurando definir o limite razoável para resolução do modelo de declividades, pois à medida que menos dados são selecionados aumentam as chances de surgirem valores espúrios. Para avaliação dos resultados observou-se a coerência das declividades obtidas, a existência de valores anômalos (negativos ou maiores que 0,5m/km) e a disponibilidade de dados para as janelas analisadas.

Declividades mensais

Ao filtrar os dados por mês, limita-se a quantidade de pontos disponíveis para cada trecho, o que vai se agravando à medida que se reduz a janela espacial. Para a janela de 100 km há uma quantidade significativa de dados em cada trecho de análise, como exemplificado na Figura 4.37 para o mês 1, sem sobreposição de dados. Para este mesmo mês, nas janelas de 50 km (sem sobreposição), há trechos com quatro ou cinco pontos apenas (Figura 4.38 a, b, d g, h e i). Para a janela de 25 km (sem sobreposição), 47% dos trechos não tiveram dados suficientes para realizar a regressão linear (apenas um ponto, ou dois ou três com a mesma localização). Assim, a janela de 10 km resultaria num percentual ainda mais significativo de trechos sem dados, portanto não foi realizada a análise mensal para esse intervalo espacial.

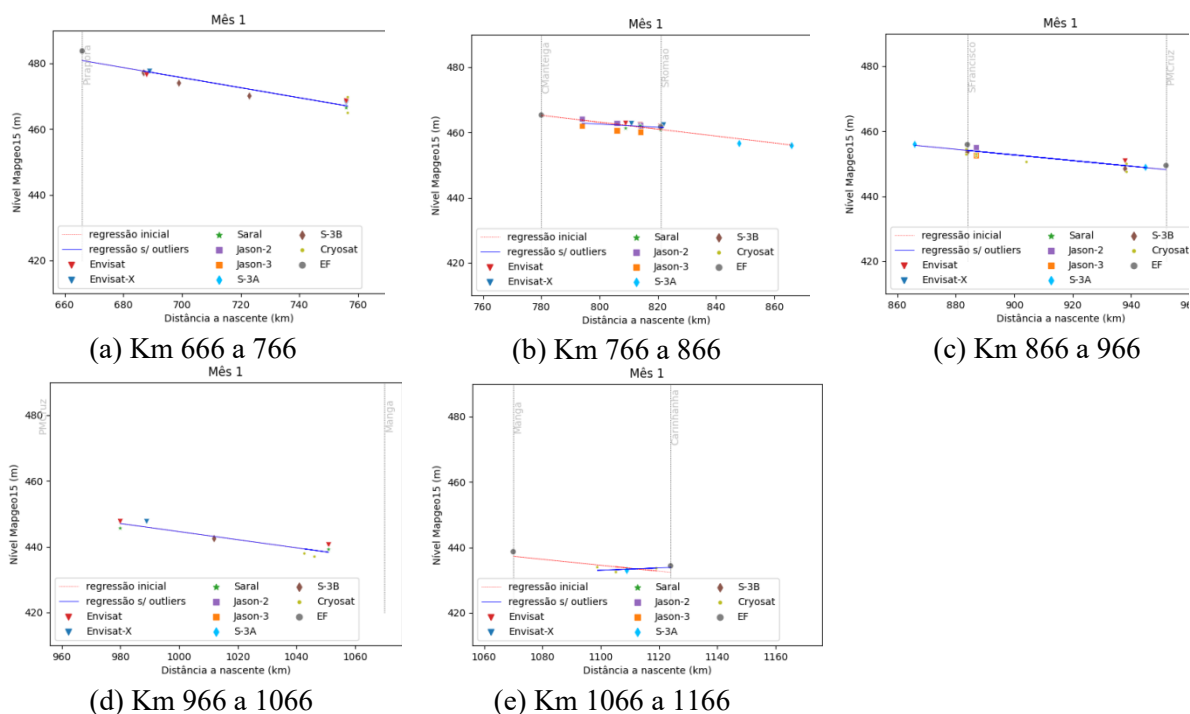


Figura 4.37 – Janelas espaciais de 100 km para o mês 1 e sobreposição de 0%

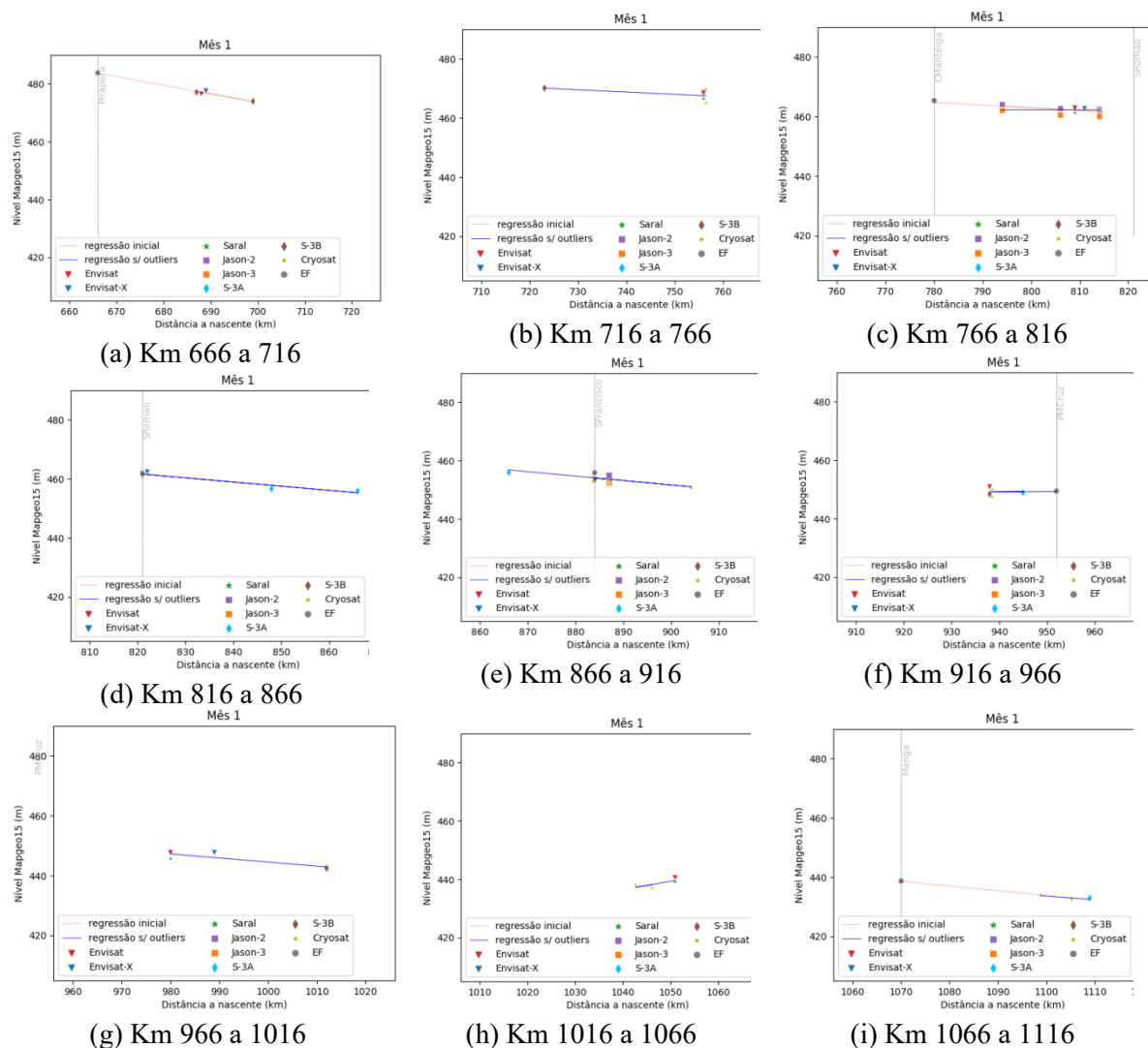


Figura 4.38 – Janelas espaciais de 50 km para o mês 1 e sobreposição de 0%

A remoção dos outliers piorou os resultados de regressão (Figura 4.37 *b* e *e*, Figura 4.38 *c*), gerando maior número de valores anômalos de declividades do que a análise inicial de regressão. Esta situação pode ser percebida comparando os gráficos da coluna 1 da Figura 4.39 (declividades para janela de 100km antes da remoção dos outliers) aos da coluna 2 (após remoção dos outliers). Isto indica que os supostos valores de nível d'água extremos são representativos da realidade de oscilações de níveis mensais nas EVs e contribuem para caracterizar melhor a declividade dos trechos. Tal fato se distingue do relatado por Moreira (2016), pois no contexto de filtragem espacial de dados de GPS realizado por este autor, os outliers são decorrentes ao processo de obtenção dos dados de nível e devem ser removidos para proceder a uma análise apropriada. Assim, no contexto desta pesquisa optou-se pela adoção dos resultados de regressão antes da remoção dos outliers.

A sobreposição de dados para deslocamento da janela espacial demonstrou impacto positivo, à medida que aumentou a resolução espacial mantendo a coerência dos valores de declividade.

Isto pode ser percebido avaliando os gráficos da primeira coluna da Figura 4.39 de cima para baixo: com aumento da sobreposição há uma melhora da resolução mantendo valores coerentes de declividade. Para as demais janelas espaciais analisadas esta mesma constatação se mantém.

Janela espacial de 100 km

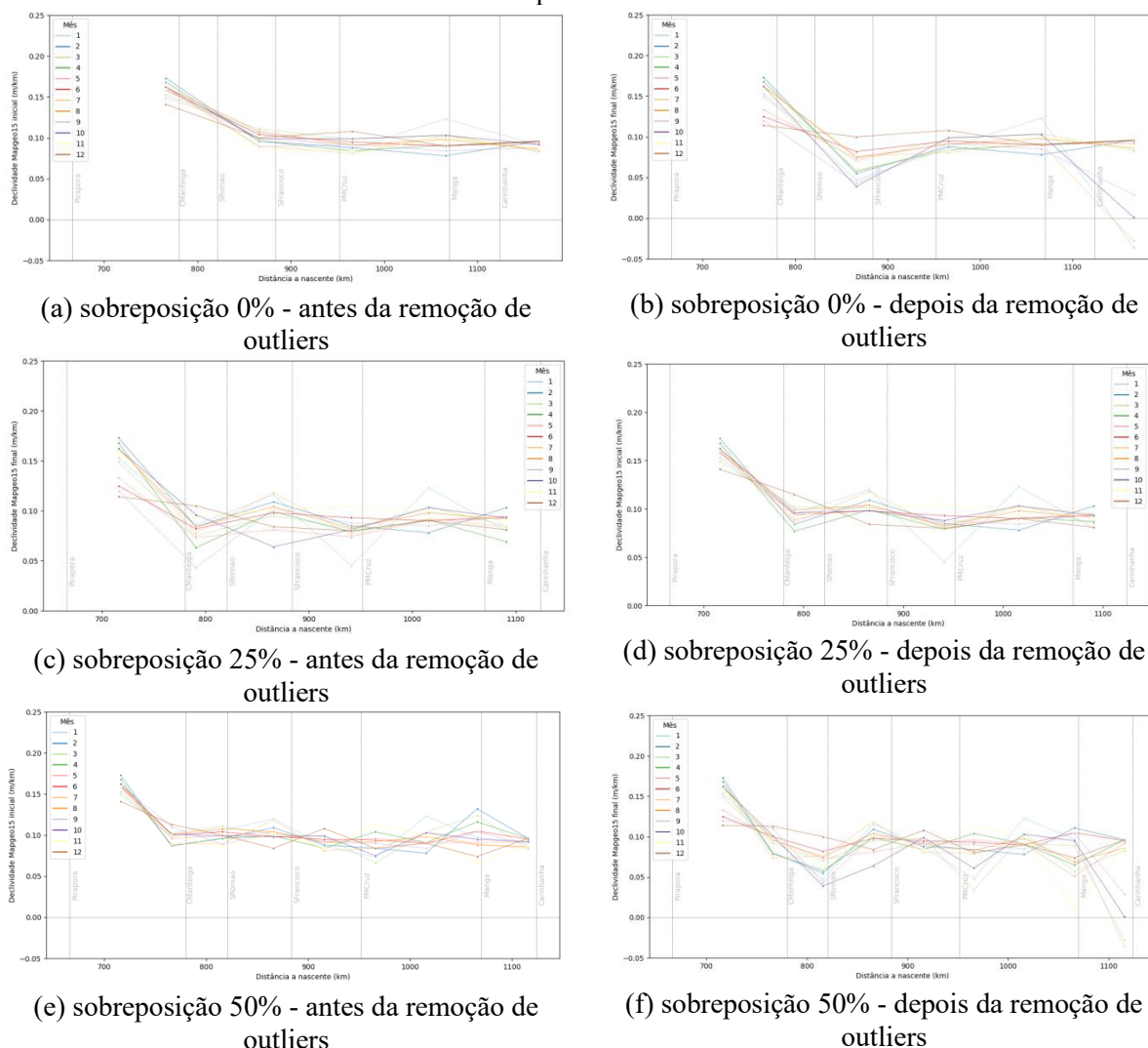
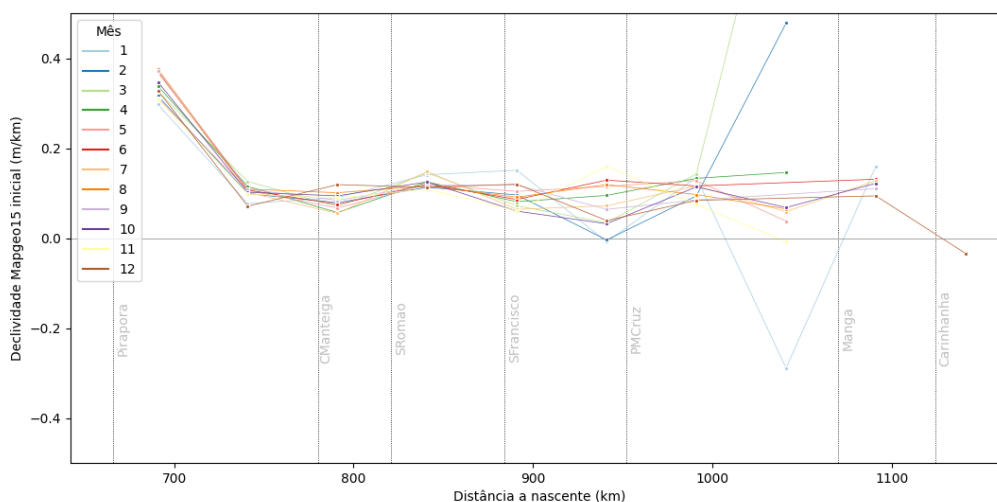


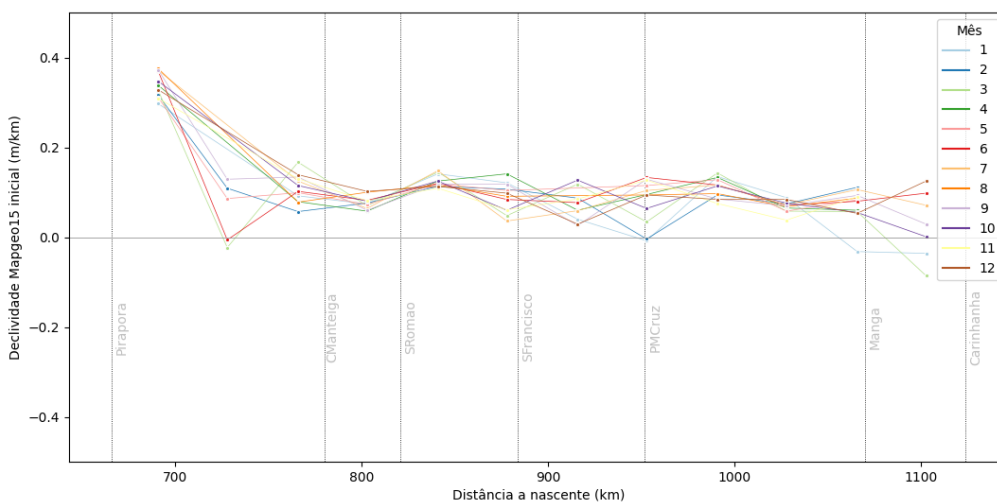
Figura 4.39 – Perfis de declividade mensais para janela espacial de 100 km antes e depois da remoção de outliers e diferentes opções de sobreposição

A Figura 4.40 apresenta os perfis mensais de declividade obtidos para as janelas de 50 km e 25 km com a regressão inicial, para diferentes opções de sobreposição. Conforme mencionado anteriormente: o deslocamento da janela espacial com sobreposição máxima dos dados proporcionou melhores resultados e para janela de 25 km há uma proporção grande de falhas e valores anômalos. Assim, analisando todas as opções de perfis de declividade mensais construídos acredita-se que a janela de 100 km com sobreposição de 50%, isto é, resolução espacial final de 50 km (Tabela 4.18) seja a mais adequada para representar as declividades mensais deste trecho do RSF. Considerando esta opção de análise, a Tabela 4.19 apresenta as

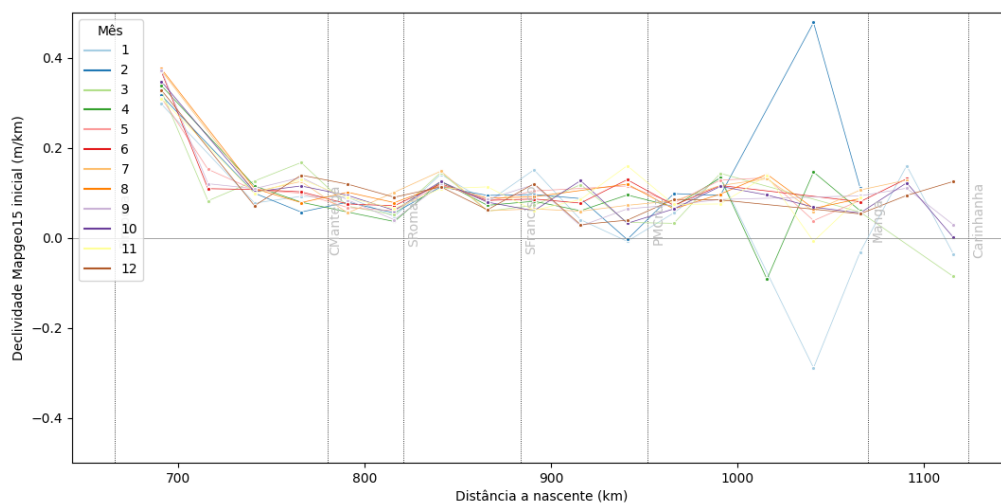
declividades mensais obtidas ao longo do trecho do RSF de Pirapora a Carinhanha. Os valores são compatíveis aos obtidos para as EFs isoladamente (Tabela 4.15), porém com maior resolução. Para trecho entre Pirapora e Cachoeira da Manteiga por exemplo, foi possível identificar um trecho de maior declividade (km 716) mais próximo a Pirapora seguindo de um trecho com declividades mais amenas. O trecho entre Manga e Carinhanha (km 1116) também foi apontado como o de declividades mensais mais baixas. A média geral de todas as declividades mensais resulta em 0,10 m/km, que é o valor indicado em ANA (2003) como característico do Médio RSF. ANA (2003) relata declividades entre 0,20 e 0,70 m/km para o Alto RSF, que corresponde a apenas cerca dos 30 km iniciais do trecho em análise. Portanto, as declividades do km 716 (ponto médio entre o km 666 e km 766), englobam 30% do Alto RSF e 70% do Médio RSF, sendo a média de declividade aqui encontrada de 0,16 m/km, também em conformidade com os valores relatados por ANA (2003).



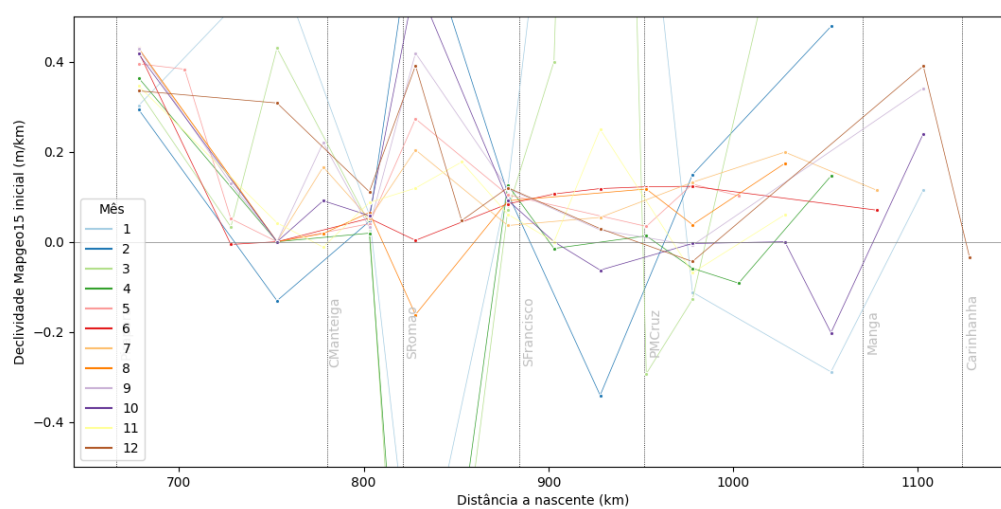
(a) Janela espacial de 50 km com sobreposição de 0%



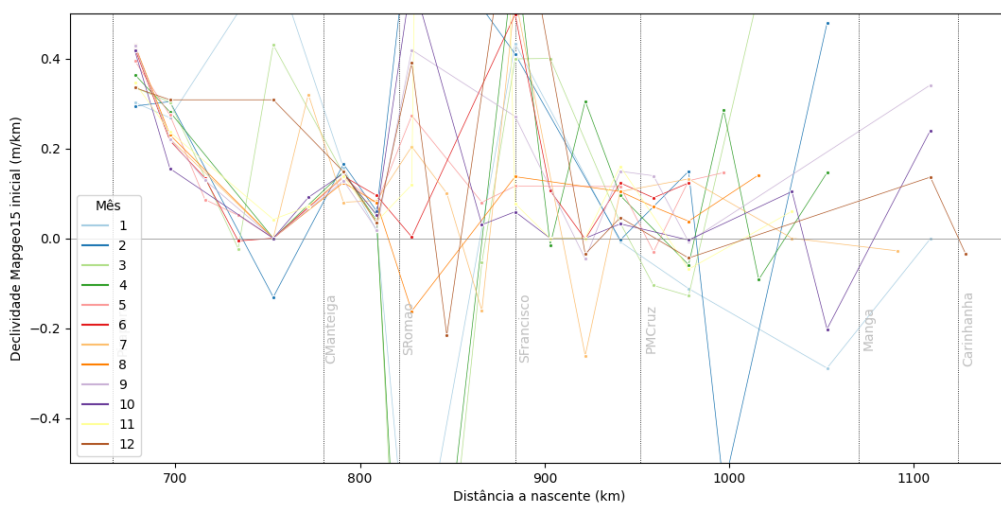
(b) Janela espacial de 50 km com sobreposição de 25%



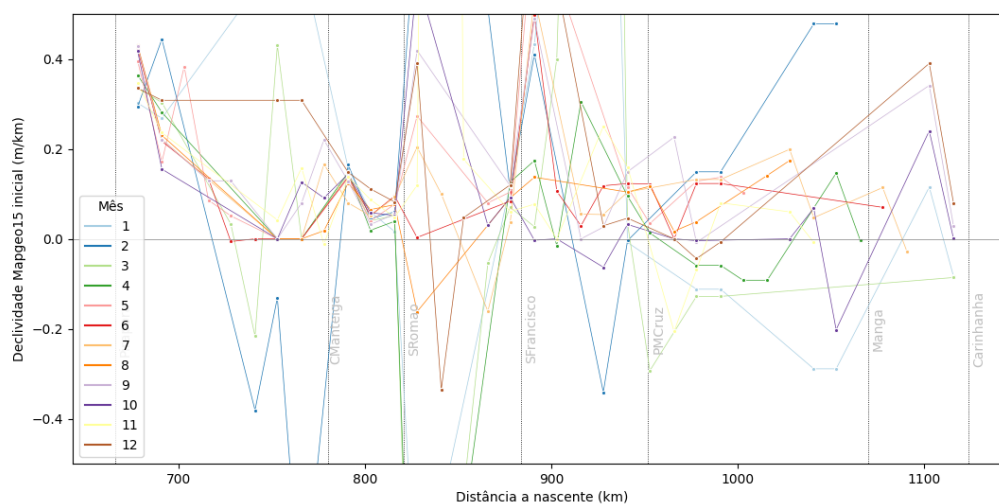
(c) Janela espacial de 50 km com sobreposição de 50%



(d) Janela espacial de 25 km com sobreposição de 0%



(e) Janela espacial de 25 km com sobreposição de 25%



(f) Janela espacial de 25 km com sobreposição de 50%

Figura 4.40 – Perfis de declividade mensais com diferentes sobreposições para as janelas espaciais de 50 km (a, b, c) e 25km (d, e, f)

Tabela 4.19 – Declividades mensais obtidas com resolução de 50 km a partir de dados de EVs e EFs (vermelho indica declividades mais elevadas e verde mais baixas)

Distância a nascente (km)		716	766	816	866	916	966	1016	1066	1116
Meses	1	0.153	0.098	0.106	0.120	0.087	0.073	0.123	0.097	0.091
	2	0.173	0.087	0.096	0.109	0.088	0.084	0.078	0.132	0.096
	3	0.149	0.103	0.111	0.101	0.098	0.066	0.104	0.124	0.083
	4	0.168	0.087	0.096	0.099	0.084	0.104	0.091	0.116	0.096
	5	0.158	0.096	0.099	0.104	0.092	0.096	0.091	0.091	0.092
	6	0.159	0.100	0.104	0.098	0.095	0.094	0.090	0.105	0.095
	7	0.163	0.089	0.090	0.118	0.081	0.084	0.103	0.089	0.084
	8	0.162	0.101	0.108	0.104	0.091	0.092	0.098	0.088	0.086
	9	0.162	0.110	0.089	0.102	0.092	0.090	0.084	0.104	0.088
	10	0.162	0.101	0.099	0.098	0.099	0.075	0.103	0.095	0.092
	11	0.160	0.100	0.085	0.102	0.084	0.113	0.100	0.066	0.087
	12	0.141	0.113	0.100	0.084	0.108	0.084	0.090	0.074	0.096
Média geral		0.159	0.099	0.099	0.103	0.092	0.088	0.096	0.098	0.091

*Dist. a nascente das EFs (para referência): Pirapora km 666; CManteiga km 780; SRomão km 821; SFrancisco km 884; PMCruz km 952; Manga km 1070; Carinhanha km 1124

Declividades por período seco/chuvoso

Para construção dos perfis por período do ano hidrológico foram repetidas as mesmas etapas que para os perfis mensais e obtidas as mesmas conclusões quanto à remoção de outliers e sobreposição das janelas espaciais. Assim, serão apresentados os resultados obtidos com a regressão inicial (sem remoção de outliers) para sobreposição de 50%.

Conforme explanado na Metodologia (item 3.5.3) foram utilizadas três opções de regressão linear dos dados: pesos 1,0 para todas as fontes de dados (RL – regressão linear), peso 2,0 para os dados de EFs (RP1 – regressão ponderada 1) e peso 2,0 para EFs e 0,5 para os dados do Cryosat, por se tratarem de pontos isolados e não valores médios mensais (RP2 – regressão ponderada 2). A Figura 4.41 apresenta os perfis obtidos para a janela de 100 km para os três tipos diferentes de regressão. Entre as regressões ponderadas quase não há diferença, o que indica que os dados do Cryosat não provocam desvios significativos na declividade, apesar de não terem sido interpolados. As diferenças médias entre as regressões analisadas são pouco significativas (Tabela 4.20), ocorrendo as maiores distinções nos trechos inicial (km 716) e final (km 1066 e 1116) para as regressões ponderadas em relação a linear. Nestes trechos as distâncias entre as EFs é maior que 100 km (114 km entre EF Pirapora e CManteiga e 118 km entre Manga e Carinhanha) acarretando uma baixa resolução das declividades. Assim, na definição do modelo de declividades (apresentado ao final deste item), nestes trechos faz mais sentido adotar a regressão linear, com peso 1,0 para EFs e EVs do que atribuir maior credibilidade aos dados das EFs.

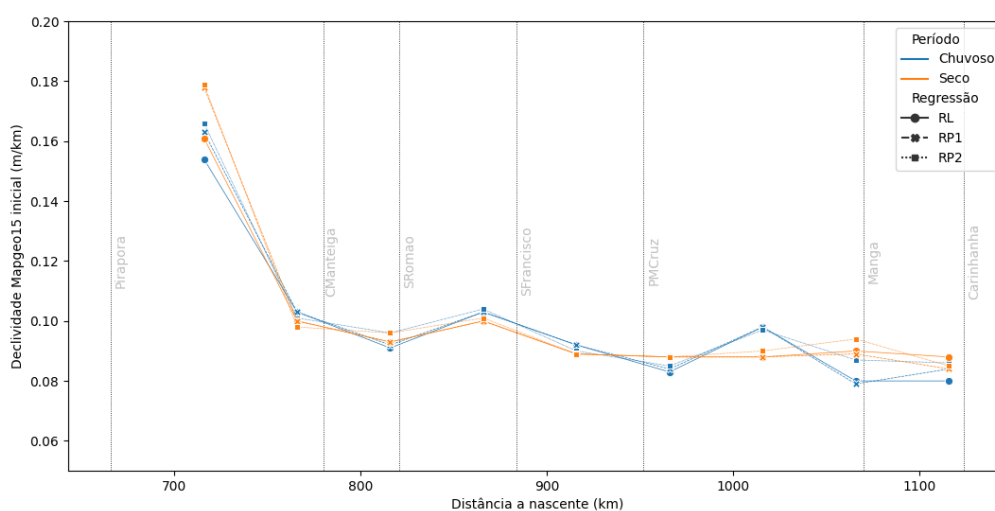


Figura 4.41 – Perfis de declividade por período do ano hidrológico para as regressões RL, RP1 e RP2 (janela espacial de 100 km, sobreposição de 50%)

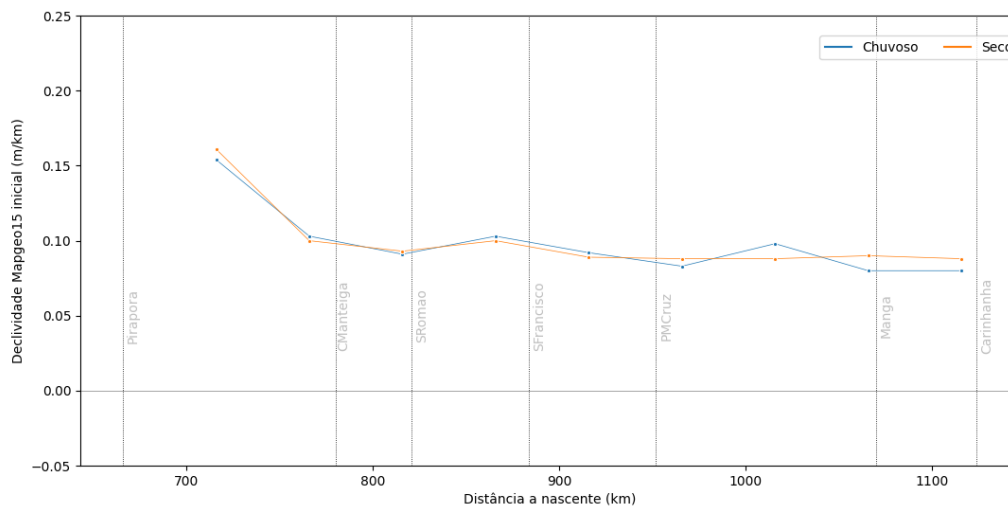
Tabela 4.20 – Diferenças percentuais entre as regressões RL, RP1 e RP2

Distância a nascente (km)	RP1/RL		RP2/RL		RP2/RP1	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
716	6%	11%	8%	11%	2%	1%
766	0%	0%	-2%	-2%	-2%	-2%
816	1%	0%	5%	3%	4%	3%
866	0%	0%	1%	1%	1%	1%
916	0%	0%	-2%	0%	-2%	0%
966	1%	0%	2%	0%	1%	0%
1016	0%	0%	-1%	2%	-1%	2%
1066	-1%	-1%	9%	4%	10%	6%
1116	5%	-5%	7%	-3%	2%	1%
Média	1%	1%	3%	2%	2%	1%
Mínimo	-1%	-5%	-2%	-3%	-2%	-2%
Máximo	6%	11%	9%	11%	10%	6%

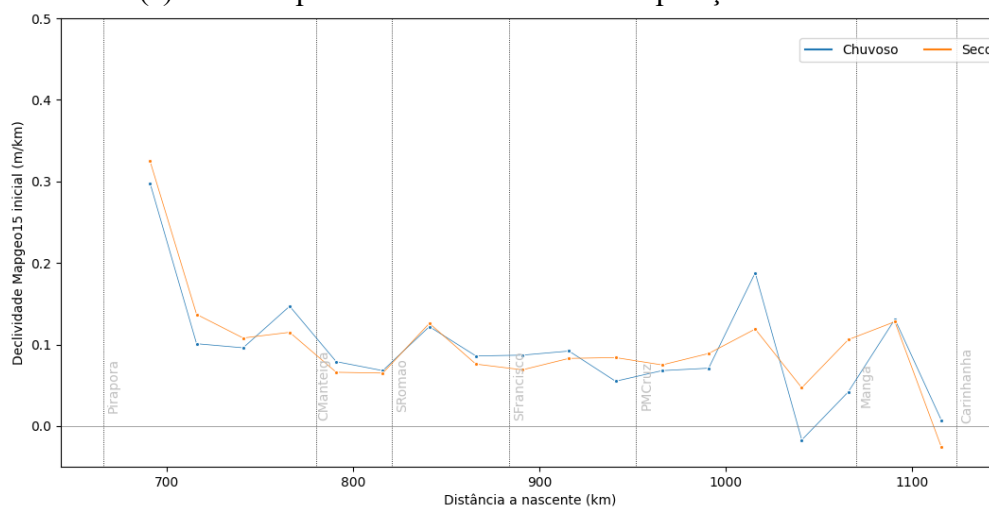
Para a janela espacial de 100 km e sobreposição de 50% (resolução final de 50 km), os perfis obtidos (Figura 4.42 a) remetem aos encontrados apenas com dados de EFs (Figura 4.28 d), mas com resolução superior, pois para o perfil de EFs a resolução aproximada é a distância média das EFs, portanto 76 km. Para a janela de 50 km (Figura 4.42 b) não há falhas nos dados e foram encontrados valores negativos de declividade no trecho próximo a EF Manga.

Para a janela espacial de 25 km também não há falhas nos dados, contudo muitos valores anômalos de declividade são produzidos, a maioria deles no período chuvoso (Figura 4.42 c). Em águas altas espera-se uma performance melhor dos satélites de altimetria, devido ao aumento da largura do curso d'água, entretanto a maior turbulência da superfície de água pode justificar os resultados ruins de declividade nas condições de cheia. Ademais foram utilizados dados médios mensais interpolados para diferentes períodos ao longo de quase 20 anos, sem distinguir anos de estiagem e de cheia, o que pode ter acarretado níveis médios bem distintos em um mesmo ponto ou num trecho.

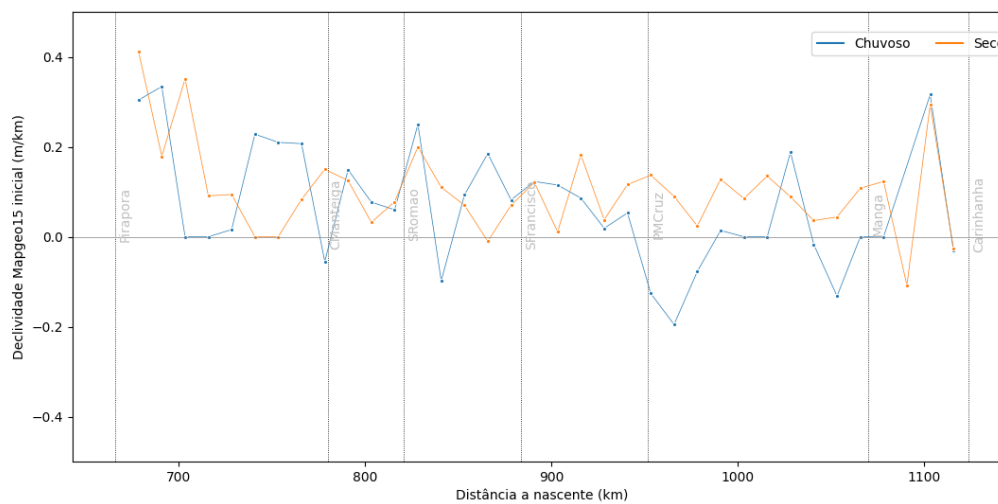
Com o agrupamento dos dados por período seco e chuvoso, há uma maior disponibilidade de dados, o que permitiu a análise com a janela espacial de 10 km. Mas ainda assim em 30% dos trechos não foi possível ajustar a regressão. Além disso, foi gerada uma significativa quantidade de dados anômalos, o que remete a questão da limitação dos dados de satélites em prover valores de declividades em pequenos trechos, ultrapassando sua acurácia.



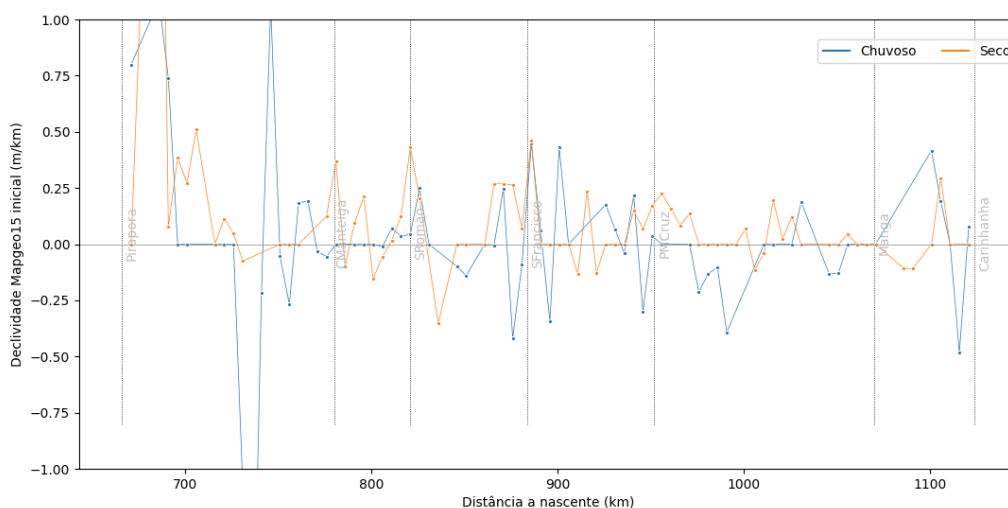
(a) Janela espacial de 100 km com sobreposição de 50 %



(b) Janela espacial de 50 km com sobreposição de 50 %



(c) Janela espacial de 25 km com sobreposição de 50 %



(d) Janela espacial de 10 km com sobreposição de 50 %

Figura 4.42 – Perfis de declividade por período seco/chuvoso para diferentes janelas espaciais

Diante dos resultados encontrados, o limite de resolução espacial para estimativa de declividades com o conjunto de dados utilizados parece ser 50 km, desde que analisados numa janela espacial de 100 km com sobreposição de 50%. Para as janelas espaciais de 50 km, são encontrados dados anômalos independente da sobreposição de dados, inviabilizando a utilização desta janela diretamente. Assim, mediante os dados utilizados e análises executadas acredita-se que o modelo que melhor representa as declividades do RSF no trecho entre Pirapora e Carinhanha é o da Tabela 4.21 e Figura 4.43, oriundo da análise da janela de 100 km com sobreposição de 50% e composto por resultados da RL nos trechos extremos e da RP2 nos demais. Ressalta-se que este modelo é mais robusto que o de declividades mensais, apresentado na Tabela 4.19, devido a maior quantidade de dados analisados em cada trecho e as regressões utilizadas.

Tabela 4.21 - Modelo de declividades para o período seco/chuvoso a partir de dados de EVs e EFs

Tipo de regressão	Distância a nascente (km)	Declividade por período (m/km)	
		Chuvoso	Seco
RL	716	0.154	0.161
RL	766	0.103	0.100
RP2	816	0.096	0.096
RP2	866	0.104	0.101
RP2	916	0.090	0.089
RP2	966	0.085	0.088
RP2	1016	0.097	0.090
RL	1066	0.080	0.090
RL	1116	0.080	0.088

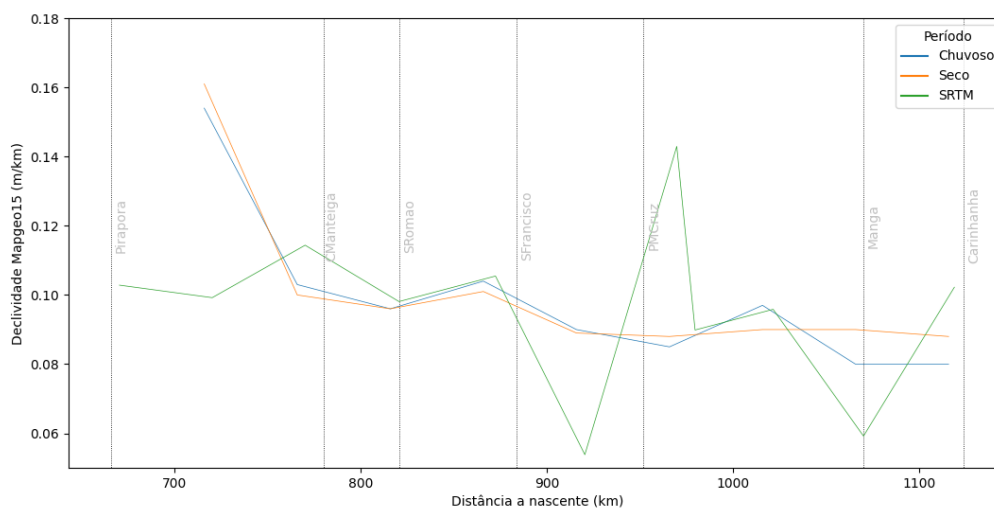


Figura 4.43 – Modelo de declividades para o período seco/chuvoso a partir de dados de EVs e EFs e SRTM para o trecho

Na Figura 4.43 nota-se que a média geral do SRTM é condizente com as declividades do modelo aqui proposto, contudo apresenta valores incompatíveis em alguns trechos (valores muito baixos entre Pirapora e CManteiga por exemplo). Para os dados de declividade obtidos a partir de GPS geodésico por Moreira (2016) foi encontrada uma resolução espacial limite de 10 km para rios amazônicos. Autores que obtiveram a declividade a partir de dados de EVs (Getirana *et al.*, 2009; Leon *et al.*, 2006) não se aprofundam na discussão das resoluções espaciais obtidas. Getirana *et al.* (2009) mencionam que a precisão da declividade com dos dados do Envisat supera à obtida pelo SRTM, sem maiores detalhamentos.

4.8 Síntese dos resultados obtidos e discussões

Para análise de qualidade das séries de AS foi considerado um trecho de aproximadamente 1400 km do Rio São Francisco, com larguras médias inferiores a 1 km, portanto considerado de médio porte para este tipo de aplicação. A utilização de séries de EFs com nivelamento altimétrico global viabilizou a análise de erros em termos absolutos, algo raramente encontrado na literatura. Para as missões altimétricas foram utilizadas cinco missões, totalizando oito diferentes satélites, sendo o Envisat em duas órbitas. O período de interesse abrangeu 2002 a 2020, viabilizando também a análise de evolução das tecnologias dos altímetros ao longo de quase duas décadas.

Para minimizar os efeitos da comparação entre dados de EVs distantes de EFs foi desenvolvido um módulo no SWG com duas opções de interpolação linear: uma só no tempo (IT – interpolação temporal) e a interpolação no tempo e no espaço (ITE). A validação das metodologias de interpolação de dados *in situ* foi dividida em dois grupos de EVs para melhor

distinguir os impactos da análise relativa comparada à análise absoluta, e ambas em relação à IT e a ITE. O primeiro grupo totalizou 33 EVs distantes até 15 km de EFs, viabilizando assim uma comparação direta com o dado de satélite. Os principais resultados para esse grupo estão listados abaixo:

- Para o primeiro grupo de EVs (distância < 15km), a análise relativa (usualmente feita nos estudos que não dispõe de dados nivelados) foi 46% mais otimista que a análise absoluta direta e 36% mais otimista que a ITE. Tais valores demonstram como o ajuste relativo pode dar uma visão otimista da acurácia dos dados dos altímetros. Num contexto de utilização dos dados de satélite em conjunto com os dados *in situ* é importante conhecer estes erros em termos absolutos.
- Os valores de RMSE relativo (ajustado) (0,13 m a 6,29 m, média 1,37 m, mediana 0,94 m) são compatíveis aos valores encontrados por outros autores em rios de médio porte e até mesmo grandes rios ao redor do mundo.
- Em termos de RMSE absoluto (não ajustado), desconsiderando as EVs do Saral com RMSE excepcionalmente elevado (fenômeno de perda de ancoragem), os valores encontrados são mais altos (0,61 m a 6,11 m, média 2,08 m e mediana 1,91 m), como era esperado.
- A utilização de dados sincronizados só no tempo (IT) para validação não causou diferenças significativas nos erros, mantendo valores muito próximos aos da análise absoluta. Já a ITE reduziu o erro absoluto em 34% e o RMSE em 26% para 2/3 das EVs analisadas. Nas demais EVs a ITE piora o resultado, em sua maioria por serem EVs praticamente coincidentes com EF, assim a ITE acaba utilizando dados de uma EF muito distante.

Para o grupo de 43 EVs ($D > 15\text{km}$) a ITE diminui o AME e RMSE de 86% das EVs em relação à IT. A redução significativa dos erros ao utilizar dados interpolados no espaço e no tempo na validação demonstrou que a ITE é um método pertinente para produção de dados sincronizados. Trata-se de uma interpolação linear simples dos níveis d'água entre duas EFs, portanto supõe-se que a declividade da linha d'água é constante no trecho. A presença de quedas, corredeiras, entradas e retiradas de vazão significativas podem comprometer a aplicação do método e devem ser analisadas previamente por usuários do módulo de interpolação do SWG.

A ITE foi utilizada também para produção de dados *in situ* para data e local coincidentes com EFs que estivessem localizadas entre outras duas EFs. Assim, os dados gerados pela interpolação foram validados com a série histórica de dados de oito EFs. Os valores de erro no geral ficaram abaixo de 1,0 m (mediana de AME de 0,35m e de RMSE de 0,39 m) e o

coeficiente de correlação acima de 0,97. Tais resultados foram considerados muito bons, especialmente observando as distâncias médias de 178 km entre as EFs, e confirmam a validade do método proposto para ITE.

Uma vez comprovado o melhor desempenho da ITE, esta foi utilizada na análise de performance dos satélites. Num primeiro momento foram considerados apenas os satélites de órbita fixa. O satélite Saral apresenta a pior performance média dentre todas as missões devido aos problemas de manutenção de órbita nominal e ao fenômeno de perda de ancoragem. Entretanto os valores de medianas de RMSE e AME das métricas do Saral foram compatíveis aos demais satélites indicando que nas EVs não problemáticas, os resultados do Saral se aproximam das outras missões. A missão Sentinel-3 apresenta os melhores resultados em todas as métricas, em algumas o S-3A em outras o S-3B. A única exceção é feita para a média de taxa de eficiência amostral, em que Jason-2 mostrou resultados mais consistentes para o conjunto de EVs analisadas, enquanto S-3A apresenta a melhor mediana. O S-3A se destaca com os menores valores de ME, AME e RMSE. O S-3B apresenta os melhores resultados de coeficiente de correlação (mediana de R de 0,89). Um total de 82% das 76 EVs mostraram tendência a superestimar o nível d'água, contudo a tendência é menos pronunciada na missão Sentinel-3 (67% das EVs com ME positivo para S-3A e 56% para S-3B). Essa tendência é averiguada em outros estudos de AS e pode ser consequência de diferentes fases do processamento dos dados: fatores de correção aplicados para corrigir a propagação do pulso eletromagnético ou o próprio algoritmo do *retracker*.

A análise de erros ao longo do Rio São Francisco indicou a existência de trechos que concentram valores reduzidos de erros e trechos de resultados ruins para diferentes missões. De maneira geral, os erros elevados em algumas EVs se relacionam a contextos do entorno que comprometem a captura do nível d'água pelo altímetro, tais como: mudança abrupta de relevo, períodos de águas baixas (altímetro captura mais as margens expostas), presença de ilhas, solo exposto, areais e vegetação aquática.

Para o satélite Cryosat, a interpolação foi feita a parte devido à órbita derivativa. Para fins de processamento no SWG cada ponto de passagem foi considerado como uma EV e assim as estatísticas puderam ser produzidas da mesma forma. Os resultados de todas as métricas foram compatíveis às demais missões, bem como foram identificados trechos de melhores e piores resultados similares aos demais altímetros.

A estimativa de viés foi consolidada considerando as EVs a menos de 15 km de EFs, utilizando a ITE para interpolação dos dados *in situ*. O objetivo foi limitar ao máximo que outras variáveis (alteração da linha d'água, entrada de afluentes, etc...) interferissem nos valores dos erros médios resultantes. Todos os satélites apresentaram vieses positivos, oscilando entre 0,48 m (S3-B) e 1,73 m (Envisat-X e Jason-2). A distinção dos valores está majoritariamente associada à performance de cada satélite, mas também reflete as características das EVs utilizadas e processamento adotados. Os valores são significativamente maiores que o reportado para oceanos e lagos, o que decorre da complexidade das formas de onda obtidas em rios, especialmente de larguras inferiores a 1 km. A grande amplitude na parcela de incerteza das estimativas decorre das características de entorno das EVs, que variam de um local para outro. Os vieses encontrados são compatíveis aos valores estimados por Calmant *et al.* (2013) para rios amazônicos e Tourian *et al.* (2016) para o Rio Po, únicas referências encontradas para vieses de rios.

Como aplicação direta dos dados de AS consolidados e livres de vieses, foram consolidados vários perfis longitudinais e de declividade. Os dados das EFs também subsidiaram a construção destes perfis, num primeiro momento para validar os perfis das EVs e por fim, na construção de um modelo de declividade da linha d'água com dados *in situ* e de satélite. Os níveis d'água foram previamente ajustados a partir de cinco diferentes modelos geoidais, visando significado físico das altitudes absolutas. O modelo adotado foi o Mapgeo2015, devido a maior quantidade de estações em território brasileiro. A declividade da linha d'água pôde ser estimada com melhor resolução temporal a partir dos dados *in situ*, sendo construídos perfis diários para cada ano hidrológico do período analisado (2002 a 2020), perfis mensais e por período seco/chuvoso, com resolução espacial correspondendo às distâncias entre as EFs, portanto média de 76 km (mínimo de 41km e máximo de 118 km). Para os dados das EVs, as declividades diárias foram inicialmente obtidas para os dias em que um mesmo satélite cruzou o rio em diferentes pontos, sendo que todos os satélites utilizados apresentaram este potencial. Contudo, para estes perfis diários foi gerada quantidade significativa de valores de declividade anômalos (negativos ou superiores a 0,50 m/km). Para melhorar a resolução temporal dos dados de EVs procedeu-se a interpolação dos dados de satélite para o nível diário, sendo adotada a metodologia de splines proposta por Akima (1970). Assim, foram obtidas médias mensais para as EVs de todos os satélites de órbita fixa e construídos perfis de declividades mensais e por período do ano hidrológico. No caso do Cryosat, devido a grande resolução espacial foi obtido diretamente o perfil da linha d'água para o período seco e chuvoso, mas não foi viável proceder à interpolação, já que em razão de sua órbita derivativa não há EVs com série de dados contínuos. Após a

interpolação as declividades obtidas com dados de EVs apresentam menos dados anômalos, mas ainda assim foram gerados bastantes valores inadequados. Ocorre que apesar da elevada cobertura espacial das EVs (11 km considerando todos os satélites), a própria acurácia dos dados de AS limita a resolução espacial viável para obtenção das declividades. Assim, propôs-se uma metodologia que permitisse encontrar uma resolução espacial ideal para o conjunto de dados médios mensais de EVs e EFs, e que as declividades fossem representativas da realidade do curso d'água. Foram testadas diferentes janelas espaciais de seleção e sobreposição dos dados, remoção de outliers, regressões lineares simples e ponderadas, além da construção de perfis mensais e por período do ano hidrológico. Por fim, o modelo de declividades foi consolidado para uma resolução espacial de 50 km distinguindo período seco e chuvoso.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Considerações finais

Há inúmeras possibilidades de uso dos dados de satélite na Hidrologia. Conforme descrito por Calmant e Seyler (2006), ainda que as missões espaciais não tenham sido lançadas com objetivo principal em Hidrologia, a altimetria por satélite (AS) forneceu ao longo das últimas décadas uma série de dados que podem ser utilizados para geração de produtos hidrológicos.

Apesar dos dados de AS serem ofertados gratuitamente pelas instituições responsáveis, há especificidades para aplicação em cursos d'água continentais. O processamento dos dados exige profissional altamente especializado, já que as séries altimétricas não são ofertadas prontas, especialmente para cursos d'água mais estreitos, ainda desafiadores para a AS. Melhorias na forma de divulgação dos dados vêm acontecendo aos poucos, como as iniciativas de Centros como o CTOH (arquivos de dados GDRs padronizados), o Hydroweb com séries altimétricas prontas e a plataforma SciHub da missão Sentinel-3.

O desempenho dos altímetros evoluiu ao longo das décadas, mas ainda está na ordem dos decímetros restringindo o uso destes dados em estudos hidrológicos e hidráulicos. Devido às limitações da AS no mapeamento de cursos d'água menores, grande parte dos estudos na área focou em grandes sistemas hídricos, majoritariamente a Bacia Amazônica. Assim, permanece o desafio de utilização de dados de altimetria espacial em cursos d'água de porte médio, como o Rio São Francisco.

Os resultados aqui alcançados demonstram a potencialidade de uso de dados de altimetria espacial em cursos d'água continentais de médio porte. A validação prévia destes dados é um passo essencial, pois vários fatores podem interferir na qualidade das medições, sobretudo em cursos d'água mais estreitos. Os principais obstáculos se relacionam aos grandes *footprints* dos altímetros (ordem de quilômetros); ao fenômeno de *hooking* em que o altímetro capta água fora de seu nadir, o que resulta num perfil parabólico para a seção transversal do curso d'água; e a perda de ancoragem do altímetro em vales encaixados. Em decorrência das limitações da operação dos altímetros em cursos d'água estreitos, a eficiência de uma missão em prover dados numa EV ao longo do tempo pode ser seriamente impactada. Considerando a baixa resolução temporal dos dados de AS torna-se ainda mais importante avaliar o percentual de dados de fato entregue a cada ciclo do satélite.

A análise de qualidade das séries de nível d'água obtidas por AS envolve subjetividades na forma de processamento e consolidação, devido às comparações relativas entre dados de EVs e EFs e a definição de limiares de remoção de outliers. A maioria dos estudos não deixa claro quais foram os critérios utilizados e são raras as validações de dados com base no erro absoluto. Assim, as estatísticas apresentadas podem ser demasiado otimistas. Na presente pesquisa optou-se pela clara exposição dos critérios e metodologias utilizadas no processamento dos dados visando transparência e reprodutibilidade.

As validações de dados de AS usualmente associam os dados de EVs aos dados de EFs sem considerar o tempo de propagação entre as estações e entre as duas leituras realizadas no dia de passagem do satélite. As metodologias de interpolação no tempo (IT) e espaço temporal (ITE) foram propostas nesta pesquisa no intuito de propiciar uma comparação mais adequada entre os dados de satélite e dados *in situ*. Em decorrência do ajuste relativo de referências apenas as oscilações das séries são avaliadas (análise de anomalias), mascarando a acurácia verdadeira dos dados de AS.

A sinergia da resolução temporal das EFs aliada à resolução espacial das EVs propicia ganhos significativos no monitoramento e geração de dados hidrológicos e hidráulicos. Nesta pesquisa, a organização, consistência e análise dos dados históricos das EFs propiciou uma base de referência para validação das séries dos altímetros e como fonte complementar na definição de um modelo de declividades da linha d'água para o RSF.

5.2 Conclusões

Diante do contexto de uso crescente de dados de altimetria por satélite em Hidrologia, a presente pesquisa se propôs a avaliar a performance de diferentes satélites no Rio São Francisco, bem como seu uso na obtenção de níveis e declividade da linha d'água.

Foi consolidada a versão 2.2 do *software* SWG, que viabilizou o processamento de dados de cinco diferentes missões altimétricas e inclui um novo módulo referente à interpolação de dados *in situ*. A interpolação no tempo e espaço (ITE) se mostrou uma metodologia válida e com melhores resultados que a interpolação só no tempo (IT), independentemente da distância entre a estação virtual (EV) e a fluviométrica (EF). A ITE em relação à IT, propiciou uma redução do RMSE e AME em 67 % das EVs a menos de 15 km de EFs e em 86% das EVs mais distantes que 15 km. Ademais, a validação da ITE para produção de dados sincronizados no local das EFs gerou resultados excelentes, com mediana de RMSE de 0,39 m, a despeito da distância média de 178 km entre as EFs utilizadas na geração do dado interpolado.

O RMSE relativo foi obtido para 33 EVs a menos de 15 km de EFs e oscilou entre 0,13 m e 6,29 m (média 1,37 m e mediana 0,94 m); resultados compatíveis àqueles encontrados por outros autores em rios de médio porte e até mesmo grandes rios ao redor do mundo. Estes valores de RMSE foram 46% mais baixos que os obtidos com a comparação absoluta e 36% mais baixos que a ITE, confirmando o quanto essa análise tende a subestimar os erros dos dados de satélite.

Para as 76 EVs utilizadas na avaliação de acurácia dos dados de altimetria por satélite e análise de desempenho das missões, as métricas absolutas foram compatíveis a estudos semelhantes, conforme resultados abaixo:

- Taxa de eficiência amostral: 11% a 100 %, média 68% e mediana 89%;
- RMSE absoluto: 0,16 m a 6,15 m, com quatro outliers superiores a 10 m, média 3,57 m e mediana 1,63 m;
- ME absoluto: -6,07 m a 3,55 m, com quatro outliers superiores a 10 m, média 2,47 m e mediana 1,16 m;
- AME absoluto: 0,12 m a 6,07 m, com quatro outliers superiores a 10 m, média 3,21 m e mediana 1,23 m;
- Coeficiente de correlação: -0,40 a 1,0, média 0,65 e mediana 0,79.

Um total de 82% das 76 EVs mostrou tendência a superestimar o nível d'água, sendo a tendência menos pronunciada na missão Sentinel-3.

A análise de performance dos satélites indicou a supremacia da missão Sentinel-3, com melhores resultados em todas as métricas. A missão Saral apresentou os piores resultados em decorrência de problemas nas engrenagens resultando em dificuldade na manutenção de sua órbita. A família Jason apresentou o segundo pior resultado e a missão Envisat exibiu bons resultados em suas duas órbitas, apesar de ser a missão mais antiga utilizada.

A análise de erros ao longo do Rio São Francisco apontou que além da largura do rio, sua configuração e contexto da EVs (topografia e cobertura vegetal) são mandatórios na performance dos satélites. Os bons resultados da missão Sentinel-3 indicam que boa parte destas limitações pode ser contornada pelo modo de operação SAR (radar de abertura sintética) aliado ao OLTC (open loop tracking comand), contudo é essencial que a altitude da EVs esteja corretamente informada no DEM utilizado no OLTC.

Todos os satélites apresentaram vieses positivos, oscilando entre $0,48 \pm 0,56$ m (S3-B) e $1,73 \pm 1,04$ m (Envisat-X) e $1,73 \pm 0,47$ m (Jason-2), semelhantes aos vieses relatados por estudos em rios (Calmant *et al.* (2013) para rios amazônicos e Tourian *et al.* (2016) para o Rio Po).

A junção dos dados de EFs aos dados de EVs viabilizou a construção de um modelo de declividade da linha d'água para o trecho entre Pirapora e Carinhanha, com resolução espacial de 50 km. As declividades mais baixas foram obtidas entre Pedras de Maria da Cruz e Carinhanha ($0,080$ m/km) e as mais altas entre Pirapora e Cachoeira da Manteiga ($0,161$ m/km). Também ocorre uma variação temporal. No período chuvoso, a declividade aumenta em média 3% na maior parte dos trechos, exceto nas proximidades de Pirapora, Pedras de Maria da Cruz, Manga e Carinhanha, onde a declividade diminui 7% em média com as cheias.

5.3 Recomendações e perspectivas futuras

O lançamento de missões altimétricas focadas em observação de cursos d'água continentais deverá prover melhorias significativas na acurácia dos dados altimétricos para cursos d'água continentais, especialmente de menor porte. Neste sentido, em novembro de 2020 foi lançado o Sentinel-6 (usa tecnologia SAR) e em 2022 será lançado o satélite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) que utilizará o modo SAR aliado a técnicas interferometria, provendo simultaneamente elevada resolução e ampla cobertura de imagens. Diante deste contexto, há muito trabalho a ser feito visando conhecer profundamente a qualidade dos dados gerados pela AS e explorando formas de aproveitá-las em estudos hidráulicos e hidrológicos.

A presente pesquisa procurou testar e analisar a qualidade dos dados de AS num cenário desafiador de um rio de médio porte, que está fora dos objetivos específicos das missões, que ainda são focadas em níveis dos oceanos e geleiras. Além das séries de nível d'água, AS se mostrou capaz de prover dados de declividade da linha d'água em algumas passagens dos altímetros e, especialmente, após a combinação de com dados de EFs numa metodologia que utiliza regressão linear por trechos. Os resultados são promissores e sugestivos de inúmeras outras possibilidades para aplicações dos dados gerados, bem como estudos futuros, especialmente em sinergia com a base de dados *in situ*. A seguir são mencionadas as limitações da pesquisa realizada e lacunas a serem preenchidas com estudos futuros.

Conforme realizado por Bjerklie *et al.* (2003), a partir dos bancos de dados de EFs podem ser parametrizadas equações de escoamento simplificadas (baseadas em Manning). Estas equações por sua vez podem ser empregadas na estimativa expedita da vazão (ou alguma outra variável

hidráulica) no local de alguma EV, utilizando as séries de nível d'água de AS. Outra aplicação direta das séries de AS aqui consolidadas, é o preenchimento de falhas em séries de EFs ou como fonte de dados para modelagens hidráulicas e hidrológicas, densificando significativamente a rede de estações com dados de nível.

O banco de dados multimissão com séries de nível e declividades pode ser utilizado para obtenção de outras variáveis hidráulicas, como batimetria seca, séries de profundidade de escoamento e até mesmo estimativa de vazão. Isso pode ser feito com uso exclusivo de dados oriundos de sensoriamento, associando outras variáveis, como largura extraída de imagens, por exemplo, ou em sinergia com a base de dados *in situ*.

Com relação à estimativa de viés, a atividade de validação de dados de AS é idealmente feita comparando os dados de satélites a medições *in situ* obtidas de maneira síncrona à passagem de satélite e com uso de instrumentos especializados, acurados e precisos. Infelizmente, no contexto desta pesquisa foi inviável a obtenção destes dados em campo, sendo recomendado o desenvolvimento de metodologias específicas e a realização de campanhas de campo em rios, para estimativa de vieses específicos destes ambientes. Ainda que os vieses estimados neste trabalho sejam uma adaptação da metodologia tradicionalmente utilizada na atividade de validação de dados de AS em lagos e oceanos, considera-se que os valores sirvam como um norteador dos vieses esperados para águas continentais, especialmente para rios tropicais de médio porte.

A metodologia de interpolação de dados no tempo e espaço representa de maneira simplificada a linha d'água entre EFs, sendo sugerido seu aperfeiçoamento em trabalhos futuros. O próprio modelo de declividades aqui proposto pode subsidiar o refinamento da metodologia de interpolação no tempo e espaço, de forma a representar mais adequadamente trechos com remanso, corredeiras, etc... De maneira mais direta, os valores de declividade aqui calculados podem ser utilizados em estudos no RSF como uma fonte de informação mais precisa do que o SRTM tipicamente empregado. Já os perfis de período seco/chuvoso e mensais podem servir para subsidiar análises relacionadas às planícies de inundação e como se alteram em períodos de seca ou cheia, num sistema de alertas contra eventos críticos por exemplo.

São encorajadas pesquisas que avaliem de maneira extensiva e aprofundada a qualidade dos dados de AS em rios de diferentes características ambientais, sobretudo no intuito de estimar os vieses. Inclusive, um próximo passo essencial no uso de dados de AS em rios é o

desenvolvimento, padronização e aplicação de metodologias específicas para estes sistemas hídricos.

REFERÊNCIAS

AEB – AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (BRASIL). *Sensoriamento remoto- Programa AEB Escola*. Brasília: AEB, 2008.

AKIMA, H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the Association for Computing Machinery*, v. 17(4), p.589-602, 1970.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). *Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira (PAE)*. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual*. Brasília: ANA, 2019a.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). *Planejamento da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência*. Brasília: ANA, 2019b.

ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). - HIDROWEB. *Séries históricas*. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>> Acesso em: jan. de 2021.

ASF – Alaska Satellite Facility – DEM Information. Disponível em: https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/#dem_information Acesso em: jun. de 2021.

AVISO - *Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques*. Missions, Techniques. Disponível em: <<http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions.html>> Acesso em: abr de 2021.

BERCHER, N. *Précision de l'altimétrie satellitaire radar sur les cours d'eau*. 2008. 356p Tese (Doutorado em Agro Paris Tech) - Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, Paris, 2008.

BIANCAMARIA, S.; DURAD, M.; ANDREADIS, K.; BATES, P.; BOONE, A.; MOGNARD, N.; RODRÍGUEZ, E.; ALSDORF, D.; LETTENMAIER, D.; CLARK, E. Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Arctic river modeling. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, p. 373–381, 2011.

BIANCAMARIA, S.; LETTENMAIER, D.; PAVELSKY, T. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics*, v. 37, n. 2, p.307-337, 2016.

BIANCAMARIA, S.; FRAPPART, F.; LELEU, A.-S.; MARIEU, V.; BLUMSTEIN, D.; DESJONQUÈRES, J.-D.; BOY, F.; SOTTOLICHIO, A.; & VALLE-LEVINSON, A. Satellite radar altimetry water elevations performance over a 200 m wide river: Evaluation over the Garonne river. *Advances in Space Research*, v. 59, p. 128-146, 2017.

BIANCAMARIA, S.; SCHAEDELE, T.; BLUMSTEIN, D.; FRAPPART, F.; BOY, F.; DESJONQUÈRES, J.; POTTIER, C.; BLAREL, F.; NI Validation of Jason-3 tracking modes over French rivers. *Remote Sensing of Environment*, v. 209, p. 77-89, 2018.

BIRKETT, C.; MERTES, L.; DUNNE, T.; COSTA, M.H.; JASINSKI, M.J. Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. *Journal of Geophysical Research*, v. 107 (D20), p. 8059-8080, 2002.

BIRKINSHAW, S., MOORE, P., KILSBY, G., O'DONNELL, G., HARDY, A., BERRY, P. Daily discharge estimation at ungauged river sites using remote sensing. *Hydrological process*, v. 28, p. 1043-1054, 2014.

BJERKLIE, D.; DINGMAN, L.; VOROSMARTY, C.; BOLSTER, C.; CONGALTON, R.. Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *Journal of Hydrology*, v. 278, p. 17-38, 2003.

BJERKLIE, D.; MOLLER, D.; SMITH, L.; DINGMAN, L. Estimating discharge in rivers using remotely sensed hydraulic information. *Journal of Hydrology*, v. 309, p. 191-209, 2005.

BJERKLIE, D.; BIRKETT, C.; JONES, J.; CARABAJAL, C.; ROVER, J.; FULTON, J. GARAMBOIS, P. Satellite remote sensing estimation of river discharge: Application to the Yukon River Alaska. *Journal of Hydrology*, v. 561, p. 1000-1018, 2018.

BLITZKOW, D.; DE MATOS, ACOG G; DO NASCIMENTO GUIMARÃES; COSTA, SMA. O conceito atual dos referenciais usados em Geodesia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63/5, p. 633-648, 2011.

BOERGENS, E.; DETTMERING, D.; SCHWATKE, C.; SEITZ, F. Treating the Hooking Effect in Satellite Altimetry Data: A Case Study along the Mekong River and its Tributaries. *Journal of Hydrology*, v. 8, 91, 2015.

BOERGENS, E.; DETTMERING, D.; SEITZ, F. Observing water level extremes in the Mekong River Basin: The benefit of long-repeat orbit missions in a multi-mission satellite altimetry approach. *Journal of Hydrology*, v. 570, p. 463-472, 2019.

BOGNING, S., FRAPPART, F., BLAREL, F., NIÑO, F., MAHÉ, G., BRICQUET, J.-P., SEYLER, F., ONGUÉNÉ, R., ETAMÉ, J., PAIZ, M.-C. et al.. Monitoring water levels and discharges using radar altimetry in an ungauged river basin: The case of the Ogooué. *Remote Sensing*, v.10, n. 350, 2018.

BONNEFOND, P., P. EXERTIER, O. LAURAIN, Y. MENARD, A. ORSONI, G. JAN, E. JEANSOU. Absolute calibration of Jason-1 and TOPEX/POSEIDON altimeters in Corsica. *Marine Geodesy*, v. 26, p. 261-284, 2003.

BONNEFOND, P.; P. EXERTIER; O. LAURAIN; GUILLOT, A.; PICOT, N.; CANCECET, M.; LYARD, F. SARAL/AltiKa Absolute Calibration from the Multi-Mission Corsica Facilities. *Marine Geodesy*, 38(S1), p.171-192, 2015.

BONNEFOND, P.; VERRON, J.; AUBLANC, J.; BABU, K.N.; BERGE-NGUYEN, M.; CANCECET, M.; CHAUDHARY, A.; CRETAUX, J.-F.; FRAPPART, F.; HAINES, B.J.; LAURAIN, O.; OLLIVIER, A.; POISSON, J.-C.; PRANDI, P.; SHARMA, R.; THIBAUT, P.; WATSON, C. The benefits of the Ka-Band as evidenced from the SARAL/AltiKa Altimetric mission: Quality assessment and unique characteristics of AltiKa data. *Remote Sensing*, 10, 83, 2018.

- BOSCH, W.; DETTMERING, D.; SCHWATKE, C.. Multi-Mission Cross-Calibration of Satellite Altimeters: Constructing a Long-Term Data Record for Global and Regional Sea Level Change Studies. *Remote sensing*, v.6, p. 2255-2281, 2014.
- BRÊDA, J. P. L. F. *Assimilação de Altimetria Espacial para Estimativa de Batimetria e Rugosidade Efetivas para Modelagem Hidrodinâmica*. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental / UFRGS. Porto Alegre, 2017.
- BRÊDA, J. P. L. F., PAIVA, R. C. D., BRAVO, J. M., PASSAIA, O. A., & MOREIRA, D. M. Assimilation of satellite altimetry data for effective river bathymetry. *Water Resources Research*. v. 55, p. 7441-7463, 2019.
- CALMANT, S.; SEYLER, F. Continental surface water from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*. v. 338. n. 14-15, p. 1113-1122, 2006.
- CALMANT, S.; SILVA, J.; MOREIRA, D.; SEYLER, F.; SHUM, J.; CRÉATAUX, J.; GABALDA, G.. Detection of Envisat RA2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS. *Advances in Space Research*, v. 51, p. 1151-1564, 2013.
- CBHSF – Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano decenal de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco–PBHSF (2004-2013). DF, Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA. 2004.
- CBHSF – Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano decenal de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco–PBHSF (2016-2025). DF, Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA. 2016.
- CCRS – CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. *Remote Sensing tutorials*. Disponível em: < <https://www.nrca.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>> Acesso em: jan. de 2020
- CHEN, T.; SONG, C.; KE, L.; WANG, J.; LIU, K.; WU, Q. Estimating seasonal water budgets in global lakes by using multi-source remote sensing measurements. *Journal of Hydrology*, v. 593, 2021.
- CHENG, K.; KUO, C.; TSENG, H.; YI, Y.; SHUM, C. K. Lake Surface Height Calibration of Jason-1 and Jason-2 Over the Great Lakes. *Marine Geodesy*, v. 33 (S1), p. 186–203, 2010.
- CHOW, V.T. *Open Channel Hydraulics*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1959.
- CIPOLLINI, P.; SNAITH, H. *A short course on Altimetry*. In: ESA Advanced training on ocean remote sensing, 3, 2013. Cork, Irlanda. Disponível em: < https://earth.esa.int/documents/10174/950521/01_Tuesday_OCT2013_Cipollini_Altimetry_1.pdf> Acesso em: fev. de 2020
- CLS – COLLECTE LOCALISATION SATELLITES. *Annual Performance Report for Sentinel-3 – Year 2018*. Mission Performance Centre, 2019.
- CNES – CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES. *SARAL/AltiKa Products Handbook* – CNES. ed. 2, ver. 4, 2013.

CNES – CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES. *How altimetry works*. Disponível em: <<https://cnes.fr/en/how-altimetry-works>> Acesso em: jan. de 2020.

CNES – CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES. *CNES Missions*. Disponível em: <<https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/space-agencies/cnes-missions>>. Acesso em: jul. de 2021.

COPERNICUS – *OpenHub*. Disponível em: <<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>> Acesso em: mar. de 2021

COSS, S.; DURAND, M.; YI, Y.; JIA, Y.; GUO, Q.; TUOZZOLO, S.; SHUM, C.; ALLEN, G. H.; CALMANT, S.; PAVELSKY, T. Global river radar altimetry time series (GRRATS): new river elevation earth science data records for the hydrologic community. *Earth System Science Data*, v. 12, p. 137–150, 2020.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (BRASIL). *Rede Hidrometeorológica Nacional*. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Apresentacao/Rede-Hidrometeorologica-Nacional---RHN-304.html>> Acesso em: dez. de 2019

CRÉTAUX, J.-F., BIRKETT, C., 2006. Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 338, p. 1098-1112, 2006.

CRÉTAUX, J.-F., CALMANT, S., ROMANOVSKI, V., SHABOUNIN, A., LYARD, F., BERGE-NGUYEN, M., CAZENAVE, A., HERNANDEZ, F., PEROSANZ, F. Na absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issyk-kul in Central Asia. *Journal of Geodesy*, 83, p. 723–735, 2009.

CRÉTAUX, J.-F., CALMANT, S., ROMANOVSKI, V., PEROSANZ, F., TASHBAEVA, S., BONNEFOND, P., MOREIRA, D., SHUM, C.K., NINO, F., BERGE-NGUYEN, M., FLEURY, S., GEGOUT, P., ABARCA DEL RIO, R., MAISONGRANDE, P. Absolute calibration of Jason radar altimeters from GPS kinematic campaigns over Lake Issykkul. *Marine Geodesy*, v.34, p.291–318, 2011.

CRÉTAUX, J.-F., BERGE-NGUYEN, M., CALMANT, S., ROMANOVSKI, V., MESSIGNAC, B., PEROSANZ, F., TASHBAEVA, S., ARSEN, A., FUND, F., MARTIGNANO, N., BONNEFOND, P., LAURAIN, O., MORROW, R., MAISONGRANDE, P., Calibration of Envisat radar altimeter over Lake Issykkul, *Advances in Space Research*, v. 51, n. 8, p. 1523–1541, 2013.

CRÉTAUX, J.-F., BERGE-NGUYEN, M., CALMANT, S., JAMANGULOVA, N., SATYLVKANOV, R., LYARD, F., PEROSANZ, F., VERRON, J., SAMINE MONTAZEM, A., LE GUILCHER, G. Absolute calibration or validation of the altimeters on the Sentinel-3 and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan). *Remote Sensing*, v.10, n.1679, 2018.

CRISP - CENTER FOR REMOTE IMAGING, SENSING & PROCESSING. *Microwave Remote Sensing*. Disponível em: <<https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/mw.htm>> Acesso em: jan. de 2020.

CTOH - Center for Topographic studies of the Ocean and Hydrosphere. *Data*. Disponível em: <<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/data>> Acesso em: mar. de 2021.

DETTMERING, D., SCHWATKE, C., BOERGENS, E., & SEITZ, F.. Potential of Envisat radar altimetry for water level monitoring in the Pantanal wetland. *Remote Sensing*, v. 8, n. 596, 2016.

DOMENEGHETTI, A.; MOLARI, G.; TOURIAN, M. J.; TARPANELLI, A.; BEHNIA, S.; MORAMARCO, T.; SNEEUW, N.; BRATHA, A. Testing the use of single- and multi-mission satellite altimetry for the calibration of hydraulic models. *Advances in Water Resources*, v. 151 (103887), 2021.

DOMINGUES, F. Com mais de 90% da transposição concluída, impactos ambientais no Rio São Francisco ainda são incertos. *GI*, 21 dez de 2019, Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/desafio-natureza/noticia/2019/12/21/com-mais-de-90percent-da-transposicao-concluida-impactos-ambientais-no-rio-sao-francisco-ainda-sao-incertos.ghtml> Acesso em: jul. de 2021.

EGIDO A., SMITH W. Fully Focused SAR Altimetry: Theory and Applications, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 55, n. 1, 2017.

EKEU-WEI, I.; BLACKBURN, G.; PEDRUCO, P. Infilling Missing Data in Hydrology: Solutions Using Satellite Radar Altimetry and Multiple Imputation for Data-Sparse Regions. *Water* 10, 1483. 2018.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. *Envisat Altimetry Level 2 User Manual*. 2011.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. *Sentinel-3 User Handbook*. 2013.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. *Mission navigator* Disponível em: < https://www.esa.int/ESA/Our_Missions >. Último acesso em: mar. de 2021 (a).

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. *OLTC – Altimeter Open loop tracking command for hydrology*. Disponível em: <https://www.altimetry-hydro.eu/> Acesso em: jul. de 2021(b).

FASSONI-ANDRADE, A. C.; FLEISCHMANN, A. S.; PAPA, F.; PAIVA, R. C.; WONGCHUIG, S.; MELACK, J. M.; MOREIRA, A. A.; PARIS, A.; RUHOFF, A.; BARBOSA, C. C. F. E ET AL. Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. *Reviews in Geophysics*, no prelo.

FRAPPART, F., CALMANT, S., CAUHOPÉ, M., SEYLER, F., CAZENAVE, A. Preliminary results of ENVISAT RA-2 derived water levels validation over the Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, v. 100, 252–264, 2006.

FRAPPART, F.; PAPA, F.; MARIEU, V.; MALBÉTEAU, Y.; JORDY, F.; CALMANT, S.; DURAND, F.; BALA; S. Preliminary assessment of SARAL/AltiKa observations over the Ganges-Brahmaputra and Irrawaddy Rivers. *Marine Geodesy*, n. 38, S1. 2015.

FREITAS, S.R.C.; BLITZKOW, D. (1999): Altitudes e geopotencial. *IGeS Bulletin – Special Issue for South America*, n. 9, 1999, p. 47-62.

GAO, Q., MAKHOUL, E., ESCORIHUELA, M. J., ZRIBI, M., SEGUÍ, P. Q., GARCÍA, P., & ROCA, M.. Analysis of retracker performances and water level retrieval over the Ebro river basin using Sentinel-3. *Remote Sensing*, v.11, n. 718, 2019.

GARAMBOIS, P., CALMANT, S., ROUX, H., PARIS, A., MONNIER, J., FINAUD-GUYOT, P., MONTAZEM, A., SILVA, J. Hydraulic visibility: Using satellite altimetry to parameterize a hydraulic model of an ungauged reach of a braided river. *Hydrological Processes*, v. 31, p.756–767, 2017.

GETIRANA, A. *Contribuições da Altimetria Espacial à Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias na Amazônia*. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2009.

GETIRANA, A.; BONNET, M.; CALMANT, S.; ROUX, E., ROTUNNO FILHO, O.; MANSUR, W. Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall–runoff modeling and spatial altimetry. *Journal of Hydrology*, v. 379, p. 205-219, 2009.

GETIRANA, A. Integrating spatial altimetry data into the automatic calibration of hydrological models. *Journal of Hydrology*, v. 387, p. 244-255, 2010.

GETIRANA, A.; ROTUNNO FILHO, O.; MANSUR, W.; BONNET, M.; SEYLER, F.; GUYOT, J.; FRAPPART, F.; MARTINEZ, J.; ROUX, E.; CALMANT, S.; RAMILLIEN, G.; XAVIER, L.; COLLISCHONN, W. Calibração e Validação de Modelo Hidrológico com Observações *in Situ*, Altimetria e Gravimetria Espaciais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V. 16 n.1, p. 29-45, 2011.

GLEASON, C. J.; SMITH, L. C.; J. LEE. Retrieval of river discharge solely from satellite imagery and atmany- stations hydraulic geometry: Sensitivity to river form and optimization parameters. *Water Resour. Res.*, v. 50, p. 9604–9619, 2014.

HAINES, B. J.; D. DONG, G. BORN, S. GILL. The Harvest experiment: Monitoring Jason-1 and Topex/Poseidon from a California offshore platform. *Marine Geodesy*, v. 26 (3–4), p. 239–259, 2003.

HAINES, B. J.; DESAI, S. D.; G. BORN,. The Harvest experiment: Calibration of the Climate Data Record from Topex/Poseidon, Jason-1 and the Ocean Surface Topography Mission. *Marine Geodesy*, v. 33 (S1), p. 91–113, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Serviços para posicionamento geodésico*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico.html>> Último acesso em: mai. de 2021.

JACCON, G.; CUDO, K. J. *Curva-chave: análise e traçado*. Brasília: DNAEE, 1989.

JARIHANI, A. A., CALLOW, J. N., JOHANSEN, K., & GOUWELEEUW, B. Evaluation of multiple satellite altimetry data for studying inland water bodies and river floods. *Journal of Hydrology*, v. 505 , p. 78-90. 2013.

JIANG, L., NIELSEN, K., DINARDO, S., ANDERSEN, O. B., & BAUER-GOTTWEIN, P. Evaluation of sentinel-3 sral sar altimetry over chinese rivers. *Remote Sensing of Environment*, v. 237, 2020.

JCGM - JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY - Working Group 1 (/WG 1). International Organization for Standardization (ISO). *Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*: Switzerland, 2008.

KITTEL, C. M. M., JIANG, L., TOTTRUP, C., & BAUER-GOTTWEIN, P. Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring - a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, n. 1, p. 333-357, 2021.

KLING, H.; FUCHS, M.; PAULIN, M.. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*. V. 424–425, p.264-277, 2012.

KOBLINSKY, C. J.; CLARKE, R. T.; , BRENNER, A. C.; FREY, H.. Measurement of river level variations with satellite altimetry *Water Resource Research*, v. 29 (6), p. 1839-1848, 1993.

KOURAEV, A.; ZAKHAROVA, E.; SAMAIN, O.; MOGNARD, N.; CAZENAVE, A. Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992–2002). *Remote Sensing of Environment*, v. 93, p. 238-245, 2004.

LEFAVOUR, G., ALSDORF, D., Water slope and discharge in the Amazon river estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model. *Geophysical Research Letters*, v. 32, 2005.

LEON, J. G., CALMANT, S., SEYLER, F., BONNET, M. P., CAUHOPÉ, M., FRAPPART, F., FILIZOLA, N., FRAIZY, P. Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro river based on satellite altimeter data and model discharges. *Journal of Hydrology*. v. 328. n. 3-4, 481-496, 2006.

LETTENMAIER, D. P.; ALSDORF, D.; DOZIER, J.; HUFFMAN, G. J.; PAN, M.; WOOD, E. F. Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resources Research*, v. 51 (9), 7309-7342, 2015.

MAILLARD, P.; CALMANT, S.. Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology. Proc. SPIE 8887. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystem, and Hydrology*. XV, 88870W, 2013.

MAILLARD, P.; BERCHER, N.; CALMANT, S.. New Processing approaches on the retrieval of water levels in Envisat and Saral radar altimetry over rivers: a case study of the São Francisco River, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, v. 156 p. 226-241, 2015.

MAILLARD, P.; PEREIRA, E. O. *Uma ferramenta para processar dados de altimetria por satélites para aplicações em Hidrologia*. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC. 2017.

MARKERT, K.; PULLA, S.; LEE, H.; MARKERTA, A.; ANDERSONA, E.; OKEOWOC, M.; LIMAYE, A. AltEx: An open source web application and toolkit for accessing and exploring altimetry datasets. *Environmental Modelling and Software*, v. 117, p. 164–175, 2019.

MARTINS, L.; PINTO, E.; MAILLARD, P. Evaluating the performance of four satellite altimetry missions through spatial and temporal interpolation of *in situ* data. *Journal of Hydrology*, submetido à publicação.

MCCABE, M. F.; RODELL, M.; ALSDORF, D. E.; MIRALLES, D. G.; UIJLENHOET, R. et al. The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and earth system sciences*. V. 21, p. 3879-3914. 2017.

MERTIKAS, S.; TRIPOLITSIOTIS, A.; CRAIG, D.; MAVROCORDATOS, C.; FÉMÉNIAS, P.; BORDE, F.; FRANTZIS, X.; KOKOLAKIS, C.; GUINLE, T.; VERGOS, G.; TZIAVOS, I.; CULLEN, R. The ESA Permanent Facility for Altimetry Calibration: Monitoring Performance of Radar Altimeters for Sentinel-3A, Sentinel-3B and Jason-3 Using Transponder and Sea-Surface Calibrations with FRM Standards. *Remote Sensing*, v.12, p. 2642, 2020.

MERTIKAS, S.; CRAIG, D.; FÉMÉNIAS, P.; MAVROCORDATOS, C.; GALANAKIS, D.; TRIPOLITSIOTIS, A.; FRANTZIS, X.; TZIAVOS, I.; VERGOS, G.; GUINLE, T.. Fifteen Years of Cal/Val Service to Reference Altimetry Missions: Calibration of Satellite Altimetry at the Permanent Facilities in Gavdos and Crete, Greece. *Remote Sensing*, v. 10, p.1557, 2018.

MERTES, L.; DEKKER, A.; BRAKENRIDGE, G.; BIRKETT, C.; LETOURNEAU, G.. Rivers and lakes. In: USTIN, SUSAN L.. *Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring*. New Jersey: Wiley, p.345-400, 2004.

MICHAILOVISKY, C., MILZOW, C., BAUER-GOTTWEIN, P. Assimilation of radar altimetry to a routing model of the Brahmaputra River. *Water Resources Research*, v. 49, p. 4807–4816, 2013.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). *Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco*. Secretaria de Recursos Hídricos. 148 p.. Brasília: MMA, 2006

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO (BRASIL). *São Francisco – Notícias 2011*. Disponível em: <
<https://web.archive.org/web/20111103005620/http://www.mi.gov.br:80/saofrancisco/noticias/index.asp>> Acesso em fev. 2020

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (BRASIL). *O Projeto*. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco/o-projeto>
Acesso em jul. 2021

MORAMARCO, T., BARBETTA, S., BJERKLIE, D. M., FULTON, J. W., & TARPANELLI, A. River bathymetry estimate and discharge assessment from remote sensing. *Water Resources Research*, v. 55. 2019.

MOREIRA, D. M. *Geodésia Aplicada Ao Monitoramento Hidrológico Da Bacia Amazônica*. 2016. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Altimetry application: operational*. Disponível em: < <https://www.nasa.gov/missions>> Acesso em: mar. de 2021

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Missions* Disponível em: < https://sealevel.jpl.nasa.gov/altapps/pubs_ops.htm> Acesso em: jan. de 2020

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

NEGREL, J.; BERCHER, N.; KOSUTH, P. Estimating river discharge from earth Observation measurement of river surface hydraulic variables. *Hydrology and Earth System Science*, v. 7, p. 7829-7861, 2010.

NIELSEN, K., ANDERSEN, O. B., & RANNDAL, H. Validation of Sentinel-3A Based Lake Level over US and Canada. *Remote Sensing*, v.12, n. 17, p. 2835, 2020.

NORMANDIN, C.; FRAPPART, F., DIEPKIL, E. A., MARIEU, V., MOUGIN, E., BLAREL, F., LUBAC, B., BRAQUET, N., & BA, A. Evolution of the performances of radar altimetry missions from ERS-2 to sentinel-3A over the inner niger delta. *Remote Sensing*, v. 10, n 833. 2018.

PAIL, R., FECHER, T., BARNES, D. ET AL. Short note: the experimental geopotential model XGM2016. *Journal of Geodesy*, v. 92, p. 443–451, 2018.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. & TUCCI, C. E. M.. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *Journal of Hydrology*, v. 406, p. 170-181, 2011.

PAIVA, R. C. D.. *Hidrologia da bacia Amazônica: Compreensão e previsão com base em modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto*. 2012. 167 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio de Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.P; GONÇALVES, L. G. G; CALMAN, S.; GETIRANA, A.; SILVA, J. S. Assimilação de dados in situ e de altimetria espacial para previsão hidrológica na bacia amazônica In: *Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, 20, 2013, Bento Gonçalves, RS, 2013a.

PAIVA R. C. D. et al., Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hidrology and Earth Systems Sciences*, Volume 17, p. 2929-2946. 2013b.

PAIVA, R. C. D. D. et al., Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, Volume 49, p. 1-18. 2013c.

PAIVA, R. C. D., DURAND, M. T. & HOSSAIN, F., 2015. Spatiotemporal interpolation of discharge across a river network by using synthetic SWOT satellite data. *Water Resources Research*, Volume 51, pp. 430-449, 2015.

PAIVA, R. C. D.; RUHOFF, A. Desafios na estimativa do ciclo hidrológico terrestre por sensoriamento remoto In: *Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, 22, 2017, Florianópolis, SC, 2017.

PARIS, A.; PAIVA, R.; SILVA, J.; MOREIRA, D.; CALMANT, S.; GARAMBOIS, P.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.; SEYLER, F. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. *Water Resources Research*, v. 52, p. 1944-7973, 2016.

PARRINELO, T.; SHEPHERD, J.; BOUFFARD, S.B.; CASAL, T.; DAVIDSON, M.; FORNARI, M.; MAESTRONI, E.; SCAGLIOLA, M.. CryoSat:ESA's ice mission.Eight years in space. *Advances in Space Research*. v.62, n.6, p.1178–1190, 2018.

PAVELSKY, T. M. et al., Assessing the potential global extent of SWOT river discharge observations. *Journal of Hydrology*, Volume 519, p. 1516-1525. 2014.

PEREIRA, E.; MAILLARD, P.; ABREU, L.. Altimetria por satélite radar aplicada a Hidrologia no Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69/2: p. 347-360. 2017.

PEREIRA, E.. *Altimetria por satélite radar na medição do nível d'água de rios de pequeno e médio porte: um estudo de caso no Rio São Francisco*. 2018. 233 f. Tese (Doutorado em Geografia – análise ambiental). Instituto de Geociências – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2018.

PEREIRA, S.; PRUSKI, F.; SILVA, D.; RAMOS, M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.11, n.6, p. 615-622. 2007.

PETIT, G.; LUZUM, B. IERS (2010): *IERS Conventions*, (eds.), IERS Technical Note n. 36, 179 p., 2010.

PÔSSA, E. *Sensoriamento Remoto de parâmetros hidráulicos geométricos para estimativas da vazão de um rio de médio porte*. 2020. 117f. Tese (Doutorado em Geografia – análise ambiental). Instituto de Geociências – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2020

PÔSSA, E.; MAILLARD, P. ; OLIVEIRA, L.. Discharge estimation for medium-sized river using multi-temporal remote sensing data, a case study in Brazil, *Hydrological Sciences Journal*, v. 65, 14, p. 2402-2418, 2020.

QUARTLY, G.D.; CHEN, G.; NENCIOLI, F.; MORROW, R.; PICOT, N. An Overview of Requirements, Procedures and Current Advances in the Calibration/Validation of Radar Altimeters. *Remote Sensing*, V 13, 125. 2021

ROSMORDUC, V., J. BENVENISTE, E. BRONNER, S. DINARDO, O. LAURET, C. MAHEU, M. MILAGRO, N. PICOT, A. AMBROZIO, R. ESCOLÀ, A. GARCIA-MONDEJAR, M. RESTANO, E. SCHRAMA, M. TERRA-HOMEM. *Radar Altimetry Tutorial*. 2018 Disponível em: <<http://www.altimetry.info/radar-altimetry-tutorial/>> Acesso em: out. de 2019

ROUX, E., CAUHOPÉ, M.; BONNET, M-P, CALMANT, S.; VAUCHEL, P.; SEYLER, F.. Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring. *Hydrological Sciences Journal*, v. 53 (1), 81-99. 2008.

ROUX, E., SANTOS DA SILVA, J., VIEIRA GETIRANA, A. C., BONNET, M.-P., CALMANT, S., MARTINEZ, J.-M. & SEYLER, F. Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry—comparative study. *Hydrol. Sci. J.* 55(1), 104–120, 2010.

SANTOS, I., FILL, H.D., SUGAI, M.R.B., BUBA, H., KISHI, R.T., MARONE, E., LAUTERT, L.F.C. *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 372, p. 2001

SANTILLAN, J.; SANTILLAN, M. M. Vertical accuracy assessment of 30-m resolution ALOS, ASTER, and SRTM global Dems over Northeastern Mindanao, Philippines. In: *XXIII ISPRS Congress*, V. XLI-B4, Prague, Czech Republic, 2016.

SARMIENTO, S. E., & KHAN, S. D.. Spatial-temporal variability of great slave lake levels from satellite altimetry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 7, p. 426-429, 2010.

SCHNEIDER, R., TARPANELLI, A., NIELSEN, K., MADSEN, H., & BAUER-GOTTWEIN, P.. Evaluation of multi-mode cryosat-2 altimetry data over the Po River against in situ data and a hydrodynamic model. *Advances in Water Resources*, v. 112 , p. 17-26, 2018.

SCHWATKE, C., DETTMERING, D., BÖRGENS, E., & BOSCH, W. Potential of Saral/Altika for inland water applications. *Marine Geodesy*, v. 38, p. 626-64, 2015.

SICHANGI, A. W.; WANG L.;HU Z. *Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: an initial study over the Yangtze river*. *Remote Sensing*. v.10, n.9, p. 1385-1406, 2018.

SILVA, A. E. S. *Estimativa das precisões absoluta e relativa de níveis de água fluviais obtidos do satélite altimétrico Jason-2 em bacias hidrográficas brasileiras*. 2010. 239 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, B. C.; TUCCI, C.E.M.; COLLISHONN, W.. Previsão de vazão com modelos hidrológicos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.11 , n.3, 2006.

SILVA, B. C.; TUCCI, C.E.M.; COLLISHONN, W.. Previsão hidroclimática de curto prazo na Bacia do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.12 , n.3, 2007.

SILVA, J. S. *Altimetria espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em Zonas úmidas da bacia Amazônica*. 2010. 279 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; ROTUNNO FILH, O.C.; COCHONNEAU, G.; MANSUR, W.J.. Water levels in the amazon basin derived from the ERS-2 and Envisat radar altimetry missions. *Remote sensing of environment*, v. 114, p. 2160-2181, 2010.

SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; RHASA, Team. Satellite Altimetry for Hydrology. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 20, 2013, Bento Gonçalves, RS.

SILVA, J. S.; CALMANT, S; SEYLER F.; MOREIRA, D.; OLIVEIRA, D.; ACHILES, M. Radar Altimetry aids managing gauge networks. *Water Resources Management*, v. 28, n.3, p.587-603, 2014.

SMITH, L. C., B. L. ISACKS, A. L. BLOOM, E A. B. MURRAY. Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery: Potential application to ungaged basins. *Water Resources Research*, v. 32, n. 7, p. 2021–2034, 1996.

SMITH, L. C. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological processes*, v. 11, n. 10, p. 1427–1439, 1997.

TANG Q.; GAO, H.; LU, H.; LETTENMAIER, D.. Remote sensing: hydrology. *Prog Phys Geog*, v. 33, p.490–509, 2009.

TARPANELLI, A.; SILVA, B.; BROCCA, L.; MORAMARCO, T.,. River Discharge Estimation by Using Altimetry Data and Simplified Flood Routing Modeling. *Remote Sensing*, v.5, n.9 p.4145-4162, 2013.

TARPANELLI, A.; AMARNATH, G.; BROCCA, L.; MASSARI, C.; MORAMARCO, T.,. Discharge estimation and forecasting by MODIS and altimetry data in Niger-Benue River. *Remote Sensing of Environment*, v. 195, p.96-106, 2017.

TOURIAN, M.J., SNEEUW, N., BARDOSSY, A., A quantile function approach to discharge estimation from satellite altimetry (ENVISAT). *Water Resources Research*, v. 49, n. 7, 4174–4186, 2013.

TOURIAN, M.; TARPANELLI, A.; ELMI, O.; BROCCA, L.; MORAMARCO, T.; SNEEUW, N. Spatiotemporal densification of river water level timeseries by multimission satellite altimetry. *Water Resources Research*, v.52, p. 1140-1159, 2016.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. v.1, 2. Ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. *Laboratório de Sensoriamento Remoto* (Instituto de Geociências) Disponível em: <http://www.igc.ufmg.br/index.php?option=com_content&view=article&id=550:laboratorio-de-sensoriamento-remoto-igc&catid=30&Itemid=151> Acesso em: jan. de 2020

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais - Laboratório de Sensoriamento Remoto – LABSere - *Satellite Water Gauging Application*. Disponível em: http://www.igc.ufmg.br/index.php?option=com_content&view=article&id=550:laboratorio-de-sensoriamento-remoto-igc&catid=30&Itemid=151#downloads Acesso em: mai. de 2021

UNC - UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA. Department of Physics and Astronomy. *Introduction to Measurements & Error Analysis*. 2011. Disponível em: <https://www.webassign.net/question_assets/unccolphysmech11/measurements/manual.pdf> Acesso em: mai. de 2021.

USGS. SRTM. Disponível em <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects> Acesso em: mai de 2021

UUEMAA, U.; AHI, S.; MONTIBELLER, B, MURU, M; KMOCH, A. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing*, v. 12, 3482, 2020.

VERRON, J., BONNEFOND, P., AOUF, L., BIROL, F., BHOWMICK, S., CALMANT, S., CONCHY, T., CRÉTAUX, J.-F., DIBARBOURE, G., DUBEY, A. et al. The benefits of the Ka-band as evidenced from the Saral/Altika altimetric mission: Scientific applications. *Remote Sensing*, v.10, n.163, 2018

WATSON, C.; WHITE, R.N.; COLEMAN, R.; CHURCH, J.; MORGAN, P.; GVIND, R. Topex/Poseidon and Jason-1: absolute calibration in Bass Strait Australia. *Marine Geodesy*, v. 27 (1–2), p. 107–131, 2004.

WATSON, C.; WHITE, N.; CHURCH, J.; BURGETTE, R.; TREGONING, P.; COLEMAN, R. Absolute calibration in bass strait, Australia: TOPEX, Jason-1 and OSTM/Jason-2. *Marine Geodesy*, v. 34, p. 242–260, 2011.

WARREN, M. Integração de sensoriamento remoto e modelos hidrológicos para a estimativa da evapotranspiração: Uma revisão bibliográfica. *GEOUSP- Espaço e Tempo*. n. 35, p. 143-159, 2013.

ZINGERLE, P.; PAIL, R; GRUBER, T.; OIKONOMIDOU, X. The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94:66, 2020.

APÊNDICE 1 – Artigo apresentado no XXIII SBRH

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

USO DE DADOS DE RADAR ALTIMÉTRICO DO SATÉLITE CRYOSAT PARA OBTENÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DO RIO SÃO FRANCISCO

Luana K. L. A. Martins¹; Philippe Maillard²; Eber J. A. Pinto³

RESUMO – A utilização de diferentes tipos de produtos de sensoriamento remoto em hidrologia já é uma realidade. A altimetria espacial é um desses produtos. Os radares altimétricos são equipamentos a bordo de missões espaciais que permitem a obtenção do nível de um ponto na superfície, especialmente nos oceanos ou gelo. O uso de dados de altimetria nos recursos hídricos continentais envolve desafios, como a frequência de passagem do satélite, o tratamento e processamento dos dados, especialmente para rios de porte menor. O satélite Cryosat foi lançado em 2010 e continua em operação, possuindo um ciclo de 369 dias e subciclos de 30 dias, o que o difere notoriamente das demais missões altimétricas. No presente trabalho apresenta-se um possível uso dos dados altimétricos do satélite Cryosat na obtenção do perfil do rio São Francisco. Os dados obtidos foram comparados aos dados da missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) e de algumas estações fluviométricas da ANA instaladas na calha do rio São Francisco, considerando o período de cheia e de seca. Os resultados demonstram o potencial de uso dos dados do Cryosat para obtenção de variáveis hidrologicas ao longo do curso d'água, graças à elevada resolução espacial deste satélite.

ABSTRACT– The use of different types of remote sensing products in Hydrology is already a reality, including the spatial altimetry data. Radar altimeters are instruments carried on space missions that allows to observe heights, especially in ocean or ice. The use of altimetry data on continental waters brings many challenges, such as the revisit frequency of satellite overpasses, data handling and processing, especially for medium size rivers. The Cryosat satellite was launched in 2010 and still work, has a 369-day cycle and 30-day subcycle, which may differ markedly from other altimetric missions. In this paper is showed a possible use of the altimetric data from Cryosat satellite to derive the profile of Sao Francisco river. The data were compared with the SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) and some ANA fluviometric stations located in São Francisco river, considering the flood and dry seasons. The results demonstrate the potential of using the Cryosat data to obtain hydrological variables along the watercourse, due to a high spatial resolution of this satellite.

Palavras-Chave – altimetria espacial, satélite Cryosat, rio São Francisco

¹ CPRM – Av. Brasil 1731, Funcionários-Belo Horizonte/MG, CEP 30.140-002. Tel: 3878-0307 luana.martins@cprm.gov.br;

² Instituto de Geociências - UFMG-Av. Antônio Carlos 6627- Belo Horizonte/MG CEP 31.270-901 philippe.maillard@yahoo.com.br;

³ CPRM – Av. Brasil 1731, Funcionários-Belo Horizonte/MG, CEP 30.140-002. Tel: 3878-0307 eber.andrade@cprm.gov.br;

INTRODUÇÃO

A geração de dados hidrológicos básicos como séries históricas de níveis e de chuva, medições de vazão e cálculo de declividades são essenciais para acompanhar a situação da bacia hidrográfica, assim como para elaboração de estudos que permitam aprimorar sua compreensão e representação. A instalação e manutenção de uma rede de monitoramento convencional é uma atividade complexa e que envolve elevados custos. É necessária a atuação de equipes capacitadas, utilização de equipamentos especializados e calibrados, bem como aquisição de dados numa frequência e período adequados visando a geração de dados de qualidade (ROUX *et al.*, 2008).

Mediante os desafios da produção de dados hidrológicos convencionais, a utilização de dados obtidos por sensoriamento remoto na Hidrologia já é considerada uma fonte complementar e/ou alternativa. A utilização de dados de satélite de observação da Terra permite uma visualização da superfície em escala continental, de forma homogênea, contínua e frequente, com detalhamento espacial e temporal diferenciado em relação às redes de monitoramento convencionais. (COSTI, 2012; TARPANELLI, 2015).

A altimetria por satélite teve início com foco na obtenção dos níveis dos oceanos, calotas polares e gelo de mar, e ainda é hoje o objetivo principal do lançamento dessas missões. Getirana (2009) argumenta que a aplicação de altimetria espacial a águas continentais foi iniciada de forma tardia em relação ao lançamento do primeiro radar altimétrico (Skylab em 1973) e é ainda mais recente o uso combinado de dados altimétricos e modelagem hidrológica. Contudo, a acurácia dos dados altimétricos averiguada em missões mais recentes e os resultados convincentes obtidos em estudos anteriores sugerem que estes dados podem ser empregados em análises hidrologicas e hidráulicas (TAPANELLI, 2015).

A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento do radar altimétrico do CryoSat-2. Os radares altimétricos instalados a bordo de diferentes missões espaciais emitem impulsos em direção ao nadir e captam o eco refletido pela superfície (solo, gelo ou água). A análise do eco (ou forma de onda) permite extrair uma medida muito precisa do tempo de trajeto entre o satélite e a superfície. Considerando-se a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas emitidas, o tempo de trajeto é transformado em distância. Essa distância é subtraída da altura do satélite e então se obtém o nível da superfície relativa ao elipsóide de referência. Na sequência o dado obtido é corrigido considerando fatores tais como a propagação da onda eletromagnética através da atmosfera e ionosfera e a maré terrestre.

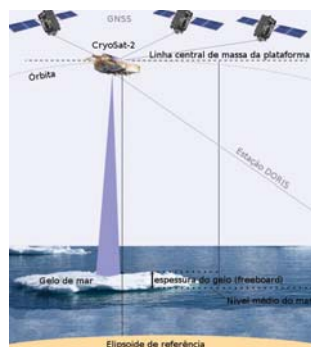


Figura 1 – Princípio de funcionamento dos radares altimétricos

Os satélites sobrevoam o mesmo traço em intervalos fixos chamados ciclos repetitivos ou tempo de revisita que são tipicamente entre 10 a 35 dias. Os ciclos dependem dos parâmetros pré-definidos pela órbita em função dos objetivos centrais da missão. Assim, a frequência de obtenção dos dados de altimetria espacial pode ser apontada como uma desvantagem, considerando que nas estações *in situ* a obtenção do dado de nível é diária, através de observador (2 leituras por dia, às 7h e às 17h) ou sensores automáticos (registro contínuo). Por outro lado, os satélites monitoram áreas nunca monitoradas pelas estações *in situ*. A utilização de várias missões promete melhorar esse ponto.

Dentre as vantagens do emprego dos dados de satélite vale destacar a economia de gastos de aquisição e instalação de novos equipamentos, bem como dos custos operacionais de leituras diárias ou deslocamento de equipes para realização de medições e manutenções, sendo que em alguns locais o acesso é extremamente complicado e perigoso ou até mesmo inviável. Outro ponto diferencial é o fato de que as estações planimétricas são niveladas utilizando uma referência local, já as informações obtidas com satélite fornecem dados altimétricos com referência a um sistema único e global de elipsoides, tal como o WGS84. Tal fato viabiliza o cálculo da declividade da linha d'água entre pontos de um curso d'água (Getirana, 2009; Leon *et al.*, 2006). Este último, de posse da declividade e outros parâmetros obtidos por satélite, procedeu ao cálculo do coeficiente de Manning obtendo valores compatíveis com os encontrados na literatura.

A tabela a seguir apresenta as principais missões (concluídas, em curso e futuras) com altímetros a bordo e o respectivo período em órbita, bem como o tempo de revisita. As informações foram obtidas dos sites da NASA (National Aeronautics and Space Administration) e da AVISO (Archivage, Validation and Interprétation des données des Satellites Océanographiques).

Nome da missão	Responsável	Data de lançamento	Data de fim da missão	Tempo de revisita (dias)
Geosat	ESA/NOAA	mar/85	nov/86	23
		nov/86	ian/90	17
ERS-1	ESA	jul/91	jun/96	35
T/P	ESA	ago/92	out/05	10
ERS-2	ESA	abr/95	jul/11	35
GFO	ESA	fev/98	nov/08	17
Jason 1	ESA	dez/01	fev/12	10
Envisat	ESA	mar/02	out/10	35
		out/10	abr/12	30
ICESAT1	NASA	jan/02	out/09	91
Jason 2	ESA	jun/08	-	10
Cryosat-2	ESA	abr/10	-	369
SARAL	ESA	fev/13	-	35
Jason 3	ESA	ian/16	-	10
Sentinel 3A	ESA	mar/16	-	27
Sentinel 3B	ESA	2017	-	27
Sentinel 3C	ESA	até 2020	-	27
Sentinel 6	ESA	2020	-	10
ICESAT2	NASA	2018	-	91
SWOT	ESA/CNES	2021	-	21

OBJETO DE ESTUDO

O objetivo do presente trabalho é obter o perfil do rio São Francisco a partir de dados de altimetria espacial. Considerando as características das missões altimétricas optou-se pela utilização dos dados do satélite Cryosat, especialmente a sua capacidade de cobertura extensa.

O primeiro satélite Cryosat foi perdido numa falha no foguete durante seu lançamento em Outubro de 2005. O Cryosat-2 foi lançado em 08/04/2010 e opera ainda hoje, com objetivo central de observação dos polos e monitoramento da espessura de camadas de gelo continental e marítimo (*freeboard*). Seu altímetro intitulado Sival opera na banda-Ku (1,67-2,40cm) em três modos diferentes: baixa resolução (LRM- low resolution mode, altímetro nadir com operação limitada por pulso convencional), modo SAR (Synthetic Aperture Radar - radar de abertura sintética) que utiliza os princípios do efeito doppler para melhorar a resolução longitudinal dos dados e o modo SARin (modo SAR interferométrico), que além do efeito doppler utiliza um segundo canal de recepção para cálculo do ângulo de chegada do eco que retorna para o satélite. Além da operação em modo SAR outro diferencial do Cryosat é sua densa cobertura espacial propiciada pela inclinação de 92° com um ciclo "quase" repetitivo de 369 dias e subciclos de 30 dias (AVISO, 2019; PARRINELLO, 2018).

O objeto de estudo é o Rio São Francisco cuja bacia ocupa uma área de 639.219km², correspondente a 7,5% do território nacional e abrangendo as mais variadas características fisiográficas e climáticas, carregando para região semiárida do país um volume significativo de água. Devido a seu elevado potencial hídrico há uma série de aproveitamentos hidroelétricos instalados na calha do São Francisco. (CBH SÃO FRANCISCO, 2019).

Na Figura 2 é possível visualizar os traços do Cryosat 2 que interceptam o rio São Francisco para os três primeiros ciclos, pois a imagem ficaria ilegível acrescentando todos os ciclos. A despeito do elevado tempo de revisita (369 dias), as configurações de ciclo e subciclos do Cryosat propiciam uma densa cobertura espacial, gerando um volume significativo de dados de nível do curso d'água em diferentes pontos e datas. Apesar de os dados serem obtido em dias diferentes, a informação gerada tem grande valor, sobretudo em cursos d'água cuja alteração de nível tem amplitude limitada. A partir do perfil do curso d'água é possível estimar a declividade da linha d'água, que é um parâmetro essencial para estudos hidráulicos e hidrológicos, mas de difícil obtenção (demanda trabalhos de campo onerosos).



Figura 2 – Traços do Cryosat para os ciclos 1 (vermelho), 2 (verde) e 3 (roxo)

METODOLOGIA

Os dados do Cryosat foram obtidos do banco de dados da Agência Espacial Européia (ESA) e foram processados no software SWG – Satellite Water Gauging para obtenção dos níveis do rio São Francisco nos pontos de cruzamento dos trackers. O período de dados compreendeu o período de out/2010 a fev/2017 e o trecho do rio São Francisco que vai do Reservatório de Três Marias a sua foz, totalizando cerca de 2000 km de extensão.

O SWG é uma ferramenta de código aberto com três opções metodologias de processamento de dados de altimetria por satélite para obtenção do nível de água, permitindo a criação de estações hidrológicas virtuais (VHS), baseado nos trackers dos satélites e polígonos de cursos d'água, ambos

inseridos como shapefiles (Maillard, 2017). Devido a grande quantidade de dados o processamento foi feito utilizando a opção 'Create multiple VHS', conforme Figura 3.

Para uma comparação inicial toda a série de dados do Cryosat gerada foi plotada junto com o perfil do rio obtido resultante dos dados da missão SRTM através da opção 'Process river profile with SRTM' do SWG.

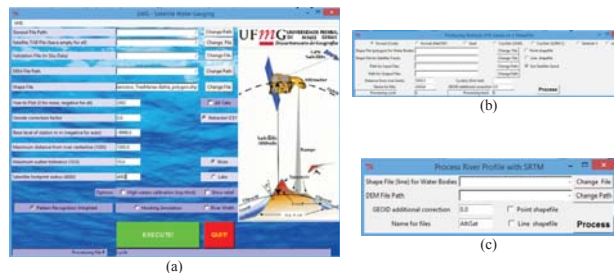


Figura 3 – (a) Interface do SWG e telas de (b) criação de múltiplas estações e (c) perfil do rio com SRTM

Posteriormente, os dados gerados foram separados em período seco (Abril a Setembro) e chuvoso (Outubro a Março) e plotados com os dados das estações fluviométricas da ANA (Agência Nacional de Águas), operadas pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) situadas na calha do São Francisco. A análise se limitou as estações para as quais há nivelamento altimétrico, possibilitando assim a comparação dos níveis monitorados com os níveis do satélite referenciados no elipsoide (WGS84).

Tabela 1 – Níveis médios das estações fluviométricas utilizadas na comparação com dados Cryosat, período de out/2010 a fev/2017

Nome estação	Código	Níveis médios no período (m)		Diferença entre período seco e chuvoso (m)
		Período seco	Período chuvoso	
Piraporã	41135000	471,14	471,29	0,15
Cachoeira da Manteiga	42200000	449,50	450,54	1,04
São Romão	43200000	446,25	447,15	0,90
São Francisco	44200000	440,44	441,53	1,09
Pedra Maria Cruz	44290002	433,74	434,93	1,19
Manga	44500000	422,43	423,55	1,12

RESULTADOS

A série obtida com os dados do Cryosat se estendeu do dia 24/10/2010 a 28/02/2017, totalizando 2843 dados de nível em diferentes pontos de cruzamento no rio São Francisco. A Figura 4(a) apresenta a análise quantitativa de dados que apresentaram erro nas informações de coordenadas e/ou altitude, bem como outliers extremos (diferença maior que 100m do SRTM), identificados visualmente no gráfico na região do reservatório de Três Marias foram obtidas altitudes negativas de até 9.8m para pontos na região da foz, onde há interferência dos ventos (provocando ondas que modificam a resposta especular da água calma) e marés que podem comprometer o eco recebido pelo altímetro. De maneira semelhante acredita-se que os outliers no reservatório de Três Marias possam ser em decorrência dos ventos no espelho d'água do reservatório. Já os erros nas coordenadas podem ser decorrentes de informações faltantes do arquivo de dados do satélite, o que compromete o processamento pelo SWG.

Os dados com os erros acima descritos foram removidos resultando numa série de 2661 dados consistidos, ou seja, 93,6% de aproveitamento dos dados. Procedeu-se também a uma análise da disponibilidade temporal dos dados do Cryosat, sendo o resultado resumido na Figura 4(b). Nota-se que para o período de aproximadamente 76 meses, em 53% dos dias o Cryosat cruzou o São Francisco. Analisando as sequências de dias sem dados, observa-se que ocorreu com maior frequência a passagem do Cryosat, em pelo menos um ponto do rio São Francisco, a cada dois dias. Percebe-se que de maneira cíclica há uma sequência de 24 a 28 dias de falha nos dados, que coincide com o final dos ciclos de 369 dias do Cryosat, geralmente no mês de janeiro.

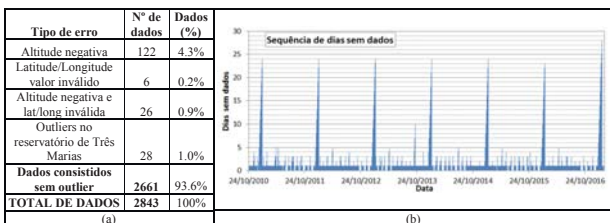


Figura 4 – Análise dos dados do Cryosat: (a) tipos de erros identificados e (b) sequência de dias sem dados

A Figura 5 apresenta o perfil longitudinal obtido considerando toda a série de dados consistidos do Cryosat e os dados da missão SRTM. De maneira geral, tanto com os dados do SRTM quanto do Cryosat é possível identificar a localização dos reservatórios ao longo do rio São Francisco, sobretudo o de Três Marias e Itaparica (conhecido como Luiz Gonzaga). Na maior parte

do perfil os dados do Cryosat estão abaixo dos obtidos pelo SRTM, contudo a partir da região do reservatório de Itaparica e Complexo Paulo Afonso até a foz, os dados do Cryosat estão acima do SRTM. Tal alteração pode ser em decorrência da topografia e cobertura vegetal das margens neste trecho do rio São Francisco, sobretudo considerando que no Brasil (exceto Pantanal e Amazônia) o Cryosat opera no modo de baixa resolução. Conforme descrito por Maillard *et al* (2015), fatores ambientais como sinuosidade do curso d'água, classe de cobertura do solo e topografia nas margens, podem comprometer a obtenção dos dados pelo altímetro sendo por vezes mais limitantes que a largura do rio.

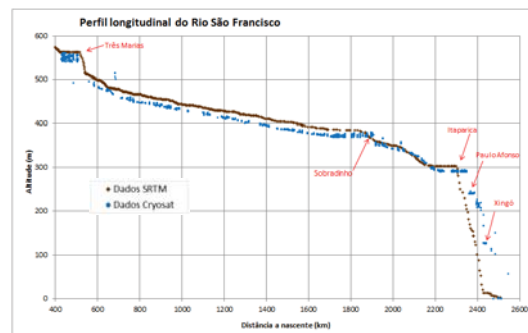


Figura 5 – Perfil longitudinal do rio São Francisco com dados do Cryosat e do SRTM

A Figura 6 apresenta a comparação dos dados do Cryosat com os dados obtidos para as estações *in situ* no período da cheia e a Figura 7 da seca. Em ambas as figuras os dados do Cryosat se aproximaram dos valores médios dos níveis nas estações, não havendo uma distinção significativa entre o período seco e chuvoso. Em decorrência da regularização promovida pelo reservatório de Três Marias a diferença dos níveis médios nas estações a jusante para seca e cheia não é significativa, conforme Tabela 1 acima. Conforme dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da ANA, o reservatório de Três Marias apresentou nível médio de 561,3m, mínimo de 550,3m e máximo de 572,3m no período analisado. Os dados do Cryosat oscilaram de 540,2m a 562,8m na região do reservatório (desconsiderando alguns outliers) demonstrando uma tendência de subestimar o nível do mesmo.

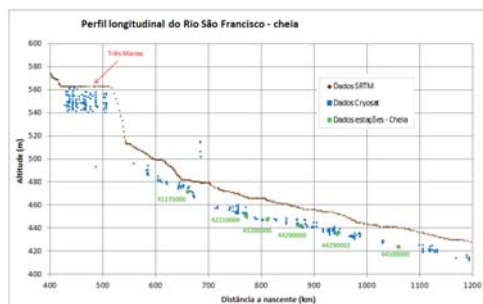


Figura 6 – Dados do Cryosat, SRTM e das estações in situ para o período de cheia



Figura 7 – Dados do Cryosat, SRTM e das estações in situ para o período de seca

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há inúmeras possibilidades de uso dos dados de satélite na Hidrologia. Conforme descrito por Calmant e Seyler (2006), ainda que as missões espaciais não tenham sido lançadas com objetivo principal em Hidrologia, a altimetria de satélite forneceu ao longo das últimas décadas uma série de dados que podem ser utilizados para geração de produtos hidrológicos. Contudo, grande parte dos esforços tem sido direcionada a estudos dos grandes sistemas hídricos, majoritariamente a Bacia Amazônica, que conforme Getirana (2009) se tornou um verdadeiro celeiro de modelos

hidrológicos para grandes bacias e validação de dados de sensoriamento remoto. Assim, permanece o desafio de utilização de dados de altimetria espacial em cursos d'água de porte médio como o Rio São Francisco.

O satélite Cryosat possui ciclo de 369 dias, mas os subciclos de 30 dias permitem aplicação dos dados de altimetria na estimativa de variáveis hidrológicas ao longo dos cursos d'água, demandando interpolação espacial e temporal. A aderência dos dados do Cryosat aos níveis médios das estações fluviométricas aqui apresentada sinaliza o potencial de utilização destes dados. A declividade da linha d'água é uma das variáveis hidrológicas essenciais para modelagem hidrológica e hidráulica e de difícil obtenção, demandando extensos levantamentos em campo haja vista que os dados disponibilizados pelas instituições que realizam monitoramento não permitem uma estimativa, por terem referência local.

Os erros e desvios aqui identificados, tal como a tendência a subestimar os níveis do reservatório de Três Marias, devem ser mais profundamente analisados, pois caso se trate de um erro sistemático, por exemplo, o dado pode ser ajustado e mais amplamente utilizado.

REFERÊNCIAS

- ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA. Hydroweb – Séries históricas. Disponível em <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>> Acesso em: abr. 2019.
- AVISO - Archiving, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques. (2016). Missions. Disponível em: <<http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions.html>> Acesso em: nov. 2016
- CALMANT, S. and SEYLER, F. (2006). Continental surface water from satellite altimetry. Comptes Rendus Geosciences 338(14-15):1113-1122, 2006.
- CBH São Francisco. A bacia. Disponível em <<http://cbhsaofrancisco.org.br/>>. Acesso em abr. 2019
- COSTI, A. C. Z. Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite Envisat na bacia Amazônica. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- GETIRANA, A. C. V.. Contribuições da Altimetria Espacial à Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias na Amazônia. 2009. 273 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- LEON, J. G., CALMANT, S., SEYLER, F., BONNET, M. P., CAUHOPE, M., FRAPPART, F., FILIZOLA, N., FRAIZY, P. (2006). Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro river based on satellite altimeter data and model discharges. J. Hydrol., 328 (3-4), 481-496.
- MAILLARD, P.; BERCHER, N.; CALMANT, S. New Processing approaches on the retrieval of water levels in Envisat and Saral radar altimetry over rivers: a case study of the São Francisco river, Brazil. Remote sensing of Environment. 156 p. 226-241, 2015
- MAILLARD, P.; PEREIRA, E. O. Uma ferramenta para processar dados de altimetria por satélites para aplicações em Hidrologia. 2017. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, SC.
- PARRINELO, T.; SHEPHERD, J.; BOUFFARD, S.B.; CASAL, T.; DAVIDSON, M.; FORNARI, M.; MAESTRONI, E.; SCAGLIOLA, M. CryoSat: ESA's ice mission – Eight years in space. Advances in Space Research. 62 p. 1178–1190, 2018.
- ROUX, E., CAUHOPE, M.; BONNET, M-P, CALMANT, S.; VAUCHEL, P.; SEYLER, F.. Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring. Hydrological Sciences Journal, 53 (1), 81-99, 2008.
- TARPANELLI, A.; SILVA, B.; BROCCA, L.; MORAMARCO, T.. River Discharge Estimation by Using Altimetry Data and Simplified Flood Routing Modeling. Remote Sens. 5, p.4145-4162, 2015.

APÊNDICE 2 – Artigo publicado na Revista Brasileira de Recursos Hídricos

https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210069

Análise da qualidade de séries de nível d'água obtidas por satélite radar altimétrico ao longo do Rio São Francisco

Quality analysis of water level series obtained by altimetric radar satellite along the São Francisco River

Luana Kessia Lucas Alves Martins¹, Philippe Maillard¹, Eber José de Andrade Pinto² & Daniel Medeiros Moreira³

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil
²Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Belo Horizonte, MG, Brasil
³Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: luana.kessia10@gmail.com (LKLAM), philippemaillard@yahoo.com.br (PM), eber.andrade@cprm.gov.br (EJAP), daniel.moreira@cprm.gov.br (DMM)

Received: May 17, 2021 - Revised: July 07, 2021 - Accepted: July 08, 2021

ABSTRACT

Radar altimeters are instruments carried on space missions and allow for determination of heights, particularly in oceans and ice sheets. The use of altimetry data on continental waters involves several challenges, such as the revisit frequency (typically 27 to 35 days), an accuracy of decimeters, data handling and processing, particularly for narrow rivers such as the São Francisco River (width <1km). Radar altimetry has advantages over the conventional *in situ* monitoring network, including in terms of spatial coverage and global altimetric reference of data. Thus, altimetry data should be used as a complementary and/or alternative source to *in situ* data. In this context, this study consolidates and evaluates the altimetric series of five different altimetry missions: Envisat in two orbits, Saral, Sentinel 3-A, and Sentinel 3-B. The altimetry water level time series of 17 Virtual stations were compared with leveled gauging stations series to calculate absolute and relative errors. Ultimately, the errors varied from 0.13 m to 0.36 m in the best cases (41%), in line with recent literature. Sentinel-3 satellites showed the best RMSE/absolute/relative results: 0.95/0.49 m (S-3A) and 0.96/0.52 m (S-3B). The second best RMSEs was Envisat-X (1.39/0.50 m), then Envisat (1.87/0.56 m) and Saral (1.74/0.60 m).

Keywords: Satellite altimetry; Absolute error; Water level time series; São Francisco river; Sentinel-3.

RESUMO

Radares altimétricos são equipamentos que permitem a obtenção da elevação da superfície, especialmente nos oceanos ou geleiras. O uso de dados de altimetria em cursos d'água continentais envolve desafios metodológicos, como a frequência de passagem do satélite (27 a 35 dias tipicamente), acurácia de decímetros, manipulação e processamento dos dados, especialmente para rios mais estreitos (largura < 1 km) como o Rio São Francisco. A altimetria por satélite radar propicia ganhos como a cobertura espacial e referência altimétrica global dos dados, que seriam impensáveis para a rede de monitoramento fluviométrico *in situ* convencional. Assim, os dados altimétricos deveriam ser usados como uma fonte complementar e/ou alternativa aos dados *in situ*. Neste contexto, este trabalho se propõe a consolidar e avaliar séries altimétricas de cinco diferentes missões: Envisat nas duas órbitas, Saral, Sentinel 3-A e Sentinel 3-B. Para análise do desempenho dos altímetros, 17 séries de nível d'água foram comparadas aos dados de estações fluviométricas niveladas viabilizando o cálculo do erro absoluto e relativo. Os erros encontrados são comparáveis aos encontrados na literatura, variando entre 0.13 m a 0.36 m nos melhores casos (41%). Os satélites Sentinel-3 apresentaram os melhores resultados de RMSE absoluto/relativo: 0.95/0.49 m (S-3A) e 0.96/0.52 m (S-3B). Na sequência, Envisat-X (1.39/0.50 m), Envisat (1.87/0.56 m) e Saral (1.74/0.60 m).

Palavras-chave: Altimetria por satélite; Erro absoluto; Séries de nível d'água; Rio São Francisco; Sentinel-3.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1/11

INTRODUCTION

The generation of basic hydrological data, such as the time series of water levels and rainfall and measurements of waterway flow and slope, is essential for monitoring and characterizing hydrographic basins. The installation and maintenance of systems for monitoring water resources is complex and expensive, requiring specialized teams, calibrated equipment, and uninterrupted data collection to ensure high-quality data.

In Brazil, the National Water Agency (Agência Nacional das Águas - ANA) manages the National Hydrometeorological Network (Rede Hidrometeorológica Nacional - RHN), which includes private and public entities such as the Mineral Resources Research Company (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM) that manages most stations across the country. Maintaining and operating a network with several actors in a large country such as Brazil is challenging. The number of stations is low in some regions such as the Amazon, where hydrological data collection can take up to one year.

Given the challenges of generating conventional hydrological data, remote sensing data are a complementary and/or an alternative source of information in hydrology (Lettenmaier et al., 2015). Earth observation satellite data allow for the consistent, continuous, and repeated visualization of the continental surface, and the spatial coverage in this case is higher than that in the case of conventional monitoring networks (McCabe et al., 2017).

Satellite radar altimetry can provide valuable data for hydrological and hydraulic studies (Domeneghetti et al., 2021). Although space missions involving radar altimetry aim to obtain data on ocean levels, polar caps, and sea ice, studies conducted for approximately three decades have demonstrated the feasibility of using altimetry in continental waters, particularly in large lakes and rivers (Chen et al., 2021). The Amazon Basin is a reference for the validation of altimetry data owing to its worldwide importance, difficult access, large extension and large width of watercourses, in which case a high volume of hydrological data can be obtained through remote sensing (Nielsen et al., 2020; Moreira, 2016).

The use of satellite data can reduce the costs of purchasing and installing new equipment, the operational costs of performing daily readings, and the costs involved in transportation of crews conducting measurements in various locations, including in complex and dangerous places or areas with limited access. Furthermore, satellite altimetry data uses a global datum such as WGS84, as reference, directly providing absolute water levels. (Sichangi et al., 2018; Calmant et al., 2013).

Altimetry satellites commonly use repeat orbit, meaning they overfly the same ground position at fixed time intervals, known as revisit times, which vary from 10 to 35 days. The frequency of collection of altimetry data is lower than that of automatic data collection equipments (usually collection time intervals of a minute) and the daily readings conducted by RIN observers (collection at 07h00min and 17h00min). Such a limitation can be reduced using a multi-mission approach when constructing time series with data obtained from several altimetry missions, with tracks covering the same cross-sections or surroundings. (Jarhani et al., 2013; Tourian et al., 2016). Especially in large rivers, with widths of kilometers, the extensive areas of water surface provide a large amount of satellite altimetry data. In medium and

small rivers this approach can be more limited, depending on the number of missions used and the availability of data close enough to be considered as having the same cross-section. Furthermore, depending on the angle at which the satellite track crosses the river, a greater or lesser number of altimetry measurements can be achieved. Rivers parallel to the equator are more favorable, since the direction of the tracks is generally SSE-NNW and NNE-SSW. Ground tracks over river sections are known as virtual stations (VSs). VS data are compared with data from nearby gauging stations (GSs) to estimate the accuracy of altimetry time series and reduce errors resulting from the slope of waterways. Despite of the recent evolution of altimeters the accuracy of its measurements is in the decimeter range (Normandin et al., 2018).

The datum of the gauging stations, usually an arbitrary chosen for convenience, consequently gauging time series values are referenced to this local datum, also called the gauge zero. Most studies on the quality of satellite time series compare altimetry data (global datum) with data from GSs (arbitrary datum plane), so both data are adjusted using measures of central tendency of the series (usually mean). This results in an optimistic error values because with the adjustment only the fluctuations or anomalies are compared, not the absolute errors (Berber, 2008; Jarhani et al., 2013). A VS rarely coincides with the location of a GS, and consequently there is a difference in level between them. Ideally, leveling to obtain absolute altitudes (global datum) should be performed at VSs. Moreover, factors such as alterations of the morphodynamics of the cross-section and the existence of tributaries between the VSs and GSs should be considered.

Another limiting factor to be considered when using satellite altimetry data is the width of watercourses. Most radar altimetry studies have focused on large water bodies. The use of altimetry in narrower rivers is limited by the along track resolution (typically 300 m). This topic is best discussed in the results section of this paper.

Under this context, this study assesses the quality of satellite altimetry time series along the São Francisco River, with an average width <1 km in most of its course. For this purpose, 12 leveled GSs along the river were selected to compare with VSs and calculate absolute errors in time series, discussing the possible causes of these errors. The altimetry time series of past missions (Envisat in two orbits and Saral) and current missions (Sentinel-3A [S-3A] and Sentinel-3B [S-3B]) were evaluated.

STUDY AREA

The São Francisco River basin occupies 7.5% of Brazil and has several physiographic and climatic characteristics, carrying an average water volume of 2180 m³/s (minimum of 1543 and maximum of 3000 m³/s) to the semi-arid region of the country. Despite its importance, the width of most of the river's course is small-to-medium (<1 km). The selected river stretch begins downstream of the Três Marias dam and extends to Santa Maria da Boa Vista GS, located approximately 170 km downstream of the Sobradinho reservoir. The GSs and VSs of the selected river stretch are shown in Figure 1. Fifteen RHN GSs are in operation in this section and radar altimetry missions generated several VSs.

2/11

RBRH, Porto Alegre, v. 26, e28, 2021

Martins et al.

Quality analysis of water level series obtained by altimetric radar satellite along the São Francisco River

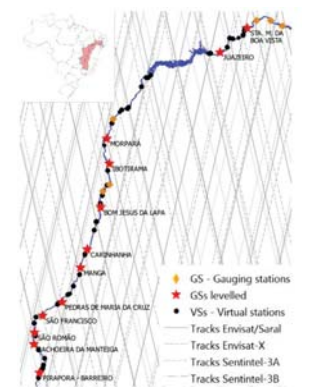


Figure 1. Location of *in situ* gauging stations (GSs) and virtual stations (VSs) along São Francisco River.

MATERIAL AND METHODS

Satellite altimetry radar technique

Satellites equipped with radar altimeters fly in predefined orbit according to the objectives of their mission: the nominal orbit. The projection of the orbits on the ground constitutes the tracks, which goes from one pole to the other. The distance between the measurement points on the ground is called the along track resolution, it varies from one mission to another and is typically in the order of 300 m. Figure 2a and Equation 1 show the principle of altimetric measurement and how water level is obtained. The altimeters emit microwave pulses towards the nadir and capture the echo reflected by the surface (soil, ice caps, and water bodies). The recording of these echoes, with a duration of a few microsecond for each point, over time is the waveform. The satellite altitude (*a* in Figure 2a) above the reference ellipsoid is calculated from precise instruments and systems of positioning, and orbit determination. The distance between the satellite and the surface, called 'Range', is calculated by determining the time taken by the return trip and the propagation speed of the electromagnetic waves. The range value is corrected (*R* in Equation 1) for delays in the propagation speed of electromagnetic waves in the atmosphere: ionosphere (iono), pressure (dry troposphere: drn) and humidity (wet troposphere: wet). Geophysical corrections referring to crust movements due to polar (pt) and terrestrial (set) tides are also applied. Then, the water level (*H* in Figure 2a and Equation 1) is obtained by subtracting the range from the satellite altitude

and corresponds to the distance from the water surface to the reference ellipsoid (Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques, 2020).

$$H = a - (R + \text{iono} + \text{dry} + \text{wet} + \text{pt} + \text{set}) \quad (1)$$

Variations in the topography along the altimeter's track (Figure 2b) causes oscillation in the return time of the echoes. The tracker is the algorithm that will define the altimeter's recording windows so that all returns can be properly collected in the waveform. The propagation of radar impulses from the satellite spread in a cone shape and can reach diameters in the order of kilometers on land, producing a footprint typically from 4 to 16 km, varying from one satellite to another. Large footprints can contain returns from different surfaces which add complexity to the waveforms (Figure 2b).

Due to the phenomena affecting the echo recorded by the altimeter, all data, especially for heterogeneous surfaces, must be post-processed to generate more accurate measurements of water level. This post-processing activity is called retracking and, in a simplified way, it is about defining which point on the waveform computes more closely to the target surface. The retracker compares a point in the waveform corresponding to the target surface based on the analysis of the waveform. The power of the returned echoes and the environmental factors, such as the nature of the surface (Figure 2b), can have significant effects on the choice made by the retracker (Kosmorduc et al., 2016; Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques, 2020; Maillard et al., 2015).

Satellite altimetry data acquisition and processing

Altimetry data are available free of charge from websites, FTPs, or platforms of space agencies and organizations involved. Raw data are usually available a few hours after the satellite passes by, and processed corrected data are available a few days to three months after acquisition. Envisat and Saral data were downloaded from the European Space Agency FTP (European Space Agency, 2021) and the Center for Topographic Studies of the Ocean and Hydrosphere (2020), a french organization that provides altimetry products. Sentinel-3 data were obtained through the Copernicus "Open Hub" platform, a European Union Earth Observation Program. The data are available in Network Common Data Form (NetCDF) format, which is widely used in climatological studies and altimetry missions.

The data were processed using the Satellite Water Gauging (SWG) tool, available for download on the website of the UFMG Remote Sensing Research Laboratory (UFMG/IGC/Geografia/Remote Sensing). This open-source tool processes data from satellite altimetry files, which contains all information needed (including all the corrections) to obtain water level time series as in Equation 1. This application was developed in Python and has a user-friendly graphical interface (Figure 3). The main submenu, "Prepare Data," allows for creating VSs along a watercourse. Final processing to obtain satellite time series is performed on the main screen. The output file includes dates, coordinates and average water levels for each satellite passage (Maillard et al., 2015).

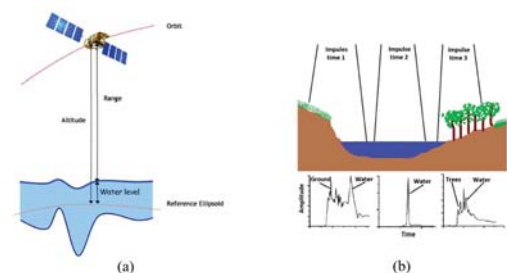


Figure 2. Altimetric radar operation: (a) Principle of altimetric measurement and how water level is obtained. Source: Adapted from SARAL/AltiKa Products Handbook - Centre National d'Études Spatiales, 2013; (b) Variation of waveforms according to the footprint context. Source: Maillard et al. (2015).



Figure 3. Main screen of Satellite Water Gauging tool.

Altimetry missions

The Envisat European Space Agency (ESA) satellite with the RA-2 altimeter was launched in March 2002, providing approximately eight years worth of data obtained during its original orbit, with a revisit time of 35 days and 80 km of inter-track distance in Equator. The satellite was moved to a lower orbit (revisit time of 30 days, 94 km of inter-track distance in Equator) in October 2010 to extend the mission for a few years, and its name was changed to Envisat-X. The mission ended in May 2012 owing to a loss of communication with the satellite.

The Saral satellite with an AltiKa altimeter is a joint initiative of the French Centre National d'Études Spatiales (CNES) and the Indian Space Research Organisation (ISRO) and was launched in

February 2013 in the same orbit and with the same revisit time as those of Envisat. Saral entered a drift phase in July 2016 because of technical problems. In this study we use data only from the original orbit, that like Envisat, had 80 km of inter-track distance in Equator.

The Sentinel-3A and Sentinel-3B satellites are a joint initiative of the ESA and the European Union and part of a family of satellites that observe and monitor different aspects of the Earth. Sentinels 3A and 3B were launched in February 2016 and April 2018, respectively. These satellites are in operation as of the publication of this study, have a revisit time of 27 days, and make complementary orbits. Satellites 3C and 3D are expected to be launched in the coming years. Each satellite S-3 alone has 104 km of inter-track distance in Equator.

This group of satellites generated altimetric time series from 2002 to 2020 in a multi-mission approach (Figure 4).

Mission	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Envisat	█																			
Envisat-X																				
Saral																				
S-3A																				
S-3B																				

Figure 4. Dates of altimetric missions.

GPS leveling

The GPS leveling of GSs was performed by technicians and engineers from CPRM. TEGEIO GTR-2 dual-frequency GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers with 702

GG antennas were used to obtain the absolute altitudes (global datum) of the GSs reference marks.

The data obtained by GNSS receivers were processed on the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) website using the Positioning by Precise Point (IBGE-PPP) mode. This is a free online service for post-processing GNSS data based on the Canadian Spatial Reference System (CSRS-PPP) developed by the Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan). The PPP processing followed the recommendations of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) (Petit & Luzum, 2010).

The field procedure was to place the antenna's reference point on the local reference mark of the GS to estimate its absolute altitude (global datum level). Then the GNSS receivers collected more than 2 h of satellite observations without signal obstructions to obtain highly accurate data. The estimated vertical accuracy of the data was 2–3 cm, with established standards and processes being followed. After processing with IBGE-PPP mode we obtain the absolute altitude for the reference mark. The local value of reference mark was subtracted from absolute one to obtain the absolute altitude of the gauge zero, which is the ellipsoidal height that corresponds to the zero reading of the vertical-staff gauge. Then, the absolute altitude of gauge zero was used to adjust gauging station data. Output coordinates (latitude, longitude, and ellipsoidal height) were used in the SIRGAS2000 geodetic system in PPP-IBGE, compatible with the WGS84 at the centimeter level for adjustment of gauging series to satellite data.

Analysis of errors in time series

The following analytical methods were used to measure errors in time series.

a) The mean error (ME) is the mean of all deviations $\hat{Y}_i - Y_i$ (where \hat{Y}_i is satellite data and Y_i is the GS) for each date /available for VSs, resulting in a series of size N . The ME indicates the direction of the discrepancy in the series and whether satellite data (\hat{Y}_i) tend to over or underestimate water levels when compared to gauge data (Y_i). The ME also estimates systematic errors, or mean biases, which are used as a correction factor to generate adjusted time series. However, it is limited because negative errors cancel out positive errors.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)}{N} \quad (2)$$

b) The absolute mean error (AME) is determined using the absolute value $|\hat{Y}_i - Y_i|$ of individual errors, such that positive errors do not cancel out negative errors. However, the AME does not indicate the general trend of errors (positive or negative).

$$AME = \frac{\sum_{i=1}^N (|\hat{Y}_i - Y_i|)}{N} \quad (3)$$

c) The root mean square error (RMSE) provides average errors and is more sensitive to large deviations by squaring individual differences. It is commonly used to express the accuracy of quantitative data.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{N}} \quad (4)$$

d) The adjusted RMSE is obtained in the same way as the RMSE, but adjusts satellite time series (\hat{Y}_i values) by subtracting the mean bias (ME) from the original series.

e) The sample efficiency rate, η_{eff} of satellite series was proposed by Bercher (2008), where N_{sat} is the number of data points obtained via altimetry, and N_{staff} represents the number of data points expected for a given period (total number of passages during a time interval).

$$\eta_{eff} = \left(\frac{N_{staff}}{N_{sat}} \right) 100\% \quad (5)$$

The η_{eff} of each mission is important because several factors can cause loss of radar altimetry data. For this reason, obtaining accurate data at a low frequency may not be useful. The temporal resolution of satellite data is lower than that of gauge data and can decrease in the presence of a low η_{eff} .

Notably, in some graphics (presented in the results section) it is possible to identify very significant errors in some water level time series. In these cases, the results before and after outliers removal are shown.

RESULTS AND DISCUSSION

Water level data from the GSs are presented in Table 1. The water levels and river widths were obtained from Hidroweb (Agência Nacional de Águas, 2020) and adjusted with the staff-gauge zero level.

Table 1. Levelled gauging stations in São Francisco River.

Station Code	Name	Latitude	Longitude	Staff-gauge zero level (m)	Measured average width (m)
41135000	Pirapora Barricão	-17.5093	-44.9431	469.38	379
42210000	Cachoeira da Mantega	-16.6575	-45.0811	447.49	388
43200000	São Romão	-16.3718	-45.0664	443.85	386
44200000	São Francisco	-15.9498	-44.8682	437.90	541
44290002	Pedras de Maria da Cruz	-15.6004	-44.3954	432.06	528
44500000	Manga	-14.7593	-43.9330	420.70	487
45290000	Carinhanha	-14.3059	-43.7654	416.91	603
45480000	Bom Jesus da Lapa	-13.4362	-43.2566	403.30	799
46150000	Ibitorama	-13.2230	-42.1840	392.19	561
46360000	Morpará	-13.2840	-41.5533	384.19	680
48020000	Juazeiro	-9.4062	-40.5042	344.81	924
48290000	Santa Maria da Boa Vista	-8.8098	-39.8240	332.15	814

from April 2012 to April 2013 (Figure 8a). The average error was positive, varying from 0.83 to 1.16 m, indicating a tendency to overestimate the water levels relative to gauging station data (Figure 8b). The value of η_{eff} was higher for Envisat (94%) and lower for Envisat-X (71%) and Saral (69%). The adjusted RMSE of Envisat-X was 0.22 m.

VSs for **Pedras de Maria da Cruz** were available from Envisat/Saral, Sentinel-3A, and Sentinel-3B, located 11, 9, and 13 km from this GS, respectively. For the Envisat-X mission, the VS coincided with the GS, but the real track could be located 1 km from each side of the original track. The η_{eff} was low, except for the case of Sentinel-3B (92%) (Table 2). The RMSE, average error and absolute error were greater than 1 m for all missions, except for Sentinel-3B (with an adjusted RMSE of 0.48 m).

The poor results of Pedras de Maria da Cruz for all missions except Sentinel-3B are attributed to the steep topography of the right side of the river (Figure 9). Under this condition, the altimeter does not capture the water level because the tracker predicts returns from a higher surface and does not have sufficient time to readjust when crossing the river. Therefore, the nadir altimeter tends to get locked on the top of the hilly areas and miss steep-sided valleys.

The performance of Sentinel-3B was higher because its altimeter uses previous information of the expected altitude for the target in open-loop tracking mode (OLTm). These auxiliary data are extracted from two sources: 1) a digital terrain elevation model and 2) a water mask. In the traditional operating mode

(closed-loop), the altimeter collects data considering the last waveforms received, which limits its ability to adjust to sudden changes in relief, as is the case in rivers located in embedded valleys. The other operational Sentinel-3 mission, Sentinel-3A, also has the OLTm available on its altimeter, but until March 2019 it only operated in some regions of the globe that did not cover the São Francisco River (European Space Agency, 2021).

Comparison of missions

In VSs more than 3–5 km from GSs, positive MEs are expected for the upstream cases and negative for the downstream ones, due to the slope of the waterline. At coinciding VSs the ME should be close to zero or at least positive in some cases and negative in others. However, all nine VSs coinciding with GSs (distances of ± 1 km and 3 km) had a positive ME (Table 2), indicating a possible tendency of these missions to overestimate water levels. A probable cause of the positive errors for different missions was the use of underestimate corrections in Equation 1, consequently the water level of VSs is systematically higher than that of the GSs, leading to a positive ME. This hypothesis is supported by Calmant et al. (2013), who found a positive bias (1.044 ± 0.212 m) in the Amazon Basin for the Envisat mission with the Ice-1 retracker, which was used in this research.

Table 2. Satellite water level series statistics.

Station Code	Gauging Station	Satellite	Track number	RMSE (m)	RMSE adjusted (m)	ME (m)	AME (m)	η_{eff} (%)	Distance* (km)
45480000	BJLapa	S-3A	380	0.85	0.13	-0.84	0.84	98%	+13
45290000	Carinhanha	S-3A	173	1.14	0.64	0.95	0.95	98%	-15
48290000	SMBVista	Envisat	276	3.09	0.34	3.08	3.08	95%	-6
48290000	SMBVista	Saral	276	2.62	0.16	2.61	2.61	63%	-6
46150000	Ibitorama	S3A	380	0.86	0.69	0.52	0.52	66%	-1
46150000	Ibitorama	S3A*	380	0.42	0.36	0.1	0.36	63%	-1
44200000	SFrancisco	S3B	116	0.80	0.56	0.58	0.69	84%	+3
	Morpará	Envisat	749	0.95	0.29	0.9	0.9	93%	± 1
46360000	Morpará	Saral	749	1.46	0.87	1.16	1.16	26%	± 1
	Morpará	Envisat-X	306	1.92	0.78	1.76	1.76	82%	-5
	Morpará	Envisat-X*	306	1.50	0.33	1.47	1.47	71%	-5
	SRomão	Envisat	921	1.56	1.05	1.16	1.16	94%	± 1
43200000	SRomão	Saral	921	1.15	0.77	0.85	0.98	69%	± 1
	SRomão	Envisat-X	521	0.86	0.22	0.83	0.83	71%	± 1
	PMCRuz	S3B	377	1.11	0.48	1.00	1.00	92%	-13
	PMCRuz	Envisat-X	377	5.91	4.85	3.37	5.62	35%	± 1
	PMCRuz	S3A	637	6.11	5.08	3.39	3.4	63%	-7
44290002	PMCRuz	S3A**	116	1.53	2.31	1.15	1.16	53%	-7
	PMCRuz	Envisat	116	4.01	1.13	3.84	3.89	70%	-13
	PMCRuz	Saral	380	49.72	45.91	49.32	49.32	11%	-13

*VS is upstream of GS and + VS is downstream of GS; **Series after removing outliers.

Water level data at the VSs located between the Três Marias reservoir and Santa Maria da Boa Vista station obtained from these five altimetry missions were processed using the SWG tool. The amount of altimetry information acquired using radar satellites provides knowledge on a continental scale to the detriment of information at the local level provided by staff gauges.

For the satellite data analysis, a selection criteria for VSs located close to the GSs (up to 15 km distance) was established to assure that the satellite was observing approximately the same cross section as the staff gauges. For some GSs there was no VS close enough, for others there was a single VS and in some interesting cases, more than one VS from different missions were in the vicinity of the same GS. The latter scenario enabled construction of multi-mission satellite series. These cases are presented in detail, facilitating a broader discussion of the relevant aspects and limitations in the case of using spatial altimetry data in hydrology.

Satellite water level time-series are presented in Table 2 and Figures 5 to 8 show:

- In situ station - daily*: daily average water level series adjusted with staff-gauge zero level
- In situ station*: a marker indicating the GS-based average water levels on the day of passage of the satellite.
- Satellite altimetry series, with raw data named 'Satellite' and after bias (mean error) removal 'Satellite (adjusted)'

Altimetry time series: Single VS versus GS

Sentinel-3A has a VS located 13 km upstream of the **BJLapa** GS and other VSs located 15 km downstream of **Carinhanha**. Both VSs had a high η_{eff} (98%) and AME < 1.0 m. For **BJLapa**, the RMSE and adjusted RMSE were 0.85 m and 0.13 m, respectively. For **Carinhanha**, the RMSE and adjusted RMSE were 1.14 and 0.64 m, respectively.

The Envisat and Saral missions provided data from 2002 to 2015 for a VS located approximately 6 km upstream of the **Santa Maria da Boa Vista** station (Figure 5). After Envisat changed orbit, the VS ran out of data as of October 2010, and

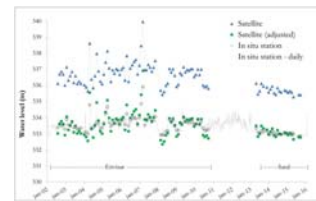


Figure 5. Water level time series obtained by Envisat and Saral 6 km upstream of Santa Maria de Boa Vista.

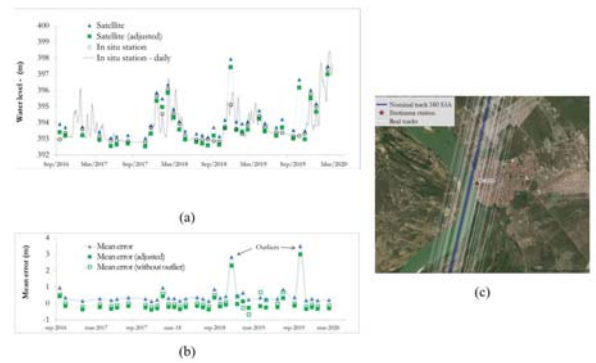


Figure 6. Ibitorama Station - Sentinel 3A: (a) series of water level (b) deviations before and after removal of bias and outliers, and (c) nominal and real tracks

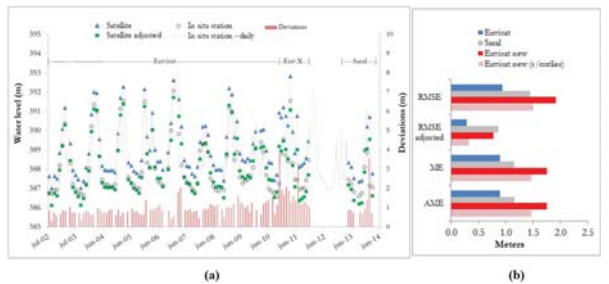


Figure 7. Morpará hydrological station: (a) Multi-mission time series of water levels; (b) Absolute and adjusted root mean square error, mean error, and absolute mean error.

Average statistics by satellite, considering the original series (before removing outliers), are shown in Table 3. Data from the Pedras de Maria da Cruz station were not used because this limited the operation of altimeters until the development of OLTm. Only the PMCRuz time series obtained by S-3B was used because the results of this mission were significant and to prevent the S-3B from having only one VS analyzed. The missions are presented in chronological order.

Time series acquisition was resumed by Saral in April 2013. The absolute RMSE of the original series for Envisat and Saral exceeded 2.5 m (Table 2). The linear distances from ground tracks to GSs accounted for the observed systematic errors. The adjusted RMSE was 0.34 m for Envisat and 0.16 m for Saral and the η_{eff} was 95% for Envisat and 63% for Saral.

Sentinel-3A has provided data within the vicinity of the **Ibitorama** station since September 2016; these data exhibit a good fit to gauging station data (Figure 6a). The RMSE and AME were 0.86 m and 0.52 m, respectively, and the adjusted RMSE was 0.69 m. Errors were below 0.5 m in most of the time series and approximately 1.0 m in a few time series (Figure 6b). There were two outliers at approximately 3.0 m. The adjusted RMSE was 0.36 m, and the ME was 0.10 m.

Figure 6a shows that the frequency of the Sentinel-3A data varied, with some missing data, resulting in a η_{eff} of 66%. For **Ibitorama**, Sentinel-3A data were limited because the track intercepted a curve of the river. Some river sections were not covered because the satellite could drift up to 1 km from each side of the nominal track during each cycle (Figure 6c). Data acquired near the margins provided little data on water levels and generated outliers (Figure 6b).

The Sentinel-3B mission has a VS near the São Francisco station. Although this satellite was launched in April 2018, data were available in November 2018 after several tests were conducted to assess the performance of the instruments (Collecte Localisation Satellites, 2019). Thus, data on 21 cycles from 25 passages are available ($\eta_{eff} = 84\%$). The absolute RMSE was 0.80 m, and the average error was 0.58 m.

Multi-mission series

VSs from more than one satellite were available for Morpará, São Romão, and Pedras de Maria da Cruz gauging stations.

In **Morpará**, a VS from Envisat and Saral was located less than 1 km from the GS, and a VS from Envisat-X was located approximately 5 km upstream of the GS. The combined data from these missions produced a time series from July 2002 to February 2014 (Figure 7a). Data acquisition thereof was interrupted for approximately 16 months (January 2012 to April 2013), corresponding to the period in which the Envisat-X mission ended and the Saral mission commenced. Although the Saral mission ended in July 2016, data on this VS were available until March 2014. Sometimes, data were not provided by the responsible agencies for some cycles because of the need for corrections or reprocessing or failure to maintain the nominal orbit.

The best result for **Morpará** was obtained during the Envisat mission (Figure 7b), with the lowest absolute RMSE (0.95 m), lowest adjusted RMSE (0.29 m), and highest η_{eff} (93%). The performance of the Envisat-X mission was similar to that of its predecessor regarding the adjusted RMSE (0.33 m); however, η_{eff} was 71% after exclusion of two outliers. The η_{eff} and adjusted RMSE in this region during the Saral mission were 26% and 0.87 m, respectively.

The VSs from the Envisat, Envisat-X, and Saral missions were located less than 1 km from **São Romão** station. Similarly, data collection by Envisat-X and Saral at Morpará was interrupted

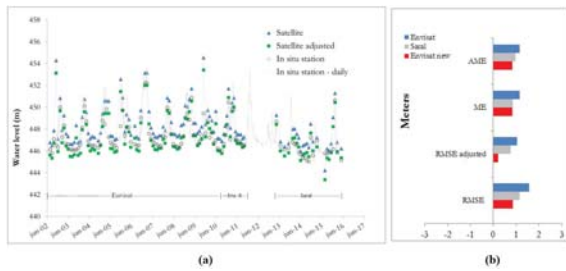


Figure 8. São Romão hydrological station: (a) Multi-mission time series of water levels; (b) Absolute and adjusted root mean square error, mean error, and absolute mean error.

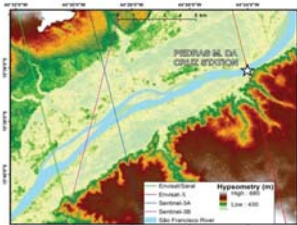


Figure 9. Region of Pedras de Maria da Cruz station.

Table 3. Average statistics of altimetric missions.

Satellite	Number of VS*	Average of analyzed stations			
		RMSE (m)	RMSE adjusted (m)	AME (m)	η_{eff}
Envisat	3	1.87	0.56	1.71	94%
Envisat-X	2	1.39	0.50	1.30	77%
Saral	3	1.74	0.60	1.58	53%
S-3A	3	0.95	0.49	0.77	87%
S-3B**	2	0.96	0.52	0.85	88%

*PM/Cruz EVs are not included; **The only satellite that includes PM/Cruz data.

RMSE and AME were better. Despite the change in orbit, the use of data from this phase of Envisat is interesting to obtain altimetric data from other river sections, providing a spatial and temporal complement to the original phase of the mission.

BRRIJ, Porto Alegre, v. 26, e28, 2021

9/11

Thus, in rivers that are much smaller than the footprint, the altimeter "sees" an adjacent area beyond the river surface. In this area, other types of land cover may emit signals similar to those of water producing a complex waveform with multiple peaks, like the first graph in Figure 1b. In these cases, the retracking may not define appropriately which peak corresponds to the water surface and compromise water level measurements. Altimeters may lose lock over areas with abrupt changes in relief, leading to data loss along extensive sections of the river. The hooking effect can also reduce accuracy. This effect occurs when the altimeter measures the height of a reflective surface (water) outside its nadir (off-nadir), forming a hydrological profile in parabolic format, overestimating the distance between the satellite and water, and, consequently generating a water level lower than the river level.

The altimetry results of Birkett et al. (2002) for the Topex/Poseidon satellite in the Amazon Basin suggest that the river width should be greater than 1 km in floodplain areas for the altimeter capture the water level correctly. Getirana et al. (2009) reported gaps in altimetric series for river sections less than 200 m wide and attributed them to the Envisat along track resolution of 350 m. Conversely, Silva et al. (2013) found that the river width was not the most significant contributor to the quality of satellite altimetry time series because water level variations were detected by Envisat in rivers and wetlands 50 m wide. Maillard et al. (2015) observed that environmental factors such as wind, soil type and topography of river margins could compromise altimetry data acquisition and are more important than river width.

Biancamaria et al. (2017) and Normandin et al. (2018) found that inadequate coverage in narrow watercourses could be circumvented by OLTM. Jiang et al. (2020) evaluated 50 VSs from S-3A in various rivers in China and demonstrated that the results were satisfactory in medium rivers (300 m wide) and large rivers (more than 500 m wide), and the terrain surrounding the VS strongly affected the results.

It is expected that the challenges of working with narrower watercourses will be overcome in the coming years, as missions are planned for observation of continental watercourses. In this context, Sentinel-6 (Jason-CS) was launched in November 2020, and the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite will be launched in 2022. The altimeter configurations of these satellites and operating parameters will improve altimetry data accuracy in narrower watercourses.

CONCLUSIONS

The results demonstrate the potential of using spatial altimetry data in medium-sized continental waterways. However, data validation is essential because several factors can affect the quality of measurements, particularly in narrow rivers, such as the São Francisco River. The main obstacles are the large footprints of altimeters (in the order of kilometers), loss of lock in steep sided valleys, the off-nadir "hooking" pattern, and the resolution along the track (typically of 300 m).

The validation activity is common in satellite altimetry studies, but usually it is done in relative terms due to the lack of leveled gauge stations in rivers. The present study analyzed VSs in close proximity (<15 km) to GSs to enable a direct and fair comparison with leveled gauge station data. This approach made possible to calculate absolute errors in satellite altimetry time series with less interference from other factors such as river slope. The absolute RMSE obtained in satellite series was higher than the adjusted RMSE, which is usually presented in the literature, given that these studies do not have the absolute altitudes of the gauge stations. This

finding indicates that the statistical data presented in studies applying relative adjustments to a series can show an optimistic view of the accuracy of the satellite data, reinforcing the importance of leveling to obtain the absolute altitude (global datum) of the gauge stations.

The analysis of time series at VSs very close to leveled GSs (distance of up to 3 km) showed a tendency to overestimate the water levels along the São Francisco River, with positive errors for different missions. The adjusted errors (optimal values between 0.13 and 0.36 m in the best cases [41%]) are similar to those presented in the literature and are in the order of decimeters even in recent missions from S-3A and S-3B. It is expected that the limitations will be leveraged in future missions by using new approaches and technologies, increasing data accuracy.

ACKNOWLEDGEMENTS

To technicians and engineers from CPRM who performed GPS leveling of the gauging stations. To the institutional support of CPRM, ESA and CTOH for making altimetric data available.

REFERENCES

- Agência Nacional de Águas – ANA. (2020). *Hydroweb: série histórica*. Retrieved in 2021, May 17, from <http://www.snirh.gov.br/hydroweb/seneshistoricas>
- Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques – AVISO. (2020). *Missions techniques*. Retrieved in 2021, May 17, from <http://www.aviso.altimetry.fr>
- Bercher, N. (2008). *Précision de l'altimétrie satellitaire radar sur les cours d'eau* (Tese de doutorado). Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, local.
- Biancamaria, S., Frappart, F., Leleu, A.-S., Marieu, V., Blumstein, D., Desjonquères, J.-D., Boy, F., Sottolichio, A., & Valle-Levinson, A. (2017). Satellite radar altimetry water elevations performance over a 200 m wide river: evaluation over the garonne river. *Advances in Space Research*, 59(1), 128-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.008>.
- Biancamaria, S., Schaedle, T., Blumstein, D., Frappart, F., Boy, F., Desjonquères, J., Pottier, C., Blarel, F., & Niño, F. (2018). Validation of Jason-3 tracking modes over French rivers. *Remote Sensing of Environment*, 209, 77-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.037>.
- Birkett, C., Mertes, L., Dunne, T., Costa, M. H., & Jasinski, M. J. (2002). Surface water dynamics in the Amazon Basin: application of satellite radar altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 8059-8080. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000609>.
- Calmant, S., & Seyler, F. (2006). Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14-15), 1113-1122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cre.2006.05.012>.
- Calmant, S., Silva, J., Moreira, D., Seyler, F., Shum, C., Crétaux, J., & Gabalda, G. (2013). Detection of Envisat R2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS. *Advances in Space Research*, 51(8), 1551-1564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.07.033>.
- Center for Topographic Studies of the Ocean and Hydrosphere – CTOH. (2020). *Data*. Retrieved in 2021, May 17, from <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/data>
- Chen, T., Song, C., Ke, L., Wang, J., Liu, K., & Wu, Q. (2021). Estimating seasonal water budgets in global lakes by using multi-source remote sensing measurements. *Journal of Hydrology*, 593, 125781. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125781>.
- Collecte Localisation Satellites – CLS. (2019). *S3MPC. STM Annual Performance Report for Sentinel-3 – Year 2018*. France: Mission Performance Centre.
- Coss, S., Durand, M., Yi, Y., Jia, Y., Guo, Q., Tuozolo, S., Shum, C., Allen, G. H., Calmant, S., & Pavelsky, T. (2020). Global river radar altimetry time series (GRRATS): new river elevation earth science data records for the hydrologic community. *Earth System Science Data*, 12(1), 137-150. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-12-137-2020>.
- Domenghetti, A., Molari, G., Tourian, M. J., Tarpanelli, A., Behnia, S., Moramarco, T., Sneeuw, N., & Brath, A. (2021). Testing the use of single- and multi-mission satellite altimetry for the calibration of hydraulic models. *Advances in Water Resources*, 151, 103887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103887>.
- European Space Agency – ESA. (2021). *Sentinel online*. Retrieved in 2021, May 17, from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>
- Getirana, A. C. V., Bonnet, M.-P., Calmant, S., Rous, E., Rotunno Filho, O. C., & Mansur, W. J. (2009). Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall-runoff modeling and spatial altimetry. *Journal of Hydrology*, 379(3-4), 205-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.049>.
- Jarhani, A. A., Callow, J. N., Johansen, K., & Gouweleuw, B. (2013). Evaluation of multiple satellite altimetry data for studying inland water bodies and river floods. *Journal of Hydrology*, 505, 78-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.010>.
- Jiang, L., Nielsen, K., Dinardo, S., Andersen, O. B., & Bauer-Gottwein, P. (2020). Evaluation of sentinel-3 sar altimetry over chinese rivers. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111546. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.111546>.
- Kittel, C. M., Jiang, L., Tottrup, C., & Bauer-Gottwein, P. (2021). Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring - a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 333-357. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-25-333-2021>.
- Lettenmaier, D. P., Alsford, D., Dozier, J., Huffman, G. J., Pan, M., & Wood, E. F. (2015). Intrudes of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resources Research*, 51(9), 7309-7342. <http://dx.doi.org/10.1002/2015WR017616>.
- Maillard, P., Bercher, N., & Calmant, S. (2015). New processing approaches on the retrieval of water levels in Envisat and Saral radar altimetry over rivers: a case study of the São Francisco river. *Remote Sensing of Environment*, 156, 226-241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.027>.
- McCabe, M. F., Rodell, M., Alsford, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lacieter, A., Houborg, R., Verhoest, N. E. C., Franz, T. E., Shi, J., Gao, H., & Wood, E. F. (2017). The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3879-3914. PMID:30233123. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-3879-2017>.
- Morceira, D. M. (2016). *Geodésia aplicada ao monitoramento hidrologico da bacia Amazônica* (Tese de doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Nielsen, K., Andersen, O. B., & Ranndal, H. (2020). Validation of Sentinel-3A Based Lake Level over US and Canada. *Remote Sensing*, 12(17), 2835. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172835>.
- Normandin, C., Frappart, F., Diepkö, A. T., Marieu, V., Mougin, E., Blarel, F., Lubac, B., Braquet, N., & Ba, A. (2018). Evolution of the performances of radar altimetry missions from ERS-2 to Sentinel-3A over the Inner Niger Delta. *Remote Sensing*, 10(6), 833. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10060833>.
- Petit, G. E., & Luzum, B. (Eds.) (2010). *IERS conventions* (IERS Technical Note, No. 36, 179 p). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- Rosmond, V., Benveniste, J., Bronner, E., Dinardo, S., Laurent, O., Maheu, C., Milagro, M., Pico, N., Ambrozio, A., Escóla, R., Garcia-Mondejar, A., Restano, M., Schrama, E., & Terra-Homem, M. (2016). *Radar altimetry tutorial*. Retrieved in 2021, May 17, from <http://www.altimetry.info>
- Sichangi, A. W., Wang, L., & Hu, Z. (2018). Estimation of river discharge solely from remotesensing derived data: an initial study over the Yangtze river. *Remote Sensing*, 10(9), 1385-1406. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10091385>.
- Silva, J. S., Calmant, S., & Seyler, F. (2013). Satellite altimetry for hydrology. In *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: ABRH.
- Tourian, M. J., Tarpanelli, A., Elmi, O., Qin, T., Brocca, L., Moramarco, T., & Sneeuw, N. (2016). Spatiotemporal densification of river water level timeseries by multimission satellite altimetry. *Water Resources Research*, 52(2), 1140-1159. <http://dx.doi.org/10.1002/2015WR017654>.

Authors contributions

Luana Kessia Lucas Alves Martins: Conceptualization (PhD Thesis), Methodology, Formal analysis, Data curation, Writing, Programming (SWG).

Philippe Maillard: Programming (SWG), Editing and Reviewing.

Eber José de Andrade Pinto: Reviewing.

Daniel Medeiros Moreira: Writing (altimetric leveling) and Reviewing.

Editor-in-Chief: Adilson Pinheiro

Associated Editor: Fernando Mainardi Fan

APÊNDICE 3 – Artigo em análise no Journal of Hydrology

Evaluating the performance of four satellite altimetry missions through spatial and temporal interpolation of in situ data

Luana Kessia Martins^{a,b,*}, Éber J.A. Pinto^{a,b}, Philippe Maillard^c

^aDepartment of Hydraulic Engineering and Water Resources, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG 31270-901, Brazil

^bCPRM, Av. Brasil 1731, Funcionários-Belo Horizonte, MG 30.149-002, Brazil

^cDepartment of Geography, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG 31.270-901, Brazil

Abstract

Since the beginning of the century there has been a succession of satellites equipped with altimeters producing data for most of the Earth's surface. In this article, six of these satellites were used to measure the water stage of the São Francisco River in Brazil: Jason-2, Jason-3, Envisat, Saral, Sentinel-3A and Sentinel-3B. Unlike the first four, Sentinel-3A and B are satellites operating constantly in SAR mode. As such, it can simulate a much smaller footprint in the along-track direction than other altimetry missions operating in low resolution mode. In this study, a 1400 km reach of the São Francisco River was used to evaluate and compare the altimeters performance from these satellites on a medium size river (width < 1 km). Unlike many other rivers with only relative measurements, this reach has 12 almost contiguous fluvimetric in situ stations with known precise elevation reference enabling to evaluate the absolute errors and biases of altimetry measurements. It also makes it possible to interpolate the water stage between in situ stations to compensate for the location and acquisition time differences between the in situ stations and the satellite track crossings. A spatial-temporal interpolation algorithm was used to validate these water stage measurements. The validation of the results suggests that the Sentinel-3 satellites outperformed the Jason, Envisat and Saral missions in terms of accuracy. A median absolute bias of 0.17 m was obtained for Sentinel-3 whereas the remaining satellites have together a median bias of 1.45 m. We show that the adjusted root mean square error (RMSE) produces overoptimistic results. On average, the adjusted RMSE is almost one metre lower than the absolute one. By interpolating in situ data in time and space we were able to validate satellite altimetry stations at a distance of 60 km from the in situ station and reduce the absolute RMSE by 0.29 m. The interpolated RMSE are widely variable for all satellites: 0.31 m-5.99 m for Envisat ($\bar{x}=1.71$ m), 0.38 m-48.36 m for Saral ($\bar{x}=2.06$ m), 1.34 m-3.56 m for Jason-2 ($\bar{x}=2.23$ m), 1.08 m-11.63 m for Jason-3 ($\bar{x}=1.65$ m), 0.16 m-5.98 m for Sentinel-3A ($\bar{x}=0.70$ m) and 0.27 m-6.15 m for Sentinel-3B ($\bar{x}=1.02$ m). This variability suggests that the location and context of satellite altimetry stations can have an immense impact on the accuracy. Conversely, the judicious selection of virtual stations can provide very valuable water stage data to complement or even substitute in situ

*Corresponding author
Email addresses: luana.martins@cpm.gov.br (Luana Kessia Martins), eber@ehr.ufmg.br (Éber J.A. Pinto), philippe.maillard@yahoo.com.br/philippe@ufmg.br (Philippe Maillard)

Preprint submitted to Journal of Hydrology

April 14, 2021

data when these are unavailable. Insights on the environmental and technological factors affecting the accuracy are discussed.

Keywords: Altimetry satellites, Water stage, Medium size river, Absolute errors, Altimeter bias, São Francisco River

1. Introduction

Sentinel-3 (S-3), Saral, Envisat and Jason all belong to a family of satellites equipped with a radar altimeter that measures its distance to the Earth surface at nadir to determine its elevation. Unlike most other satellites with altimetry instruments, S-3 operates constantly in synthetic aperture radar mode (SARM) whereas Jason, Envisat and Saral operate in low resolution mode (LRM). Regardless of their operating mode, these altimeters are specifically engineered to respond to water and ice surfaces.

In the past three decades satellite altimetry (SA) has been increasingly used to measure water levels (the term water stage will be preferred henceforth) in rivers (Kobylinsky et al., 1993; Birkett et al., 2002; Roux et al., 2010; Tourian et al., 2016) and lakes (Crétaux and Birkett, 2006; Sarmiento and Khan, 2010; Jarihani et al., 2013; Crétaux et al., 2017). Such applications have met many challenges, especially for smaller rivers (Maillard et al., 2015; Biancamaria et al., 2017). In many studies, the idea is that a crossing between the satellite track (one half orbit from pole to pole) and a river can constitute a virtual hydrological station (VHS) where the river stage can be measured. These virtual stations can be used to complement in situ hydrometric stations (ISHS) and measure water stage where ISHS are unavailable or in poorly monitored large rivers. The concept of virtual station should however be taken loosely since all satellite altimetry missions suffer from lateral shifts off their nominal track of one (normally) to several kilometres (e.g. Saral and CryoSat-2). These shifts and the loose concept of virtual station are amongst the motivations behind our study. Contrary to most ISHS that measure water stage with a local reference, SA measurements use a global elevation reference (usually the ellipsoid). In addition to the river stage, the fact that an absolute elevation reference is used can give an estimate of the water surface slope. The capacity to estimate water-surface slope is especially interesting when stage measurements are close in time and space. In some particular situations when the satellite track follows the river (loosely N-S or S-N), the water surface slope of a river reach can even be estimated from a single overflight.

Measuring the river stage is in itself an important information for flood warnings or feeding water stage time series and to assess flood return period. River stage measurements are also a means to calculate river discharge through a rating curve. For this application however, the precision of water level measurements is critical and many SA studies focus on this particular aspect. The validation of SA measurements is mostly done by comparison with nearby ISHS, hence the measurements are usually mean-adjusted to yield a relative measure of error (Bercher, 2008; Jarihani et al., 2013). Some authors also use linear regression as a means to evaluate their results (da Silva et al., 2010; Jarihani et al., 2013). Both these validation approaches are valid of course, but they tend to be overoptimistic since they do not allow to estimate biases from the satellite missions measurements. Table 1 shows

2

a sample of SA studies applied to measuring river stage and lake level from the past decade. It is noteworthy that all but one of these studies have used a relative estimate of accuracy. As such, there is a general lack of information on absolute SA errors. Such information would enable to 1) give a more realistic estimates of SA measurements precision and accuracy, 2) estimate biases per satellite or satellite mission and 3) give a better understanding of the sources of errors by considering the specific context of any VHS (topography, land cover type, presence of nearby water bodies, etc.).

The comparison between VHS and ISHS is very rarely done at the same location (Dettmering et al., 2016) which is another source of error difficult to evaluate. This consideration has often restricted the validation of SA results to comparison with only nearby ISHS. For instance, da Silva et al. (2010) used a threshold of 30 km, Maillard et al. (2015) limited the comparison with ISHS to 25 km and Schwatke et al. (2015) use ISHS at distances varying from 6 to 68 km. Michailovsky et al. (2012) have considered distances of up to 200 km while adjusting the time according to the wave celerity. There is obviously no valid rule-of-thumb to determine an acceptable distance between the VHS and the ISHS and it should depend on the bottom slope of the river and other factors susceptible to affect the river stage between the two measurements.

In many cases the effect of the distance separating them have frequently been disregarded, especially when this distance is rather small. But this can be an important source of errors: 1) the water surface slope is usually unknown, 2) the river cross section is probably different at the two locations and 3) any tributary entering the river between the two stations affects the measurement. The following points provide a more thorough explanation for these sources of error.

- As the distance between the ISHS and the VHS increases, the water surface slope becomes an important source of error, especially in high waters when it is more difficult to estimate. For instance the presence of rapids can alter the water line drastically.
- The shape of the river cross sections is directly related to the behaviour of the river stage with respect to the variation of discharge. In a trapezoidal shape, the width of the river might be more affected than the stage. ISHSs are often located in more rectangularly shaped cross sections.
- Tributaries, irrigation canals or even direct water pumping all affect the discharge so that greater distances between ISHS and VHS increase the probability of their presence.

The São Francisco River has already been the subject of an SA study concentrating on the fact that, being a medium sized river, the challenges were somewhat different from major rivers like the Amazon (Maillard et al., 2015). In this study, we investigate the same river with the important difference that we now benefit from absolute levelling information for 12 almost contiguous ISHSs which provided the possibility of a much more thorough analysis of the errors and was extended to include additional satellites. This information provided two important research objectives rarely investigated: 1) the means to estimate the absolute elevation error of the measured river stage which also gives an insight on possible systematic biases per mission and 2) the ability to interpolate in situ data to match the

Table 1: Sample of SA studies applied to rivers and lakes of the last decade showing the level of accuracy obtained. Note that all but two (Crétaux et al., 2018; Biancamaria et al., 2017) of these studies have used a relative comparison approach.

Authors	Study Area (lakes and rivers)	Performance evaluation (relative root mean square error or error intervals)
Sarmiento and Khan (2010)	Great Slave Lake, Canada	T/P: 10.9 cm; Jason-1: 5.1 cm
Da Silva et al. (2010a)	Amazon rivers, Brazil	Envisat: 0.12 m - 2.25 m ($\bar{x}=0.40$ m); ERS-2: 0.32 m - 1.2 m ($\bar{x}=0.70$ m)
Jarihani et al. (2013)	Lake Argyle & Eildon, Australia	T/P: 1.5 m; J-1: 1.07 m; J-2: 0.28 m; Envisat: 0.25 m; GFO: 0.89 m; IceSat: 0.04 m
Schwatke et al. (2015)	Amazon, Solimões, Negro, Tapajós rivers, Brazil	Envisat: 0.08-0.59 m ($\bar{x}=0.33$ m) Saral: 0.08-0.32 m ($\bar{x}=0.17$ m)
Dettmering et al. (2016)	Paraguay, Cuiabá & Piquiri rivers, Brazil	Envisat: 0.29-0.96 m ($\bar{x}=0.47$ m)
Tourian et al. (2016)	Po River, Italy	All satellites together: 0.70-1.08 m ($\bar{x}=0.91$ m); T/P: 0.90-1.56 m ($\bar{x}=1.23$ m); Envisat: 0.60-0.92 m ($\bar{x}=0.71$ m); Jason-2: 0.73-1.20 m ($\bar{x}=0.86$ m)
<i>idem</i>	Congo River, Congo	Envisat (10 stations), Saral (10 stations): $\bar{x}=0.44$ m
<i>idem</i>	Mississippi River, USA	T/P (7 stations) Envisat (6 stations): $\bar{x}=2.31$ m
<i>idem</i>	Dambe River, Europe	Envisat (21 stations), T/P (6 stations) Saral (1 station): $\bar{x}=1.12$ m
Biancamaria et al. (2017)	Garrone River, France	Envisat: 0.58-27.92 m ($\bar{x}=8.10$ m); Saral: 1.90-105.13 m ($\bar{x}=63.69$ m); Jason-2: 2.57-6.96 m ($\bar{x}=4.52$ m)
Crétaux et al. (2018)	Lake Issykkul, Kyrgyzstan	Jason-3: -28±40 mm (Ocean); 206±30 mm (Ice-1); Sentinel-3A: -14±20 mm (SeaWiFS); 285±20 mm (OCO2)
Schneider et al. (2018)	Po River, Italy	CryoSat-2 LRM: 0.15-3.12 m ($\bar{x}=0.34$ m); SAR: 0.11-2.03 m ($\bar{x}=0.40$ m); SARIn: 0.12-2.47 m ($\bar{x}=0.37$ m)
Verron et al. (2018)	Brahmaputra River, India	Saral: $\bar{x}=0.41$ m; Jason-2: $\bar{x}=1.19$ m
Bogning et al. (2018)	Ogooué River, Cameroon	ERS-1: 0.28-1.05 m ($\bar{x}=0.61$ m); Envisat: 0.21-0.48 m ($\bar{x}=0.34$ m); Saral: 0.22-0.36 m ($\bar{x}=0.28$ m); Envisat (2nd orbit): 0.296-0.442 m ($\bar{x}=0.35$ m); Sentinel-3A: 0.198-0.412 m ($\bar{x}=0.33$ m); CryoSat-2: 0.25 m (one station)
Gao et al. (2019)	Ebro River Basin, Spain	Sentinel-3: 0.16 - 0.28 m (threshold retracker with DEM)
Boergens et al. (2019)	Mekong River and tributaries, South-East Asia	Multi-mission (Envisat, Saral, Jason-2, and -3); Mekong only: 1.19 - 2.22 m; Mekong and major tributaries: 1.05 - 1.75 m
Coss et al. (2020)	12 rivers of widths > 900 m (320 virtual stations)	Global River Radar Altimeter Time Series (GRRATS), using Envisat and Jason-2; Standard Deviation of Error SDE=0.93 m
Jiang et al. (2020)	Rivers in China (50 VHSs)	S-3A: 11 VHS- no useful data; 19 VHS: 0.12m - 0.60 m; 7 VHS: 0.60m - 0.90 m; 13 VHS: 0.91-3.61m

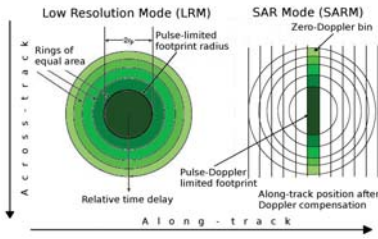


Figure 1: Illustration of the effect of the Delay-Doppler effect on the footprint size and shape of an altimeter operating in SARM. Left: LRM (low resolution mode); right: SARM (synthetic aperture radar mode). Adapted from European Space Agency (2021).

satellite river crossing both in time and location by estimating the river bottom slope between ISHSs (one upstream and one downstream from the VHS). Finally, in this study we re-evaluate both Envisat and Saral missions and included Jason-2, Jason-3, Sentinel-3A and -3B in our analysis (Jason-1 was kept out for reasons explained below).

1.1. Satellite altimetry missions background

The S-3 mission with its SRAL altimeter is a twin satellite constellation (S-3A, 2016– and S-3B, 2018–; S-3C and -3D are planned to join the constellation in the next few years) and is the first altimetry mission to operate continuously in SARM (synthetic aperture radar mode). The SARM enables the altimeter to simulate a much smaller along-track footprint using Delay-Doppler compensation to create a compressed pulse duration (Figure 1). The circular footprint of the SRAL altimeter is sliced into ellipses of about 300 m (semi-minor axis) allowing a highly reduced area to be sampled when compared with LRM altimeters.

Another important characteristic of S-3 lies in its open-loop tracker command (OLTC) that uses a digital elevation model (DEM) and a water mask to help predict the distance separating the satellite from the water surface, hence reducing the probability of tracker errors. In the closed-loop used by other satellites the predictive capacity of the tracker is simply based on the previous measurements so that any abrupt change in topography can cause the satellite tracker to lose its “lock” on the water surface and lock on the river bank instead. Jiang et al. (2020) suggested that the OLTC would produce more reliable and precise water stage measurements but this is yet to be recognised for smaller rivers.

Between 2002 and 2016, Envisat (RA-2 altimeter) and Saral (AltiKa) have produced large amount of data on many rivers around the world with relative water elevation errors in the order of decimetres (da Silva et al., 2010; Frappart et al., 2015; Maillard et al., 2015; Biancamaria et al., 2017; Normandin et al., 2018). Because the two missions share the same orbit configuration (same track locations and 35 days revisit period), they are highly complementary and serve to monitor the same VHS.

5

Envisat (environmental satellite) is an ESA mission that included many sensors apart from the RA-2 altimeter. In 2010, the satellite was moved to a lower orbit with different tracks and a new revisit period of 30 days (generally referred to as “Envisat New”). Envisat is regarded as a very successful and productive mission. The Saral satellite with its AltiKa instrument (altimeter in Ka band) is an altimetry-only mission planned and operated by a french-indian consortium (CNES-ISRO) and launched in February 2013. Its main innovation was the use of an altimeter operating in the Ka band (35.75 GHz) instead of the Ku band (13.575 GHz) used by other altimetry missions. Saral suffered from mechanical failures relatively early in its orbital lifespan making it drift from its nominal orbit often more than the standard one km normally accepted. This aspect will be discussed further in the results section. In July 2016, it was put on a drifting orbit phase. In this paper, we only used data prior to this drifting phase.

Jason is a family of altimetry satellites that inherited from the Topex/Poseidon satellite that operated between 1992 and 2006 as a joint venture between CNES and NASA. The Jason series (-1, -2 and -3) continues to be the result of this joint effort. Jason-1 was launched in 2001 and decommissioned in 2013 when contact with the satellite was lost. Jason-1 was not used here because its tracker loop did not cope well with elevation changes and for this reason most data is not usable for hydrology studies (Da Silva et al., 2010b). Jason-2 was launched in 2008 and occupied the same orbit as Jason-1 (with a time lag) which was later moved to a midway orbit between two Jason-2 orbits until it failed. Jason-3 was launched in 2016 and flies the same orbit as Jason-2 with a one minute delay. Jason-2 was decommissioned in October 2019 leaving only Jason-3 operational. The Jason family uses a higher orbit at an altitude of ≈ 1335 km while most other altimetry missions (Envisat, Saral, Sentinel-3, CryoSat-2) fly an altitude in the 715–815 km range. Because of this altitude difference, the Jason footprint is significantly larger than other mission like Envisat and Saral. For the Jason family of satellites only Jason-3 was configured with an open loop tracker. Both S-3 and J-3 use the same OLTC database maintained by ESA which updates the data from time to time using new VHSs made available worldwide (hydro targets). Another Jason mission was planned for launch in 2021, the Jason-CS (Continuity of Service) but using SAR technology. Through the extension of the partnership to include the European Space Agency, the Jason-CS was renamed Sentinel-6 “Michael Freilich” and was launched earlier than first planned in November 2020. A second S-6 is planned to join the first.

2. Method

2.1. Study area and data acquisition

The object of our study is a 1400 km reach of the São Francisco River (SFR) in Brazil (Figure 2). With 2700 km, the SFR is a strategic river as it produces 10 GW of hydroelectric power and is the largest river to cross the semi-arid region of Brazil (ANA (Brasil), 2019). For this study we used a series of 12 levelled ISHSs to produce relative and absolute estimates of accuracy for the six satellites. Some of the characteristics of the ISHS are listed in Table 2 and their location is illustrated in Figure 3.

6

Table 2: Some of the characteristics of the 12 in situ hydrometric stations used as validation in the study.

In situ stations (upstream – downstream)	ANA code	Latitude decimal $^{\circ}$	Longitude decimal $^{\circ}$	Elevation (m)	Minimum width (m)	Maximum width (m)	Average width (m)
<i>Três Marias Reservoir</i>							
Pirapora	41135000	-17.36920	-44.94310	469.381	228	480	379
Cachoeira do Manteiga	42210000	-16.65720	-45.08080	447.485	302	429	388
São Romão	43200000	-16.37250	-45.07000	443.845	259	694	386
São Francisco	44200000	-15.94940	-44.86780	437.900	249	3286	541
Pedras de Maria da cruz	44290002	-15.61030	-44.39530	432.060	229	632	528
Manga	44500000	-14.75720	-43.93230	420.703	343	658	487
Carinhanha	45200008	-14.30440	-43.76330	416.910	357	4440	603
Bom Jesus da Lapa	45480000	-13.25660	-43.43620	403.300	574	1084	799
Ibotirama	46150000	-12.18400	-43.22300	392.190	322	1560	561
Morpará	46360000	-11.55330	-43.28400	384.190	322	1082	680
<i>Sobradinho Reservoir</i>							
Juazeiro	48020000	-9.40620	-40.50420	344.810	546	924	785
Sta Maria da Boa Vista	48290000	-8.80980	-39.82400	332.150	332	814	637



Figure 2: The São Francisco River watershed within the South-American continent. The four rectangles show the articulation of the study area represented in Figure 3.

7

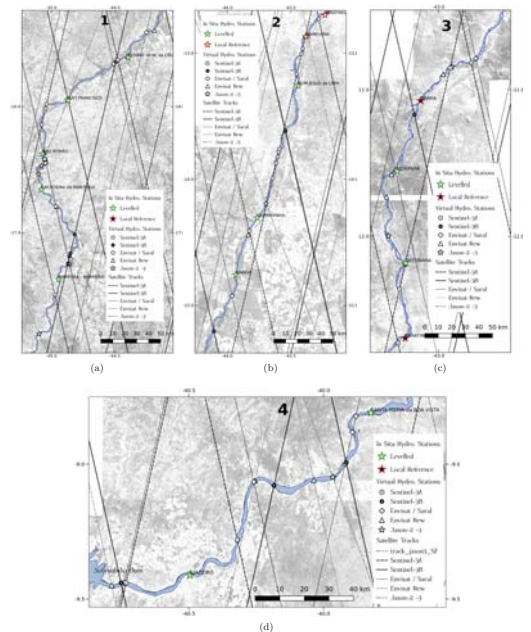


Figure 3: Extent of the São Francisco River reach under study showing the in situ stations, the virtual stations and the satellites tracks.

8

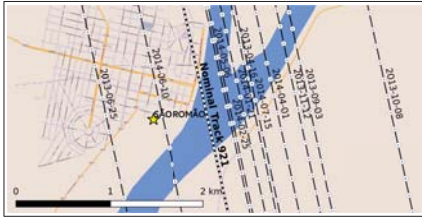


Figure 4: Saral cycles of track 921 over the São Francisco River near São Romão. Note how some cycle exceed the 1 km distance from the nominal track.

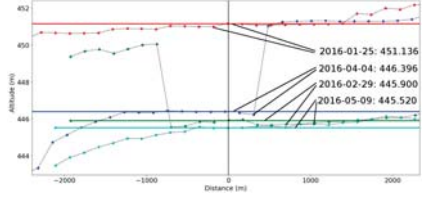


Figure 5: Transformation of the original Saral altimetry points (coloured dots) into unique water levels (coloured continuous lines). The hooking effect is noticeable on the left side of the 2016-04-04 and 2016-05-29 measurements.

The Jason, Envisat and Saral data were obtained through ESA's ftp site while the S-3 data was downloaded from Copernicus' DataHub site. Table 3 gives a list of the principal altimetry missions of the past 30 years outlining the ones used in this study.

2.2. Altimetry Data Processing

All the data was corrected and processed in-house using the SWG Tool from the UFMG Remote Sensing Laboratory (UFMG/IGC/Geografia/Remote Sensing). The processing included propagation delay and crust deformations corrections. The "Pattern Recognition" option described in Maillard et al. (2015) was used to produce water level measurements for all the usable cycles of the satellites (some test cycles are often disregarded). The SWG tool offers two more processing options; one using the average of the satellite measurement points falling directly within the river width and one simulating and inverting the "hooking" effect. In the vast majority of cases, the "Pattern Recognition" option presented better results so, for the sake of consistency, we restricted our approach to this option for the article. Figure 4 shows the altimetry points of 11 cycles acquired by Saral in 2013-14 over a section of the São Francisco River (near São Romão). Note how the 2013-10-08 cycle is further away

Table 3: Past and ongoing altimetry satellites with some of their characteristics. Satellite names in bold (grey rows) are the ones used in this article.

Satellite	Launch	Ended	Altimeter	Radar band	Altitude (km)	Altimeter mode***	Number of orbits	Cycle (days)	Orbit Inclination (°)
ERS-1	Jul. 1991	Mar. 2000	RA-1	Ku	783	1	500	35	98.3
ERS-2	Apr. 1995	Jun. 2003	RA-1	Ku	780	1	500	35	98.5
TopeX/Poseidon	Aug. 1992	Jan. 2006	SSALT	Ku	1336	1	127	10	66.04
Jason-1	Dec. 2001	Jun. 2013	SSALT	Ku	1324	1	127	10	66.04
Jason-2	Jun. 2008	Oct. 2019	SSALT	Ku	1336	1	127	10	66.04
Jason-3	Jan. 2016	Ongoing	SSALT	Ku	1336	1	127	10	66.04
Envisat	Mar. 2002	Mar. 2012	RA-2	Ku	800	1	1001	35	98.55
Saral	Feb. 2013	**Jul. 2016	Ahika	Ka	781	1	1001	35	98.5
CryoSat-2	Apr. 2010	Ongoing	SRAL	Ku	717	1,2,3	5344	369/30*	92.0
Sentinel-3A	Feb. 2016	Ongoing	SRAL	Ku	815	2	385	27	98.6
Sentinel-3B	Apr. 2018	Ongoing	SRAL	Ku	815	2	385	27	98.6

*: sub-cycles; **: still ongoing but drifting; ***: altimeter modes: 1=LRM, 2=SARM, 3=SARin.

from the other cycles because of the drifting problem of Saral. Figure 5 illustrates how these points were transformed into a single water level by the "Pattern Recognition" option (represented by the horizontal lines). The ISHS data were obtained from the *Hidroweb* site of Brazil's national water agency ANA (BRASIL) (2019).

2.3. Validation and In Situ Data Interpolation

Considering our multiple objectives, the dataset including all altimetry data was processed and analysed in packets based on the existence or absence of an ISHS from which to compare the data. The distance between the VHSs and the ISHSs was also a criterion of separation. For the first packet, a maximum distance of 15 km between the nearest ISHS and the VHS was considered so that the water stage from 33 VHSs could be directly compared with the ISHS measurement. This situation corresponds to what most SA studies applied to water stage monitoring in rivers do, namely to restrict the distance between VHS and ISHS to compare the adjusted (relative) water stages. This first analysis includes 33 VHSs in which we compare the relative (adjusted) approach with the absolute one (without adjustment) to assess the effect of the adjustment approach which we suggest is normally overoptimistic (underestimates errors). These VHSs were also validated by comparing their water stages with interpolated ISHSs values in time (time gap between the satellite passage and the ISHS lecture) and in time and distance (interpolating between the upstream and downstream ISHSs).

The remaining 43 stations were not interpolated directly using in situ data as we considered the distance separating them to an ISHS to be too large for a direct comparison considering the average water surface slope of about 10 cm/km. So these VHSs were all validated using only interpolated in situ data.

Finally, all 76 VHSs were analysed and validated using interpolated ISHSs data to assess the performance of the different satellite missions. Figure 6 shows a flowchart representing the analysis by packets. The time and slope interpolation approach are described below.

All results were evaluated using six metrics: mean error - ME, absolute mean error - AME, root mean square error - RMSE, relative root mean square error - RRMSE, correlation coefficient - R and

Table 4: Metrics used to validate the results.

Metric Description	Equation
Mean Error: computes the difference between measured and estimated values; indicates the existence of a trend; good to estimate mission bias; can be misleading because negative and positive errors cancel out.	$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{N}$
Absolute Mean Error: same as mean error but sums the absolute differences; gives a more realistic metric of the errors.	$AME = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i }{N}$
Root Mean Square Error: gives the standard deviations of the prediction errors; is often considered a standard form of expressing errors; enables comparison with other studies.	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}}$
Relative Root Mean Square Error: gives the standard deviations of the prediction errors adjusted by its mean; considered a standard form of expressing errors when absolute values are not known; enables comparison with other similar studies.	$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Y_i - \hat{Y}_i) - (\bar{Y} - \bar{\hat{Y}}))^2}{N}}$
Sampling Efficiency Rate: gives an indicator of the proportion of satellite data that were effectively used after removing bad or corrupted data and outliers.	$\eta_{eff} = (1 - \frac{N_{used}}{N_{sat}}) \times 100$
Correlation coefficient: is a statistical measure of the strength of the linear relationship between the relative movements of two variables. Ranges from -1 to 1, zero means no correlation, -1 perfect negative correlation and 1 perfect correlation.	$R = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((Y_i - \bar{Y})^2) \sum_{i=1}^n ((\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2)}}$

Y_i : measured in situ water stage; \hat{Y}_i : estimated water stage; \bar{Y} : mean of Y ; $\bar{\hat{Y}}$: mean of \hat{Y} ; N : number of observations; N_{used} is the number of satellite cycle effectively used and N_{sat} is the theoretical number of cycle acquired by the satellite.

- crossing time, without exceeding a 24 h interval;
- At the station(s) do linear interpolation of water stage from pre- and post- measurement to match satellite time and produce a time synchronised in situ water stage (this is the final step for TI);
- Only for TSI: use time interpolated water stages from upstream and downstream stations to interpolate according to the distance from both stations to the satellite crossing point;
- Use the interpolated in situ data (in time or time and space) to validate satellite water stage elevations.

2.4. Towards making satellite altimetry operational

Although most scientific SA articles, including this one, report accuracy assessment based on comparing results with in situ data, the ultimate goal is to use SA data in conjunction with in situ data in order to create a more thorough monitoring on rivers around the world and to be able to produce reliable data on rivers (mostly large ones) with little or unreliable in situ water stage data. In other words, to achieve a systematic operational use of satellite altimetry. Such advancement requires

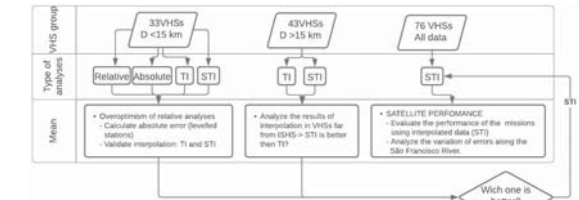


Figure 6: Flowchart showing how the VHSs were analysed and validated in packets (TI = temporal interpolation; STI = spatial and temporal interpolation).

sampling efficiency - η_{eff} (Bercher, 2008). Table 4 gives a short description of these metrics, their usefulness and their equation.

In many SA studies, the in situ measurements are associated by date without necessarily considering the time lag between the two measurements. Our initial approach, temporal interpolation (TI), consists in interpolating measurements of the nearest ISHS in time to produce a synchronised value with the satellite measurement. And, in a second approach, the spatial-temporal interpolation (STI) of in situ data was performed as a way to evaluate VHSs distant from any ISHSs (upstream and downstream) by considering both the time lag and the bottom slope of the river.

Interpolating the in situ values requires the following information: 1) the distance between the satellite crossing point (VHS) and the nearest upstream and downstream ISHS, 2) the local satellite crossing time (LSAT), and 3) the ISHS measurement times (four readings are used, two upstream and two downstream before and after the satellite acquisition time). These information are extracted from the VHS records, the ISHS records and from the river configuration data (a vector file describing the river geographically to account for the sinuosity of the river course). The temporal interpolation (TI) uses only the nearest ISHS while the spatial-temporal interpolation (STI) uses the closest upstream and downstream stations. As of now, the interpolation process in both space and time is linear and this procedure was included in the SWG package.

The STI and TI procedures can be described by the following steps and are illustrated in Figure 7.

- Interpolation:
 - Time interpolation (TI): use two nearest in situ measurements, upstream or downstream, with the shortest time lag with the satellite crossing time;
 - Spatial and temporal interpolation (STI): considering the distances from the satellite crossing points to all ISHSs, determine which are the two nearest: one upstream and one downstream;
- At the chosen ISHS(s), determine the pre- and post- measurement times from the satellite

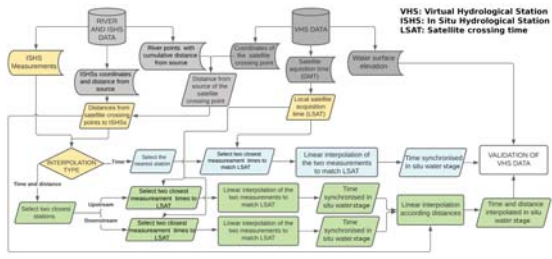


Figure 7: Flow chart of the steps for both interpolation methods: temporal interpolation (TI) and spatial-temporal interpolation (STI)

Table 5: Number of VHSs for each satellite mission per analysis group. The smaller number in parenthesis shows the number of cycle used.

Satellite	Envisat	Envisat-X	Saral	Jason-2	Jason-3	Sentinel-3A	Sentinel-3B	Total
Group 1: $D \leq 15$ km	6 (480)	5 (57)	6 (102)	5 (1392)	5 (725)	4 (192)	2 (44)	33 (2992)
Group 2: $D > 15$ km	7 (522)	7 (95)	7 (98)	2 (578)	2 (297)	11 (570)	7 (154)	43 (2314)
Total	13 (1002)	12 (152)	13 (200)	7 (1970)	7 (1022)	15 (762)	9 (198)	76 (5306)

that SA data become reliable and predictable and that flaws, accuracy and precision (or lack of it) be well enough understood and documented to be compensated or avoided.

In this article, a decision was made to publish all results regardless of their quality and to make sure anyone can reproduce them given the same tools (i.e. the SWG package). It is also with such preoccupation that all VHSs were processed using the same approach (the "pattern recognition" option) and that all satellite track crossings with the SFR were considered valid VHSs. For the same reason, the η_{eff} variable which is a measurement of the satellite efficiency is reported for all VHSs and is compiled per satellite altimetry mission in the Satellite Performance section (3.4) as an important means of evaluation as it accounts for the satellite success or failure to record data which is often unpredictable.

3. Results and discussion

All the VHSs from the six satellites were grouped depending on their distance with the available ISHSs ($D \leq 15$ km and $D > 15$ km) and are listed in Table 5. The number of cycle used per group and satellite is also shown. The large disparity between number of cycle used is due to the differences between mission duration (total or partial for on-going missions), orbit repeat time and distance between orbit for each satellite.

13

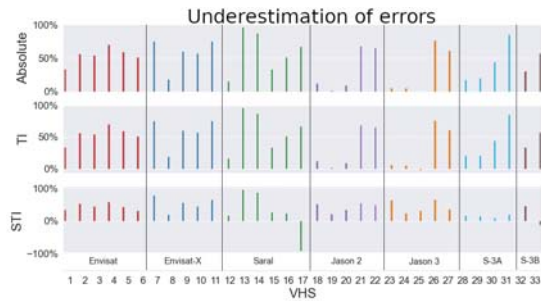


Figure 8: Representation of the underestimation of errors created by the relative RMSE compared to the absolute RMSE (top), the absolute RMSE with temporal interpolation (TI - middle) and the absolute RMSE with spatial-temporal interpolation (STI - bottom).

median instead of the mean, the overall absolute RMSE is 1.93 m whereas the relative one is 0.94 m, a difference of almost 1 m. However, when the spatial-temporal interpolation is added, the median RMSE is reduced by 0.29 m (1.64 m vs 1.93 m). Figure 9 illustrates this phenomenon graphically.

The apparent small improvement of the STI can be explained by the relative short distance between the VHSs and the ISHSs. The STI needs two ISHSs to interpolate which involves a second ISHS much more distant which introduces in the calculation a distant value much less correlated to the satellite measurement, especially considering that the linear interpolation used is a gross simplification of the water surface slope behaviour.

Temporal interpolation (TI). TI did not produce any significant difference from the absolute RMSE or even the AME (Figure 9a and 9b). On average, it has worsened the results by 0.2% (RMSE) and 0.3% (AME). In almost two third of the 33 VHSs, it had no effect at all (first column of fifth group in Table 6). This might be attributed to the fact that the oscillation of the water stage between two readings does not behave linearly. In yet another hypothesis, we might speculate that the readings are not always done at the standard times (7H00 and 17H00 local time) by the local operator (usually some local dweller living near the ISHS) but we have no evidence to that effect at this time.

Spatial-Temporal interpolation (STI). Applying STI on the ISHSs to compare them with the altimetry data brought improvements of 6.1% in RMSE compared to the absolute data and 6.5% compared to the TI data. In 22 of the 33 VHSs the results were improved by 29% on average while for the remaining 11 VHSs, the results were worsened by 39%. In seven of these 11 cases, the distance between the VHS and the nearest ISHS was 3 km or less which means that the spatial interpolation brought in data from a much more distant ISHS (the ISHS are distant from each other by 80 km on average). We

15

3.1. First group with a close-by ISHS: $D < 15$ km

In our first comparison 33 of these VHSs were evaluated and are presented in Table 6. The first five columns show the ISHS to which the data were compared with, the distance to that station, the satellite/orbit used, the number of measurement and the satellite/orbit efficiency (η_{eff}) for that station. The following groups of columns were organised by the four error types used: mean error (ME), root mean square error and relative root square error (RMSE/RRMSE) and absolute mean error (AME). These column groups show the relative error (Rel. only for RMSE), absolute error value (Abs), the error value with temporal interpolation (TI) and the error value with spatial-temporal interpolation (STI). Three column groups (RRMSE Improvement, RMSE Improvement and AME Improvement) show the gain in precision (if any) obtained by the relative analyses (RRMSE) and by each interpolation methods. In this case, negative values represent a worsening of the results. The RRMSE improvement was calculated using Eq. 1 and the RMSE improvements Eq. 2. A similar approach was used for AME.

$$RRMSE_{Improvement} = (RMSE_{Other} - RMSE_{Relative})/RMSE_{Other} \quad (1)$$

where *Other* can be either Absolute, TI or STI.

$$RMSE_{Improvement} = (RMSE_{Abs} - RMSE_{Inter})/RMSE_{Abs} \quad (2)$$

where *Inter* can be either TI or STI.

In the case of ME, since positive and negative errors cancel each other, a measure of improvement was senseless.

The relative (adjusted) RMSE values found (0.13 m – 6.29 m, $\bar{x}=1.37$ m, $\bar{x}=0.94$ m) are quite compatible with value found by other authors in medium sized and even large rivers around the world (see Table 1). This only confirms what has already been found for the SFR and other river courses of similar width (< 1 km). In terms of absolute (non-adjusted) RMSE, disregarding two VHSs from Saral with exceptionally large RMSE values (> 40 m), the values encountered are greater (0.61 m – 6.11 m $\bar{x}=2.08$ m, $\bar{x}=1.91$ m) than adjusted values which was expected. We initially attributed the large RMSE of the two Saral VHSs to tracker being "locked" on a cliff because of the sudden elevation drop. This appears to have happened near the *Pedras de Maria da Cruz* and *Santa Maria da Boa Vista* ISHSs. The presence of a cliff of over 100 m causes the satellite tracker to lock on the top of the cliff instead of the water surface by not having sufficient time to adjust the recording window to the sudden elevation change and thus record an erroneous value.

The comparison of the relative RMSE (RRMSE) with the absolute one confirmed the underestimation of errors initially expected in almost all VHSs (32 out of 33). On average, it was determined that for these 33 VHSs the relative RMSE was 46% better than the absolute one, 46% better than the ISHS with temporal interpolation (TI) and 36% better than the ISHS with spatial and temporal interpolation (STI). When looking at the values in metres and reducing the effect of outliers by using the

14

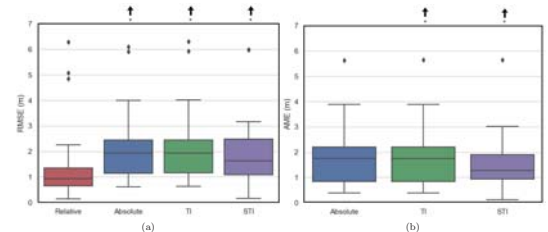


Figure 9: The effect of having levelled ISHSs (Absolute), temporal interpolation (TI) and spatial-temporal interpolation (STI) on two error analysis for Group 1: (a) RMSE and (b) AME. Note: the upward arrows indicate outliers outside the ordinate axis.

deduce that spatial interpolation should perhaps only be applied when the distance between the VHS and the ISHS is larger than 10 or 20% of the total distance separating the two ISHSs. This of course, depends on the configuration of the water surface slope of the reach.

Mean error (ME) and absolute mean error (AME). ME can give an insight on trend if its either clearly positive or clearly negative. Conversely the AME gives an idea of this error without trend. For the ME, because of the water surface slope, one would expect to see positive values when the VHS is upstream from the ISHS and negative for VHS downstream from the ISHS. The latter only happens seven times out of 33 and only two of these have negative values. Therefore the ME shows a positive trend for interpolated and non-interpolated data and indicates that all satellite mission tend to overestimate the water stage. This observation can have a variety of origin which will be discussed further down in Section 3.4. In this error metric (column group two of Table 1), the effect of TI and STI appear to have very little effect on average. This is also confirmed by the fact that the values of ME and AME are very close. The last column group of Table 6 (AME Improvement) is meant to show if and when comparing the SA data with the interpolated ISHS data can improve the validation results. The first column subtracts the TI error from the absolute error (Abs) and converts it in percentage. In this case positive values mean that the TI error is lesser than the Abs error and vice-versa for negative values. For almost half the VHS cases (16) no noticeable effect can be observed (less than 0.1%). For that error measure, TI did not, on average, bring any improvement to the validation of these 33 VHSs. Conversely, STI improved the validation of 21 of the 33 VHSs but appears to worsen the results on average. Looking more closely, one can see that this is caused by six VHSs with very large values and that they are all Jason-2 and -3 stations. The comparison between STI and TI brings an almost identical conclusion (last column of last group in Table 1).

16

Table 8: Results of interpolating locations of in situ stations based on one in situ stations upstream and one downstream.

In Situ Hydrological Station (ISHS)	Distance from ISHS (km)		Total distance (km)	ME (m)	AME (m)	RMSE (m)	R
	upstream	downstream					
Pirapora	-	113	-	-	-	-	-
Cachoeira do Manteiga	113	41	154	3.10	3.10	3.13	0.99
São Romão	41	63	104	-0.19	0.24	0.27	0.99
São Francisco	63	68	131	-0.25	0.31	0.36	0.99
Pedras de M. da Cruz	68	119	187	0.06	0.25	0.33	0.98
Manga	119	54	173	1.08	1.10	1.15	0.97
Carinhonha	54	129	183	-0.91	0.92	0.98	0.97
Bom Jesus da Lapa	129	141	270	-0.12	0.14	0.19	0.99
Ibotirama	141	82	223	0.37	0.39	0.41	0.99
Morpará	82	-	-	-	-	-	-
Mean	90	90	178	-	0.81	0.85	0.98
Median	82	82	178	-	0.35	0.39	0.99
Mean*	-	-	-	-	0.48	0.53	0.98
Median*	-	-	-	-	0.31	0.36	0.99

Legend: ME: mean error, AME: absolute mean error, RMSE: root mean square error, R: correlation, *: mean and median computed without the CManteiga station for which the presence of rapids invalidated the linear approach.



Figure 11: Rapids near Pirapora, downstream from station 41135000 and upstream from station Id 42210000.

to the karstic substrate or due to the deviation through an important irrigation canal in Jaíba but these were not verified thoroughly. We consider these results to be quite good considering the great distances (178 km on average) for which the interpolation was carried out. It is also noteworthy that the smallest error is associated with the longest distance (270 km). The correlations are all very high with 0.97 being the smallest. We should therefore be able to expect our errors of interpolation to be about half of these since the average total interpolation distances we had to consider are in the range of 90 km.

3.4. Satellite missions performance

Six satellites from four SA missions covering the period 2002-2020 were used in this article. Different technologies were used by these missions culminating in the change from low resolution mode (LRM) to synthetic aperture radar mode (SARM) used constantly by the Sentinel-3 mission. It is then likely that these changes might have brought significant improvement in the data collected by these satellite missions. To assess these changes, the 76 VHSs were grouped and their evaluation metrics averaged by satellite and presented in Table 9. The only exception is Envisat which was split

21

Table 9: Statistical report of performance organised by satellite and satellite mission.

Satellite	N_{VHS}	$\eta_{eff_{sat}}$ (%)		ME (m)		AME (m)		RMSE (m)		R	
		\bar{x}	\bar{z}	\bar{x}	\bar{z}	\bar{x}	\bar{z}	\bar{x}	\bar{z}		
Envisat	13	87	93	1.06	1.22	1.62	1.24	1.93	1.95	0.67	0.79
Envisat-X	12	67	66	1.00	1.28	1.77	1.31	1.96	1.61	0.70	0.86
Saral	13	52	66	10.46	1.45	10.64	1.45	11.23	2.06	0.38	0.46
Jason-2	7	96	97	1.81	1.77	1.82	1.77	2.34	2.23	0.66	0.73
Jason-3	7	88	96	2.73	1.60	2.73	1.60	3.12	1.65	0.64	0.75
S-3A	15	89	98	0.44	0.26	0.84	0.48	1.32	0.70	0.68	0.84
S-3B	9	88	88	-1.43	0.08	2.04	0.98	2.11	1.02	0.88	0.89

N_{VHS} is the number of VHS, \bar{x} is the mean and \bar{z} is the median. Best values are in bold.

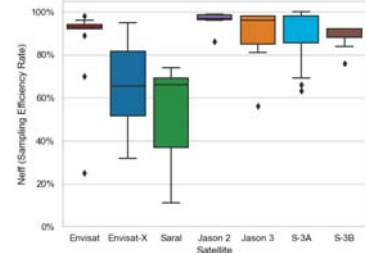


Figure 12: Satellite sampling efficiency organised by satellite and satellite mission.

in two subgroups: before and after the orbit change of 2010.

3.4.1. $\eta_{eff_{sat}}$: the satellite sampling efficiency

The satellite sampling efficiency is the result of numerous factors but we argue that the average of many cycles over a number of VHSs is representative of the ability of the satellite to record data in a common situation. Figure 12 and the second column group of Table 9 show the respective performance of each satellite. Jason-2 (mean) and S-3A (median) gave the best performance with Jason-3, S-3B and Envisat (original orbit) also producing very good results. It should be mentioned that S-3B and Envisat-X have much less cycles than the other satellite so that their average is less representative. Saral ranked last which can be at least partially explained by orbital stability problems after two years in orbit which caused the satellite track to shift laterally from nominal orbit by more than the “acceptable” 1 km (shift of over 5 km have been observed). Saral was eventually left in a drifting orbit starting July 2016 but these data were not considered here.

The box plot graph of Figure 12 shows unequivocally the good performance of Envisat (original orbit) as well as the Jason and S-3 satellites. The outliers observed for these missions are mostly related to the “cliff” effect but in some cases it is the lateral orbital shift that can also be the cause.

22

A number of factors can cause a low $\eta_{eff_{sat}}$ value. One is directly linked to a processing entity on-board the satellite: the “tracker”. The tracker computes the time window during which it will record the echos. If the window is opened early, the altimeter might not be able to record a waveform related to the surface below. This situation happens especially when a sudden drop in the surface elevation is observed like when the river is banked by a cliff. This has been partially solved by using a digital elevation model (DEM) that can help predict such situation (open loop tracker command - OLT). Another cause of satellite failure to record data is linked to the inherent characteristic of SA mission to suffer lateral shift from the nominal orbit. This is mostly the case when the satellite track runs more or less parallel to the river. Other phenomena can cause the satellite to fail but normally with a much lower occurrence.

3.4.2. Root mean square error, absolute mean error, mean error and correlation

Figure 13a and 13b show the RMSE and the AME for the 76 VHSs organised by satellite and by mission. The two graphs show very similar features but the RMSE gives more weight to values away from the central tendency (median). This can easily be observed with Saral because of the problems that have been explained above. Looking at the median, the two S-3 satellites stand out with smaller mean errors (ME) while the remaining satellites have averages between 1.0 and 2.0 metres. In terms of median RMSE, however, Saral and Jason-2 exceed the two metre bar showing greater errors than the other satellites.

The mean error cannot be interpreted directly because positive and negative values cancel themselves. It is also highly subject to the influence of outliers. But it can still be very informative when it shows a definite trend. Figure 13c shows a box plot graph of the ME by satellite. Interestingly, all satellite show a positive tendency meaning that the water stage measurements are generally over-estimated. The Sentinel-3 mission (A and B), however appear to have a ME much closer to zero (0.26 m and 0.08 m for A and B respectively).

Out of 76 VHSs, 62 (82%) show a positive ME (all mission combined), even with interpolated ISHS (STI). This water stage overestimation trend can have different sources from the propagation delay estimates through geophysical models of earth tide and geoid correction. But it can also be the result of retracker processing influenced by the footprint of the satellite altimeters which more often than otherwise overlaps the river banks. Finally it can be the result of the processing of the SA points by the SWG software. Nonetheless these levels of errors have been noticed by many other authors (see the following authors in Table 1: Jarihani et al., 2013; Tourian et al., 2016; Biancamaria et al., 2017; Créteaux et al., 2018; Jiang et al., 2020). Apart from the two S-3 satellites, all others appear to overestimate by a median value oscillating around 1.45 m. The two S-3 satellite show more balanced ME with 56% and 67% of the errors being positive and the remaining negative.

The Pearson coefficient of correlation (R) linearly quantifies the amount of covariance of the X and Y variables. It does not however quantify the magnitude of the precision of the measurements and it is insensitive to scale. In our case Y is the SA time series and X is the in situ one. The S-3B

23

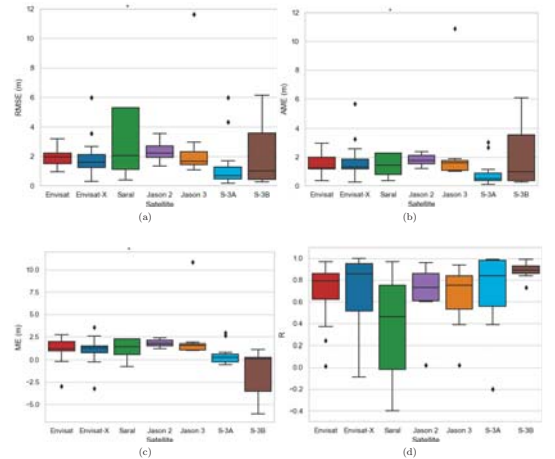


Figure 13: Root mean square error (a), absolute mean error (b), mean error (c) and correlation (d) of the 76 VHSs organised by satellite and mission.

data presented the strongest correlation with an average of 0.88. (Figure 13d). At the opposite end, Saral presented the worse correlations with an average of 0.38. The remaining satellites have average correlations between 0.64 and 0.70. The medians however (less sensitive to marginal values) range between 0.73 (Jason-2) to 0.84 (S-3A).

3.4.3. Analysis of the variation of errors along the São Francisco River reach

It has often been pointed out that the configuration of the river (width, presence of meanders) and its environmental context (topography and land cover of banks, presence of marginal lakes) directly affect the quality of water stage measurements using SA (Maillard et al., 2015; Boergens et al., 2016; Biancamaria et al., 2017; Bogning et al., 2018). This has lead us to analyse the São Francisco reach by section to explain possible reasons for the low quality of some results. Table 10, Figure 14a and 14b show how the errors and correlations vary with the distance from the river source. It is for instance noteworthy that negative ME are concentrated in the upstream section of the reach (between km 600 and km 750) which also show high levels of RMSE. The following paragraphs provide an analysis of the results for the 76 VHSs (see Table 11) by river section. Figure 17 shows the geographical context

24

Table 10: Mean errors and correlations by reaches of the São Francisco River

ISHS Upstream - Downstream	km	N_{VHSs}	VHSs numbers	η_{eff} (%)	AME (m)	RMSE (m)	R	RMSE StDev (m)
Pirapora - Cac. Manteiga	666	9	68, 1, 26, 14, 69, 70, 2, 15, 27	72	6.41	6.61	0.73	10.46
Cac. Manteiga - São Romão	780	12	39, 46, 40, 47, 3, 28, 16, 4, 17, 29, 41, 48	86	1.31	1.62	0.78	0.48
São Romão - São Francisco	821	5	5, 30, 18, 53, 54	81	1.15	1.65	0.67	1.42
São Francisco - PMCRuz	884	7	42, 49, 71, 6, 31, 72, 55	71	8.46	9.24	0.48	16.05
PMCRuz - Manga	952	7	19, 7, 32, 20, 73, 8, 33	62	2.42	2.61	0.66	1.6
Manga - Carinhanha/BJLapa	1070	10	56, 43, 50, 57, 58, 59, 9, 34, 60, 74	81	0.99	1.25	0.77	0.58
BJLapa - Ibotirama	1253	7	61, 62, 63, 21, 64, 65, 66	92	0.56	0.71	0.89	0.41
Ibotirama - Morpará	1393	4	44, 51, 22, 23	81	1.56	1.64	0.9	0.19
Juazeiro - SMBoaVista	1952	15	67, 10, 24, 35, 75, 25, 45, 52, 11, 36, 12, 37, 13, 38	81	4.55	5.16	0.3	10.42

of some of these VHSs.

ISHS Pirapora to ISHS Cachoeira do Manteiga. This section of the river concentrates the largest number of negative ME values. The irregular water surface slope caused in part by the presence of rapids partially explain the poor results for this section. The first three VHSs (68, 1/26 and 14) are all located about 20 km downstream from the rapids and all show poor results with over 3.0 m of RMSE. The next two VHSs (69 and 70) are located after the confluence of the Velhas River, one of the largest affluent of the São Francisco River representing 13% of its discharge. The following two stations (15 and 2/27) are about 20 km from the Cachoeira do Manteiga ISHS and show much better results (RMSE between 0.39 and 1.14 m) as the interpolation is mostly influence by the latter station without any important disturbance of the river flow.

ISHS Cachoeira do Manteiga to ISHS São Romão. With ten VHSs (12 when considering Envisat and Saral separately) this is one of the two sections with the most VHSs (the other being Juazeiro to Santa Maria da Boa Vista). This is mostly due to the existence of three large meanders (radius of about 6-7 km) that are crossed twice by both Envisat/Saral track 921 and Envisat-X track 321. The average RMSE for these VHSs is 1.62 m with a standard deviation of 0.48 m. Although better than for the previous section, these are average results that can be explained by the configuration of the river and its relation with the satellite tracks. It can be observed from Figure 17a that the Envisat tracks (old and new) follow the river longitudinally so that the waveforms are probably influenced by the presence of islands, sand bars and wetland. The Jason-2 -3 VHSs (39, 40, 46 and 47) are also subject to the influence of flood prone vegetation and islands in the vicinities of the VHS.

ISHS São Romão to ISHS São Francisco. Right after (downstream) the São Romão ISHS there is the third crossing of Envisat/Saral track 921 and Envisat-X track 321. The average RMSE of these three VHSs is 1.24 m. Other two VHSs are found in this reach, both from the same S-3A orbit (53 and 54).

25

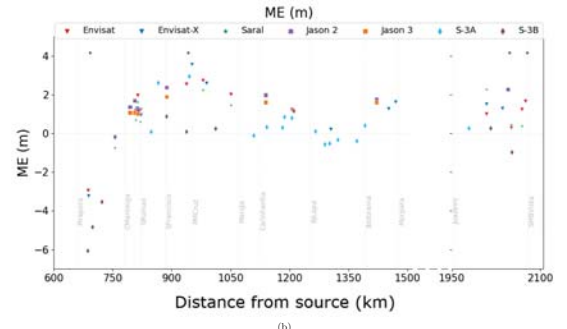
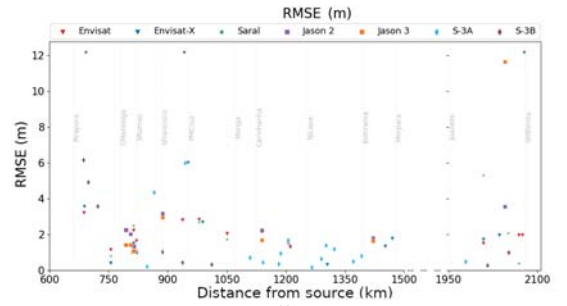


Figure 14: Variation of the Root mean square error (a) and mean error (b) along the São Francisco River reach.

26

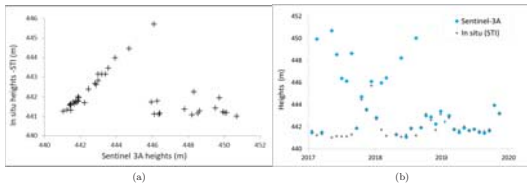


Figure 15: Graphs showing VHS 54 data from S-3A with relation to in situ data.

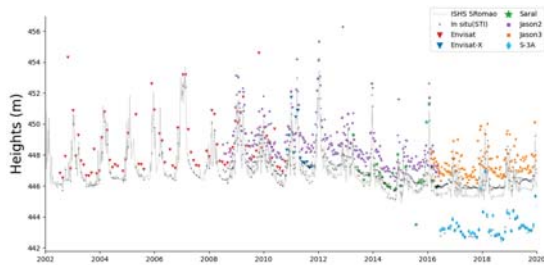


Figure 16: A multi satellite (5) time series near São Romão showing both the original in situ data (grey line) and the interpolated ones (dots).

While the first yielded a very good RMSE of 0.2 m, the second only achieved an RMSE of 4.34 m. Because the S-3A 323 track is parallel to the river it is likely not to cross it because of the possible lateral shift and be influenced by the topography of the river banks. Figure 15a shows that most of the erroneous data is related to low waters while Figure 15b shows these errors to be 6-10 m above the in situ data because it registered the river bank instead of the water. The fact that the OLC2 (Open Loop Tracking Command based on a digital elevation model) on-board S-3 was updated in March 2019 appear to be the cause for the drastic reduction of errors after that date. Figure 16 shows a time series for a section near São Romão characterised by numerous VHSs within a few kilometres enabling to combine five satellites to produce almost 18 years of continuous data. The figure shows both the original in situ data (grey line) and the interpolated one (small dots). It is interesting to see how the interpolated in situ data improves the validation, especially for the S-3A which is farther away from the ISHS.

27

ISHS São Francisco to ISHS Pedras de Maria da Cruz. Apart from two VHSs from S-3B (71 and 72) with good results (RMSE of 1.02 m and 0.43 m respectively) the other five VHSs show rather high RMSE values (2.80-48.36 m). The three VHSs near ISHS Pedras de Maria da Cruz (6/31, 55, 19) with poor results are all from ascending orbits (Figure 17b) and have lower η_{eff} than the average. We explain these high RMSE and low η_{eff} by the presence of a cliff of about 100 m on the right bank of the river which is crossed first by these satellites. Conversely, the two S-3B VHSs are on descending orbits and do not, in principle suffer from this problem, especially considering the open-loop tracker used by the S-3 satellites. This situation (large and small RMSE) resulted in a large mean RMSE (9.24 m) and an even larger standard deviation (stdev = 16.05 m).

ISHS Pedras de Maria da Cruz to ISHS Manga. Except for one VHS from S-3B (73), the remaining three stations are from the Envisat/Saral and Envisat-X orbits with RMSE ranging from 1.72 m to 5.99 m. This section of the river is characterised by a lot of bare ground and cleared land on both sides (Figure 17c) that can give a strong radar response that might lead the retracker to an erroneous result. Conversely, the S-3B station is bordered by dense riparian forest on top of the fact that the S-3 twin constellation generally gives more accurate results than the other satellites (RMSE of 0.32 m).

ISHS Manga to ISHS Bom Jesus da Lapa. Because there is only one VHS between Manga and Carinhanha (the next ISHS downstream), this section was extended to the next ISHS (Bom Jesus da Lapa). This is the section with the second best accuracy (mean RMSE of 1.25 m and stdev of 0.58 m) mostly because five of the nine VHSs are from S-3A. Four of these VHSs are from the same track that runs more or less parallel to the river for about 80 km along which it crosses the river at different places.

ISHS Bom Jesus da Lapa to ISHS Ibotirama. This section includes the ISHSs Gameleira and Paratinga but for which we had no absolute altitude so that they could not be used for interpolated validation. This 140 km section is almost exclusively covered by six S-3A VHSs four of which from the same track (380) that crosses the river several times. A seventh VHS (21) was created by the Envisat-X orbit. With an average RMSE of 0.71 m (stdev 0.41 m) this is the section with the most accurate results which is mostly attributable to the good performance of S-3. Station ISHS 66 is somewhat on the edge of the satellite track and has a quite smaller η_{eff} of 66% because the track of some cycle simply do not cross the river. The river banks are covered by dense riparian vegetation in many parts of this section which can also help explain the good performance of the retracers.

ISHS Ibotirama to ISHS Morpará. Only three VHSs are found in this 83 km section, two from Envisat-X and one from the J-2/J-3 original orbit. The results from this section are average with RMSE ranging from 1.33 m to 1.81 m and consistent with other results obtained with these satellites considering the width of the São Francisco River in this reach.

28

504 *ISHS Juazeiro to ISHS Santa Maria da Boa Vista*. This section of the river reach is not contiguous
 505 to the previous sections. It is also separated from the Morpará station by an important reservoir,
 506 the Sobradinho, the largest reservoir entirely in Brazil. The Juazeiro to Santa Maria da Boa Vista
 507 section is inserted between the former and another reservoir: Paulo Afonso. The overall results for
 508 this section are rather poor with a mean RMSE of 5.16 m and stdev of 10.42 m but then drops to
 509 1.31 m if Saral and Jason VHSs are removed and to 0.58 m with only the three S-3 VHSs. There seem
 510 to have an important discontinuity between J-2 and J-3 in VHS 45/52 where J-3 results are much
 511 worse than J-2 (Figure 18) even with the interpolated validation data. Furthermore, one can see that
 512 the overestimation of Jason-3 appears to drop a few months before 2018. We attribute this change
 513 to the updating of the OLTC of Jason-3 in August 2017. The accuracy of the OLTC can affect the
 514 results especially if the recording window closes before the microwave impulses had time to reach the
 515 water surface and return to the radar antenna causing the retracker to try to interpret a return from
 516 the river banks on higher ground.

517 3.5. On altimetry satellite performance

518 Table 9 shows a synthesis of the error metrics and correlations for the six satellites. In the context of
 519 the São Francisco River considered here as a medium sized river, the Sentinel-3 mission outperformed
 520 Envisat, Saral and Jason-2/-3 in all metrics. The best efficiency record however was that of Jason-2
 521 with 96% but this is also the satellite with the least VHSs (7). Still with 88% and 89% of average η_{eff}
 522 for S-3A and S-3B respectively, the S-3 satellites come in second place. In addition, S-3A produced the
 523 lowest average errors in ME, AME and RMSE. As for S-3B, it was plagued by three VHSs between
 524 Pirapora and Cachoeira do Manteiga which produced poor results for most VHSs (see comments
 525 above about rapids) and which account for one third of the S-3B VHSs. Still S-3B presented the
 526 highest correlation scores averaging 0.88.

527 Envisat is the oldest of the altimetry missions considered but presented on average very good
 528 results with an average performance between S-3A and S-3B. Even in its new orbit that covered the
 529 last two years of its active life, Envisat performed better than the Saral and Jason missions (except
 530 for the η_{eff} that is quite lower than during its original orbit).

531 The Saral mission launched as a continuation to Envisat with the same original orbit appears to
 532 have the lowest performance but this can be attributed in large part to the mechanical problems it
 533 suffered that prevented the proper maintenance of its nominal orbit causing it to drift far beyond the
 534 normal 1 km shift of other similar missions. This is especially noticeable through the low efficiency.
 535 The DEM-based open loop tracker did not perform well and was only very shortly used. In fact the
 536 cycles from its first year (before the mechanical failure) generally produced better results than the
 537 later cycles. The ME, AME and RMSE median values are not that distant from the other satellites
 538 which tend to indicate the influence of strong outliers.

539 The Jason mission had a slightly poorer performance than Envisat. J-2 showed greater error
 540 means than J-3 but the situation is inverted when the median is considered. The efficiency of both

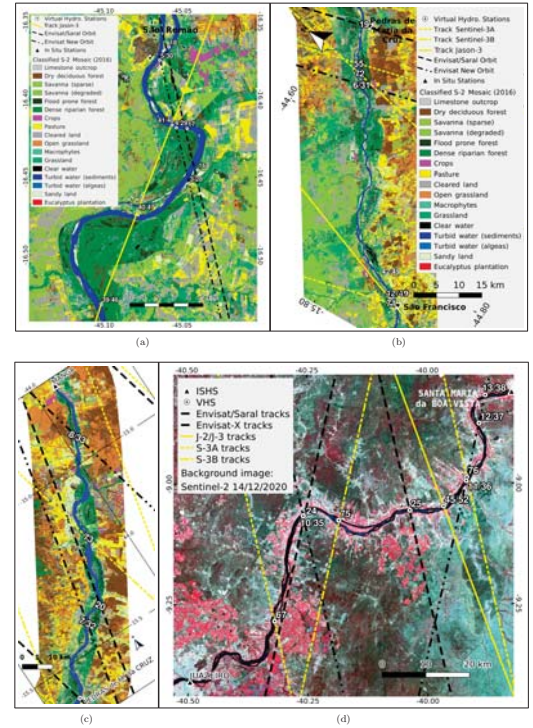


Figure 17: Land cover context of four sections of the São Francisco: a) São Romão, b) São Francisco to Pedras de Maria da Cruz, c) Pedras de Maria da Cruz to Manga and d) Juazeiro to Santa Maria da Boa Vista.

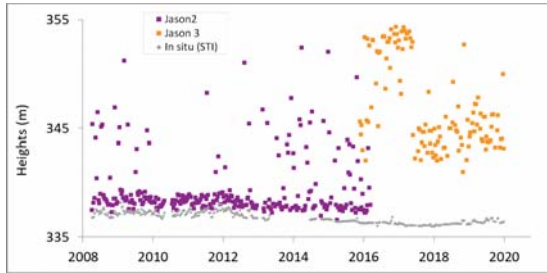


Figure 18: A Jason-2/-3 timeseries in the Juazeiro-Sta Maria da Boa Vista section showing the apparent discrepancy between J-2 and J-3.

541 J-2 and J-3 was very good, an important observation considering the large number of cycles for these
 542 satellites: 293 cycles during the nine years of J-2 before it was changed to an interleaved orbit and 166
 543 cycles para Jason 3 up to the writing of this paper. All Jason satellites mean errors were close to, or
 544 exceeded 2.0 m. The larger footprint caused by the higher orbit altitude are probably at the heart
 545 of these results for a river width of less than 1 km. Because both Jasons only created seven VHSs
 546 (due to greater distance between tracks) two J-2 VHSs with RMSE over 3 m and one J-3 VHS with
 547 a RMSE of 11.6 m took their toll on both RMSE means.

548 The fact that Sentinel-3 outperformed the other missions in terms of accuracy can probably be
 549 attributed to its smaller footprint (SAR mode) and to a more efficient open loop tracker responsible
 550 for a better lock on the Earth's surface and these advances are crucial for monitoring smaller rivers.

551 4. CONCLUSIONS

552 This study aimed at evaluating the performance of four satellite altimetry missions on a medium
 553 sized river in Brazil, the São Francisco. It also had the objective to test a validation approach based on
 554 two interpolation options: temporal interpolation (TI) and spatial-temporal interpolation (STI). This
 555 was made possible by the fact that the absolute elevation of the water stage measurements was known
 556 for 12 in situ stations along the river reach under scrutiny. The first part of the results concentrate
 557 on 33 virtual hydrological stations located at less than 15 km of one of the in situ stations, then an
 558 additional 43 virtual stations at greater distances were also evaluated. In the first part the traditional
 559 (not interpolated) validation metrics were compared with the interpolated ones whereas only the
 560 interpolated metrics were used in the second part. A third section is dedicated to the interpolation
 561 approach in itself and an analysis of the performance of the six satellites (from the four satellite
 562 altimetry missions) makes up the fourth section.

Table 11: Error metrics and correlation for the 76 VHSs ordered by satellite/orbit and from upstream to downstream.

ID VHS	km	Satellite	η_{eff} (%)	ME (m)	AME (m)	RMSE (m)	R
1	688	Envisat	25	-2.96	2.96	3.20	0.69
2	756	Envisat	89	-0.19	0.77	1.14	0.86
3	809	Envisat	93	1.16	1.18	1.38	0.89
4	814	Envisat	94	1.95	1.98	2.22	0.73
5	821	Envisat	93	1.21	1.21	1.64	0.79
6	938	Envisat	70	2.53	2.68	2.80	0.79
7	980	Envisat	92	2.72	2.72	2.82	0.90
8	1051	Envisat	96	2.00	2.00	2.03	0.97
9	1206	Envisat	93	1.22	1.22	1.50	0.86
10	2009	Envisat	98	0.99	1.14	1.50	0.24
11	2051	Envisat	94	0.29	0.36	0.94	0.62
12	2069	Envisat	94	1.23	1.24	1.95	0.01
13	2075	Envisat	94	1.65	1.65	1.96	0.37
Envisat Mean			87	1.06	1.62	1.93	0.67
Envisat Median			93	1.22	1.24	1.95	0.79
14	689	Envisat-X	42	-3.24	3.24	3.55	0.57
15	756	Envisat-X	79	-0.25	0.34	0.39	0.98
16	811	Envisat-X	63	1.27	1.27	1.35	0.94
17	814	Envisat-X	68	1.28	1.34	1.50	0.79
18	822	Envisat-X	63	0.94	0.94	0.95	1.00
19	952	Envisat-X	32	3.55	5.65	5.99	-0.09
20	989	Envisat-X	47	2.58	2.58	2.68	0.90
21	1305	Envisat-X	95	0.20	0.27	0.31	0.99
22	1452	Envisat-X	53	1.26	1.26	1.33	0.85
23	1470	Envisat-X	74	1.61	1.61	1.76	0.86
24	2009	Envisat-X	89	1.50	1.50	1.71	0.21
25	2036	Envisat-X	95	1.28	1.28	1.95	0.35
Envisat-X Mean			67	1.00	1.77	1.96	0.70
Envisat-X Median			66	1.28	1.31	1.61	0.86
26	688	Saral	74	35.19	35.19	35.74	-0.12
27	756	Saral	71	-0.75	0.75	0.80	0.97
28	809	Saral	71	0.69	0.69	0.97	0.87
29	814	Saral	66	1.61	1.83	2.49	0.43
30	821	Saral	69	0.59	0.78	1.12	0.78
31	938	Saral	11	47.95	47.95	48.36	-0.02
32	980	Saral	43	2.23	2.28	2.68	0.46
33	1051	Saral	34	1.45	1.45	1.72	0.50
34	1206	Saral	29	1.18	1.18	1.62	0.74
35	2009	Saral	69	2.26	2.26	5.30	0.00
36	2051	Saral	66	0.44	0.92	2.06	-0.07
37	2069	Saral	37	0.37	0.37	0.38	0.75
38	2075	Saral	37	42.73	42.73	42.78	-0.40
Saral Mean			52	10.46	10.64	11.23	0.38
Saral Median			66	1.45	1.45	2.06	0.46
39	794	Jason-2	96	1.37	1.37	2.26	0.60
40	806	Jason-2	97	1.70	1.71	2.03	0.73
41	814	Jason-2	97	1.21	1.22	1.34	0.93
42	887	Jason-2	86	2.38	2.38	3.16	0.62
43	1139	Jason-2	99	1.98	1.99	2.23	0.79
44	1421	Jason-2	98	1.77	1.77	1.81	0.96
45	2045	Jason-2	99	2.27	2.27	3.56	0.02
Jason-2 Mean			96	1.81	1.82	2.34	0.66
Jason-2 Median			97	1.77	1.77	2.23	0.73

Continued on next page

Table 11 – Continued from previous page

ID VHS	km	Satellite	η_{eff} (%)	ME (m)	AME (m)	RMSE (m)	R
46	794	Jason-3	96	1.07	1.07	1.42	0.77
47	806	Jason-3	98	1.07	1.08	1.42	0.75
48	814	Jason-3	98	1.01	1.01	1.08	0.94
49	887	Jason-3	89	1.90	1.90	2.95	0.39
50	1139	Jason-3	56	1.60	1.60	1.70	0.67
51	1421	Jason-3	98	1.60	1.60	1.65	0.91
52	2045	Jason-3	81	10.87	10.87	11.63	0.02
Jason-3 Mean			88	2.73	2.73	3.12	0.64
Jason-3 Median			96	1.60	1.60	1.65	0.75
53	848	S-3A	95	0.08	0.14	0.20	0.98
54	866	S-3A	86	2.60	2.67	4.34	-0.20
55	945	S-3A	63	2.94	3.02	5.98	-0.20
56	1109	S-3A	98	-0.12	0.48	0.70	0.75
57	1142	S-3A	69	0.32	0.32	0.44	0.92
58	1182	S-3A	85	0.30	0.30	0.35	0.99
59	1187	S-3A	98	0.84	0.84	0.94	0.87
60	1206	S-3A	98	0.79	0.83	1.68	0.39
61	1266	S-3A	98	0.10	0.12	0.16	0.99
62	1290	S-3A	90	-0.57	0.60	0.64	0.98
63	1302	S-3A	98	-0.53	1.15	1.38	0.82
64	1323	S-3A	100	-0.34	0.92	1.18	0.60
65	1371	S-3A	98	-0.40	0.43	0.49	0.98
66	1392	S-3A	66	0.40	0.40	0.80	0.84
67	1979	S-3A	98	0.26	0.38	0.48	0.51
S-3A Mean			89	0.44	0.84	1.32	0.68
S-3A Median			98	0.26	0.48	0.70	0.84
68	687	S-3B	92	-6.07	6.07	6.15	0.84
69	699	S-3B	88	-4.84	4.84	4.91	0.87
70	723	S-3B	92	-3.54	3.54	3.57	0.93
71	887	S-3B	84	0.87	0.94	1.02	0.86
72	938	S-3B	92	0.08	0.36	0.43	0.90
73	1012	S-3B	88	0.24	0.26	0.32	0.99
74	1211	S-3B	88	1.15	1.15	1.34	0.73
75	2016	S-3B	76	0.26	0.26	0.27	0.89
76	2052	S-3B	92	-0.98	0.98	0.99	0.93
S-3B Mean			88	-1.43	2.04	2.11	0.88
S-3B Median			88	0.08	0.98	1.02	0.89
General Mean			68	2.47	3.21	3.57	0.65
General Median			89	1.16	1.23	1.63	0.79

523 First group of 33 VHSs. For the first group located at less than 15 km, for which mean-adjusted
524 values were considered, the RMSE were 46% less than absolute errors showing the underestimation
525 of errors trend of this approach. It was also 36% more optimistic than in situ water stage values
526 interpolated by the spatial-temporal approach. In the context of wanting to use SA to complement in
527 situ measurements, it is important to consider these absolute errors. The relative (adjusted) RMSE
528 values found (0.13 m-6.29 m, \bar{x} =1.37 m, \hat{x} =0.94 m) are quite compatible with value found by other
529 authors in medium sized and even large rivers around the world. In terms of absolute (non-adjusted)
530 RMSE, withdrawing two VHSs from Saral with exceptionally large RMSE, the values encountered
531 are greater (0.61 m-6.11 m \bar{x} =2.08 m, \hat{x} =1.91 m) than adjusted values, as expected. The use of time
532 interpolated in situ values did not bring improvement to the validation process with errors values

33

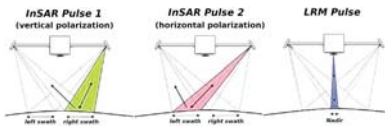


Figure 19: Representation of the SWOT left and right "non-pingpong" InSAR swath as well as the central LRM swath (adapted from NASA/JPL, CNES, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/swot>).

533 rivers. The greater success of the Sentinel-3 mission presented in this article is a direct reflection of
534 this turn towards continental lakes and rivers.

535 The recently launched Sentinel-6 (November 2020) can be thought of as another valuable step in
536 this endeavour towards hydrology as it operates, like S-3 in SARM (but also in LRM) and will benefit
537 from the OLTIC technology. But perhaps the most promising mission will be SWOT (Surface Water
538 and Ocean Topography) to be launched in 2022 that, from the start, was planned for hydrology as
539 well as oceanography. SWOT will use two InSAR (radar interferometer) altimeter to cover each a
540 50 km swath with a 20 km gap between them and produce a bi-dimensional water elevation model.
541 The 20 km gap between the two swath will be filled by a conventional LRM altimeter (Figure 19).

542 CRediT authorship contribution statement

543 **Luana Kessia Martins:** Conceptualization (PhD Thesis), Methodology, Formal analysis, Data
544 curation, Writing - original draft, Software. **Éber J.A. Pinto:** Supervision, Review. **Philippe**
545 **Maillard:** Supervision, Software, Writing - Review, Editing and Translating.

546 Acknowledgements

547 The authors wish to thank Brazil's Geological Company *Companhia de Pesquisa de Recursos*
548 *Minerais* for their financial support.

549 References

549 ANA (Brasil). 2019. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe anual. Technical Report.
550 Agência Nacional de Águas (Brasil).
551 ANA (BRASIL). 2019. HIDROWEB - séries históricas. <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Ac-
552 cessed: 2019-09-30.
553 Bercher, N., 2008. Précision de l'altimétrie satellitaire radar sur les cours d'eau: Développement d'une
554 méthode standard de quantification de la qualité des produits alti-hydrologiques et applications.
555 Ph.D. thesis. AgroParisTech - ENGREF - Université Montpellier II.

35

523 very close to the the absolute errors possibly because more often than otherwise, very little change is
524 recorded between two readings by the ISHS operators. Conversely, the spatial-temporal interpolation
525 reduced the validation absolute mean errors by 34% and the RMSE by 26% for two thirds of the VHSs
526 analysed. For the remaining third, STI caused a worsening of the validation errors in VHS nearby
527 an ISHS because the interpolation introduced a value from a distant ISHS not likely to be highly
528 correlated with the nearby one.

529 **Second group of 43 VHSs.** For the second group ($D > 15$ km) STI reduced the AME and RMSE for
530 86% of them proving to be an appropriate method of validation for VHSs distant from any ISHS. Using
531 a linear interpolation approach implies a constant waterline slope being a rough approximation of the
532 reality. Any break in the water surface slope caused by waterfalls or even rapids will compromise the
533 results.

534 **Temporal-spatial interpolation.** The spatial-temporal interpolation was tested using two ISHS to
535 compute the water stage at a third ISHS located between the other two in order to verify the ap-
536 propriateness of the STI approach. This was done for eight locations using the time series of the
537 in-between ISHS to validate the interpolated data. With a median AME of 0.35 m, an RMSE of
538 0.39 m and a correlation of 0.99 the STI was considered most valid, especially with an average dis-
539 tance of 178 km between stations. This lead us to apply STI to all 76 VHSs in order to analyse the
540 performance of the different SA mission.

541 **Overall results.** The Sentinel-3 mission had the overall best results, sometimes with S-3A, other times
542 with S-3B. The efficiency index (η_{eff}) is the only metric were Jason-2 outperformed S-3 (but the
543 greatest median is still with S-3). In 62 of the 76 VHSs the water stage was super-estimated but the
544 trend is much less pronounced with S-3 (median bias of 0.17m). Apart from the two S-3 satellites,
545 the other SA missions appear to overestimate the water stage by a median value oscillating around
546 1.45 m. Different explanations can be brought forward for this (propagation speed corrections, crust
547 deformation, geoid correction, retracker errors, etc.) but none could be verified here.

548 By analysing the distribution of the errors along the São Francisco reach it became clear that while
549 some sectors present excellent results, others seem to concentrate bad ones with greater errors and
550 smaller efficiency indices. As the width of the river does not appear to be directly responsible, we
551 argue that the environmental context is also a factor of importance. Three of these are put forward: 1)
552 the topography of the river banks, 2) some land cover types are capable of echoing strong microwave
553 signal that can be confused with water, and 3) the presence of meanders and marginal lakes that can
554 produce off-nadir echos giving false water stage values. The Open-Loop Tracking Command helped
555 solve problems of the first type.

556 **Future trends.** Most SA missions were launched with oceanography as their foremost objective. The
557 incorporation of Open Loop Tracking Command in recent missions represents an effort to improve
558 possibilities for hydrological applications. This is especially an important innovation for medium-size

34

559 Biancamaria, S., Frappart, F., Leleu, A.S., Marieu, V., Blumstein, D., Desjonquères, J.D., Boy, F.,
560 Sottolichio, A., Valle-Levinson, A., 2017. Satellite radar altimetry water elevations performance over
561 a 200 m wide river: Evaluation over the garonne river. *Advances in Space Research* 59, 128-146.
562 doi:<https://10.1016/j.asr.2016.10.008>.

563 Birkett, C.M., Mertes, L., Dunne, T., Costa, M., Jasinski, M., 2002. Surface water dynamics in the
564 amazon basin: Application of satellite radar altimetry. *Journal of Geophysical Research: Atmo-
565 spheres* 107, LBA-26. doi:<https://10.1029/2001JD000609>.

566 Boergens, E., Dettmering, D., Schwatke, C., Seitz, F., 2016. Treating the hooking effect in satellite
567 altimetry data: A case study along the mekong river and its tributaries. *Remote Sensing* 8, 91.
568 doi:<https://10.3390/rs8020091>.

569 Boergens, E., Dettmering, D., Seitz, F., 2019. Observing water level extremes in the mekong river
570 basin: The benefit of long-repeat orbit missions in a multi-mission satellite altimetry approach.
571 *Journal of hydrology* 570, 463-472. doi:<https://10.1016/j.jhydrol.2018.12.041>.

572 Bogning, S., Frappart, F., Blarel, F., Niño, F., Mahé, G., Briquet, J.P., Seyler, F., Ouguéné, R.,
573 Etamé, J., Paiz, M.C., et al., 2018. Monitoring water levels and discharges using radar altimetry in
574 an ungauged river basin: The case of the ogooué. *Remote Sensing* 10, 350. doi:<https://10.3390/rs10020350>.

575 Coss, S., Durand, M., Yi, Y., Jia, Y., Guo, Q., Tuozolo, S., Shum, C., Allen, G.H., Calmant, S.,
576 Pavelsky, T., 2020. Global river radar altimetry time series (gratts): new river elevation earth science
577 data records for the hydrologic community. *Earth System Science Data* 12, 137-150. doi:<https://10.5194/essd-12-137-2020>.

578 Crétaux, J.F., Bergé-Nguyen, M., Calmant, S., Jamangulova, N., Satykanov, R., Lyard, F., Perosanz,
579 F., Verrou, J., Samine Montazem, A., Le Gülicher, G., et al., 2018. Absolute calibration or validation
580 of the altimeters on the sentinel-3a and the jason-3 over lake issykkul (kyrgyzstan). *Remote Sensing*
581 10, 1679. doi:<https://10.3390/rs10111679>.

582 Crétaux, J.F., Birkett, C., 2006. Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geo-
583 science* 338, 1098-1112. doi:<https://10.1016/j.crte.2006.08.002>.

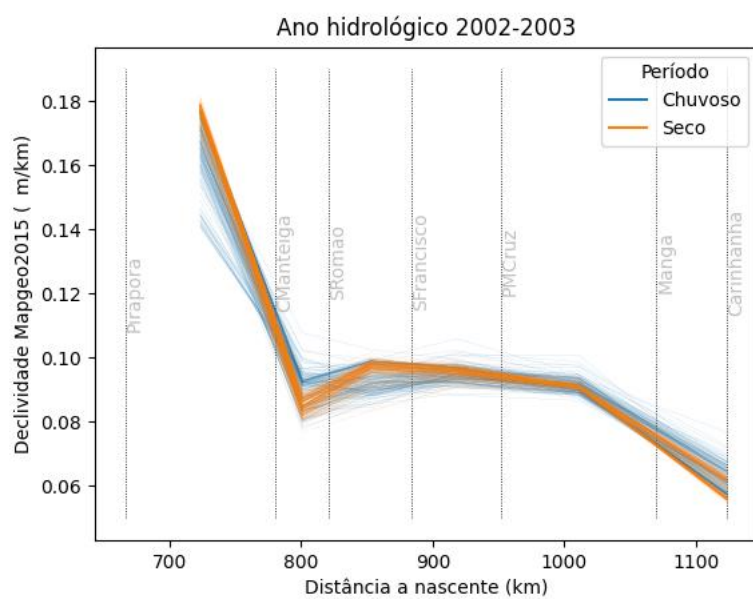
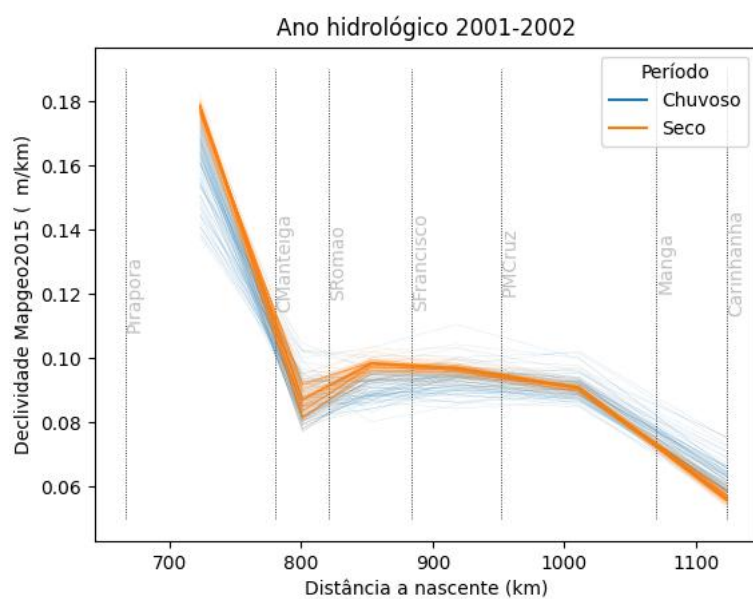
584 Crétaux, J.F., Nielsen, K., Frappart, F., Papa, F., Calmant, S., Benveniste, J., 2017. Hydrological
585 applications of satellite altimetryrivers, lakes, man-made reservoirs, inundated areas, in: *Satellite
586 Altimetry Over Oceans and Land Surfaces*. CRC Press, pp. 459-504.

587 da Silva, J., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O., Cochonneau, G., Mansur, W., 2010. Water
588 levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote
589 Sensing of Environment* 114, 2160-2181.

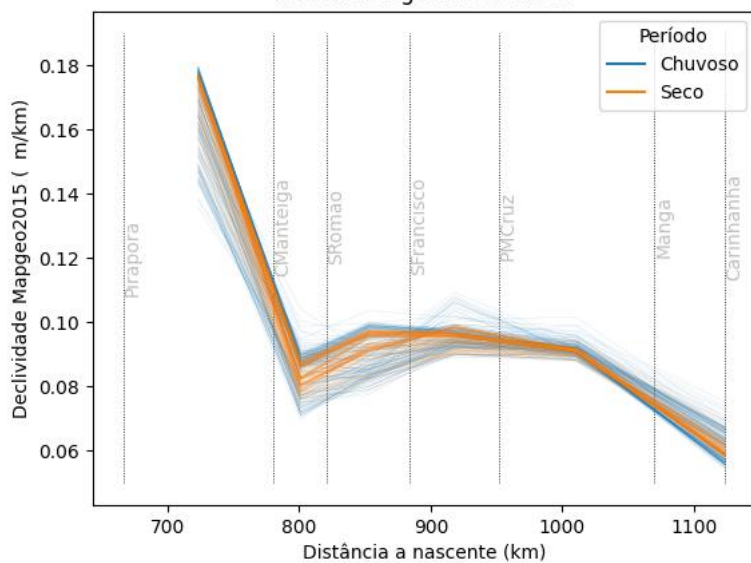
36

- 566 Da Silva, J.S., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O.C., Cochonneau, G., Mansur, W.J., 2010a.
567 Water levels in the amazon basin derived from the ers 2 and envisat radar altimetry missions.
568 *Remote sensing of environment* 114, 2160–2181. doi:<https://10.1016/j.rse.2010.04.020>.
- 569 Da Silva, J.S., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O.C., Cochonneau, G., Mansur, W.J., 2010b.
570 Water levels in the amazon basin derived from the ers 2 and envisat radar altimetry missions.
571 *Remote sensing of environment* 114, 2160–2181. doi:<https://10.1016/j.rse.2010.04.020>.
- 572 Dettmering, D., Schwatke, C., Boergens, E., Seitz, F., 2016. Potential of envisat radar altimetry for
573 water level monitoring in the pantanal wetland. *Remote Sensing* 8, 596. doi:<https://10.3390/rs8070596>(registeringDOI).
- 574 European Space Agency, 2021. Sentinel-3 altimetry introduction. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/resolutions/resolution-cells>. Accessed: 2021-03-10.
- 575 Frappart, F., Papa, F., Marien, V., Malbeteau, Y., Jordy, F., Calmant, S., Durand, F., Bala, S., 2015.
576 Preliminary assessment of saral/altika observations over the ganges-brahmaputra and irrawaddy
577 rivers. *Marine Geodesy* 38, 568–580. doi:<https://10.1080/01490419.2014.990591>.
- 578 Gao, Q., Makhoul, E., Escorihuela, M.J., Zribi, M., Seguí, P.Q., García, P., Roca, M., 2019. Analysis of
579 retracked performances and water level retrieval over the ebro river basin using sentinel-3. *Remote
580 Sensing* 11, 718. doi:<https://10.3390/rs11060718>.
- 581 Jarihani, A.A., Callow, J.N., Johansen, K., Gouwleeuw, B., 2013. Evaluation of multiple satellite
582 altimetry data for studying inland water bodies and river floods. *Journal of Hydrology* 505, 78–90.
583 doi:<https://10.1016/j.jhydrol.2013.09.010>.
- 584 Jiang, L., Nielsen, K., Dinardo, S., Andersen, O.B., Bauer-Gottwein, P., 2020. Evaluation of sentinel-3
585 srar sar altimetry over chinese rivers. *Remote Sensing of Environment* 237, 111546.
- 586 Koblinsky, C., Clarke, R., Brenner, A., Frey, H., 1993. Measurements of river level variations with
587 satellite altimetry. *Water Resources Research* 29, 1839–1848. doi:10.1029/93WR00542.
- 588 LeFavour, G., Alsdorf, D., 2005. Water slope and discharge in the amazon river estimated using
589 the shuttle radar topography mission digital elevation model. *Geophysical Research Letters* 32.
590 doi:<https://10.1029/2005GL023836>.
- 591 Maillard, P., Bercher, N., Calmant, S., 2015. New processing approaches on the retrieval of water
592 levels in envisat and saral radar altimetry over rivers: A case study of the são francisco river, brazil.
593 *Remote Sensing of Environment* 156, 226–241. doi:<https://10.1016/j.rse.2014.09.027>.
- 594 Michailovsky, C.I.B., McEmmis, S., Berry, P., Smith, R., Bauer-Gottwein, P., 2012. River monitoring
595 from satellite radar altimetry in the zambezi river basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 16,
596 2181–2192. doi:<https://10.3390/rs10020350>.
- 597 Ministério do Meio Ambiente (BRASIL), 2006. Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco.
598 Technical Report. Ministério do Meio Ambiente (BRASIL). Brasília, Brazil.
- 599 Normandin, C., Frappart, F., Diepkil, A., Marien, V., Mougín, E., Blarel, F., Lubac, B., Braquet, N.,
600 Ba, A., 2018. Evolution of the performances of radar altimetry missions from ers-2 to sentinel-3a
601 over the inner niger delta. *Remote Sensing* 10, 833. doi:<https://10.3390/rs10060833>.
- 602 Roux, E., Santos da Silva, J., Cesar Vieira Getirana, A., Bonnet, M.P., Calmant, S., Martínez, J.M.,
603 Seyler, F., 2010. Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry: a
604 comparative study. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques* 55, 104–120.
605 doi:<https://10.1080/02626660903529023>.
- 606 Sarmiento, S.E., Khan, S.D., 2010. Spatial-temporal variability of great slave lake levels from satellite
607 altimetry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 7, 426–429. doi:<https://10.1109/LGRS.2009.2038178>.
- 608 Schneider, R., Tarpanelli, A., Nielsen, K., Madsen, H., Bauer-Gottwein, P., 2018. Evaluation of multi-
609 mode cryosat-2 altimetry data over the po river against in situ data and a hydrodynamic model.
610 *Advances in water resources* 112, 17–26. doi:<https://10.1016/j.advwatres.2017.11.027>.
- 611 Schwatke, C., Dettmering, D., Börgens, E., Bosch, W., 2015. Potential of saral/altika for inland water
612 applications. *Marine Geodesy* 38, 626–643. doi:<https://10.1080/01490419.2015.1008710>.
- 613 Tourian, M., Tarpanelli, A., Elmi, O., Qin, T., Brocca, L., Moramarco, T., Sneeuw, N., 2016. Spa-
614 tiotemporal densification of river water level time series by multimission satellite altimetry. *Water
615 Resources Research* 52, 1140–1159. doi:<https://10.1002/2015WR017654>.
- 616 Verron, J., Bonnefond, P., Aouf, L., Birol, F., Bhowmick, S., Calmant, S., Conchy, T., Crétaux,
617 J.F., Dibarboure, G., Dubey, A., et al., 2018. The benefits of the ka-band as evidenced from the
618 saral/altika altimetric mission: Scientific applications. *Remote Sensing* 10, 163. doi:<https://10.3390/rs10020163>.

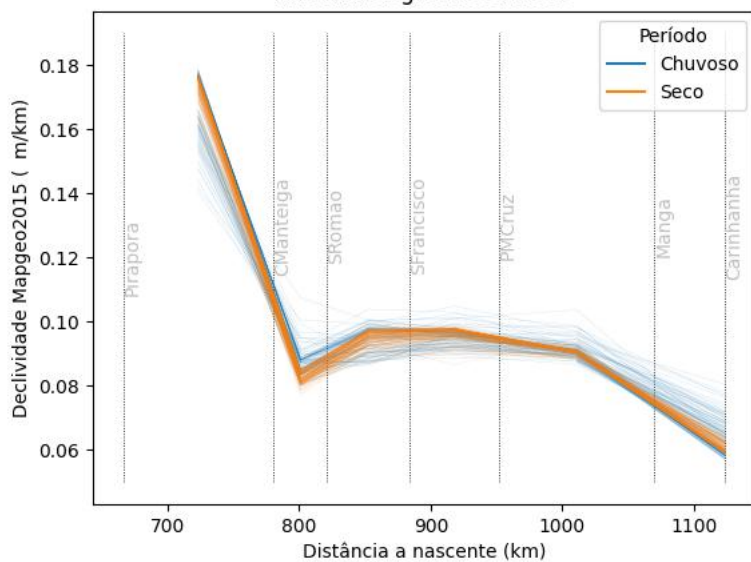
APÊNDICE 4 – Perfis de Declividade diários por Ano Hidrológico



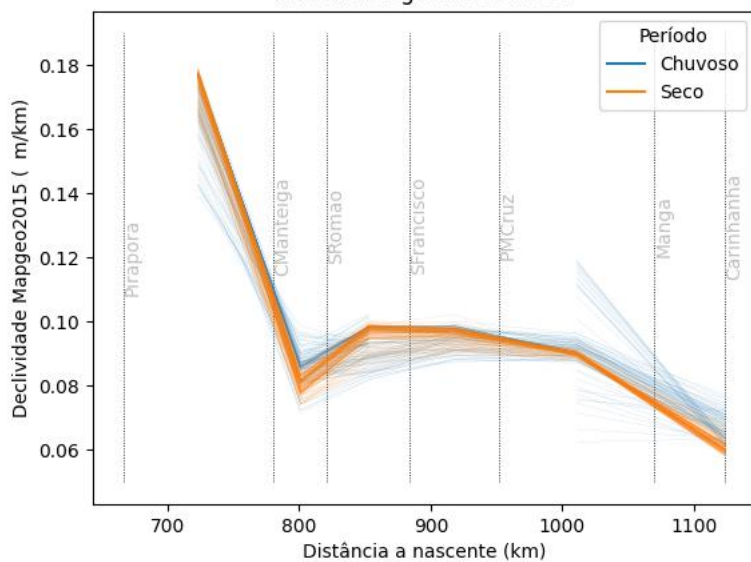
Ano hidrológico 2003-2004



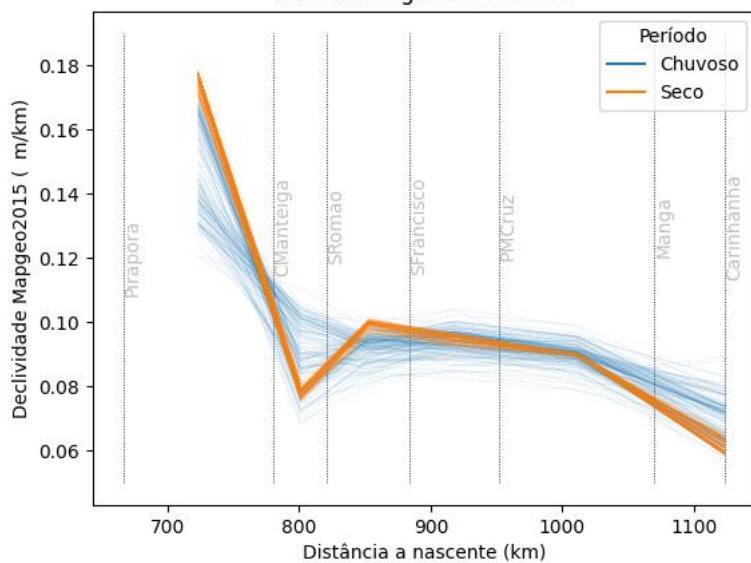
Ano hidrológico 2004-2005



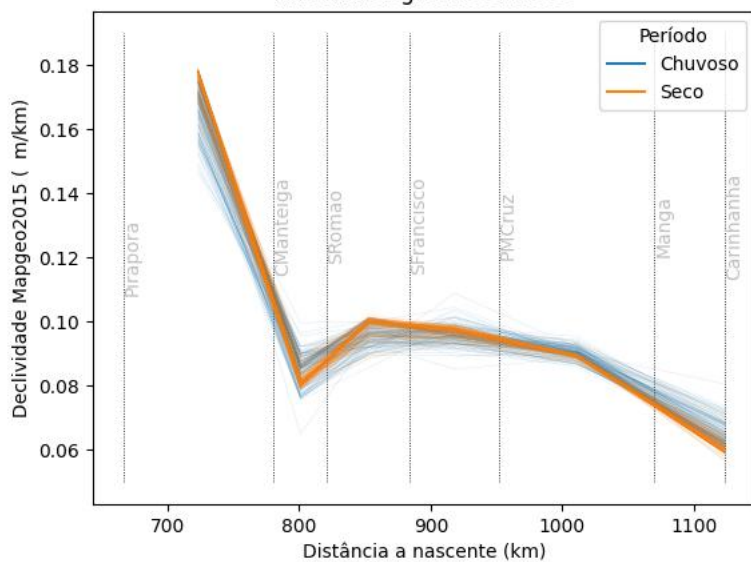
Ano hidrológico 2005-2006



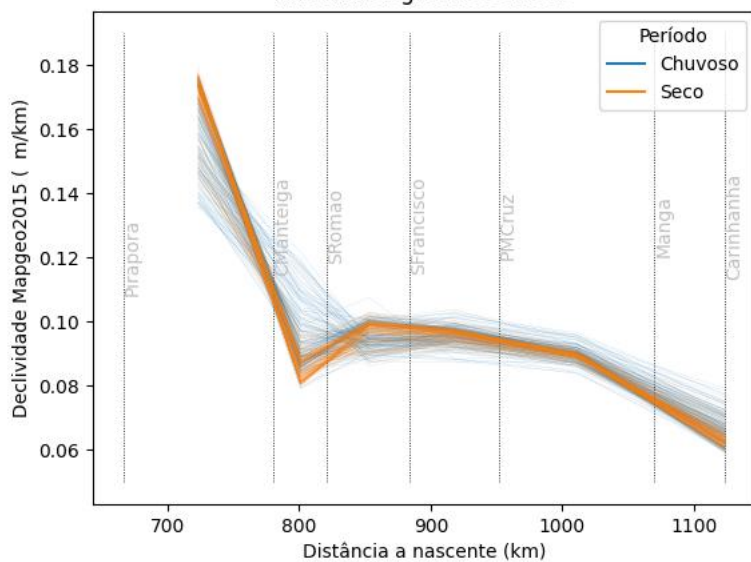
Ano hidrológico 2006-2007



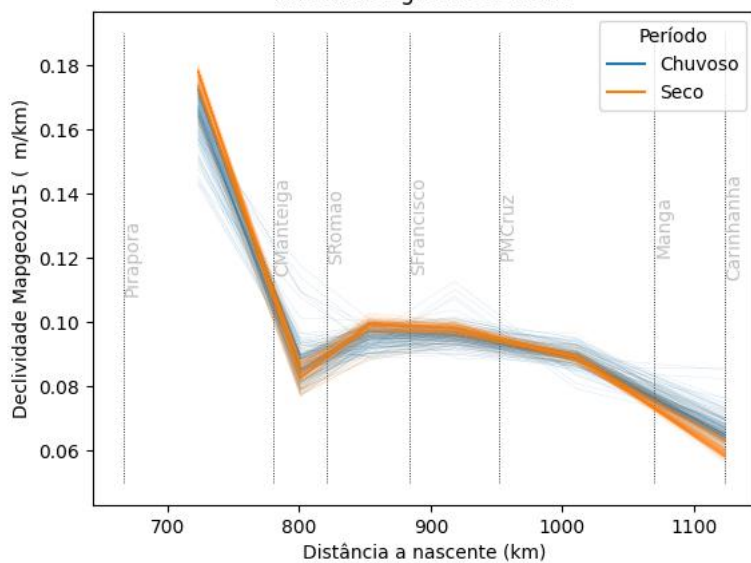
Ano hidrológico 2007-2008



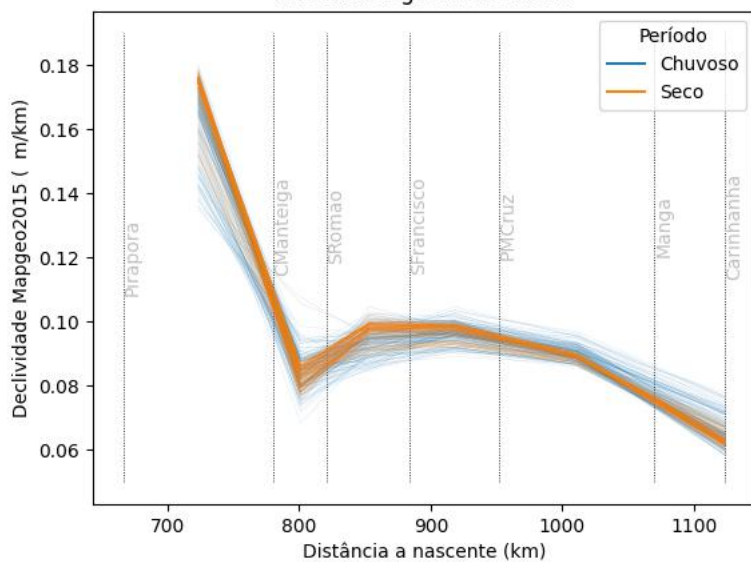
Ano hidrológico 2008-2009



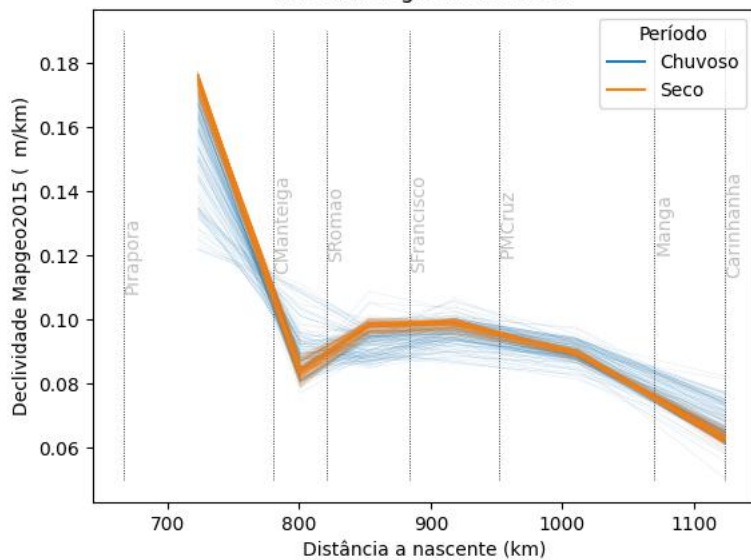
Ano hidrológico 2009-2010



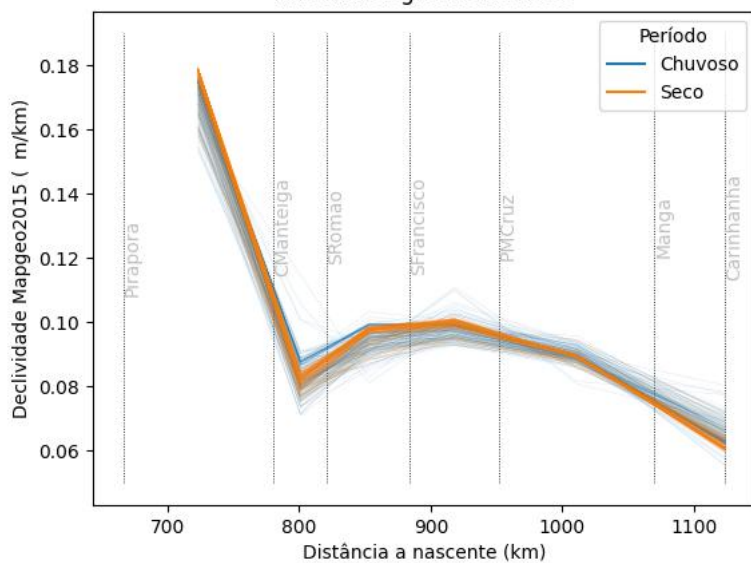
Ano hidrológico 2010-2011



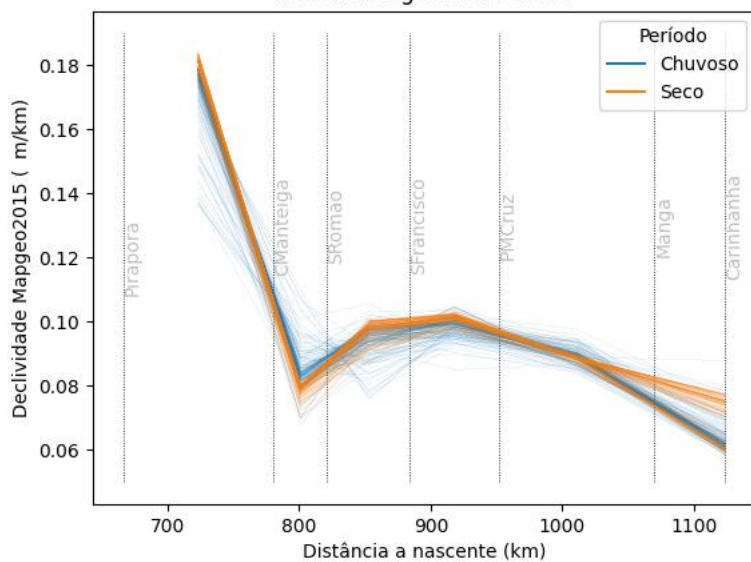
Ano hidrológico 2011-2012



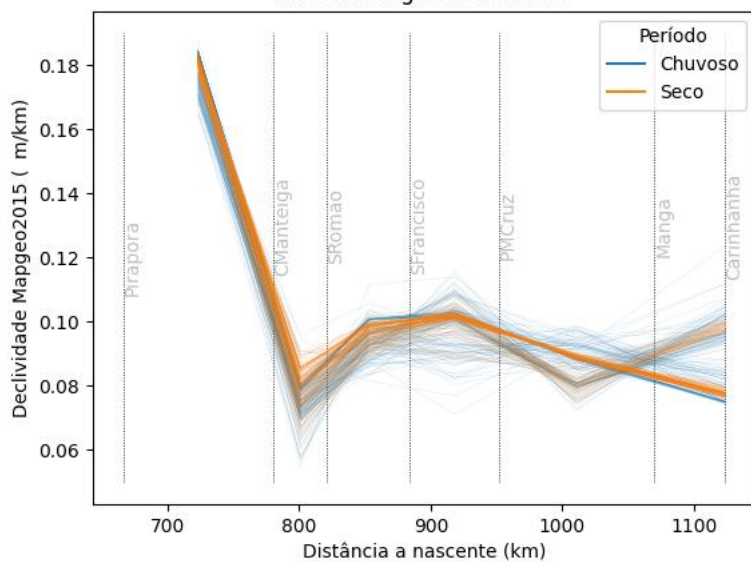
Ano hidrológico 2012-2013



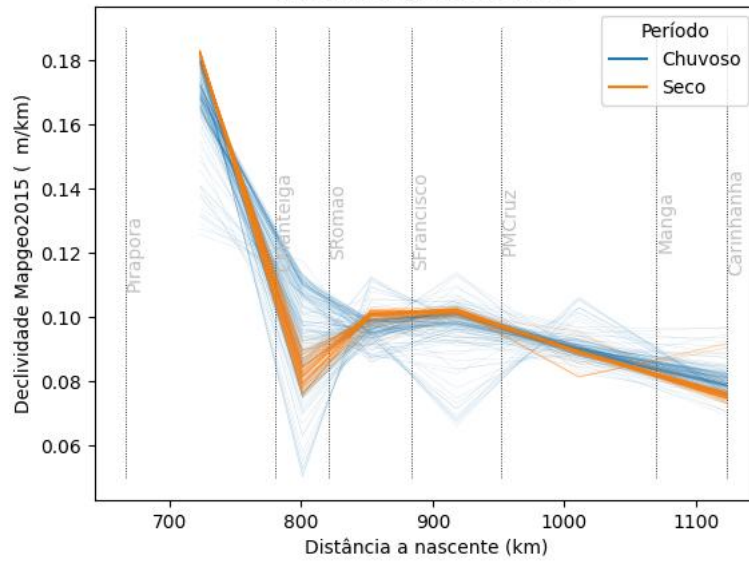
Ano hidrológico 2013-2014



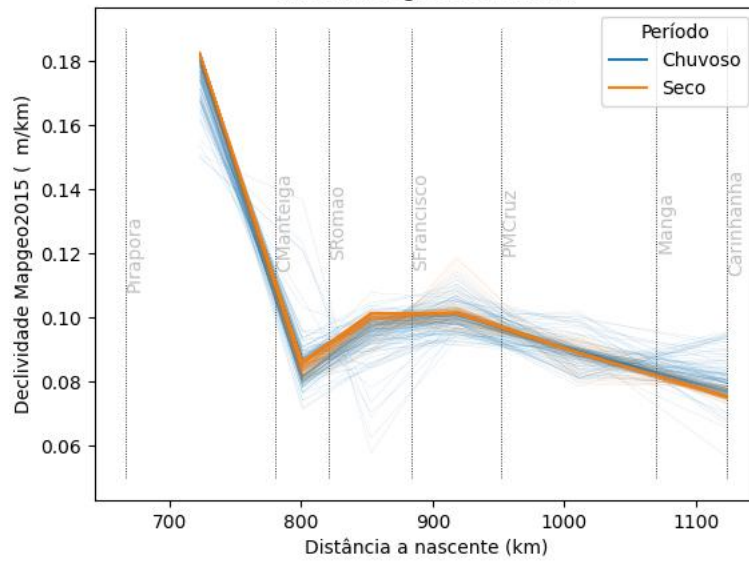
Ano hidrológico 2014-2015



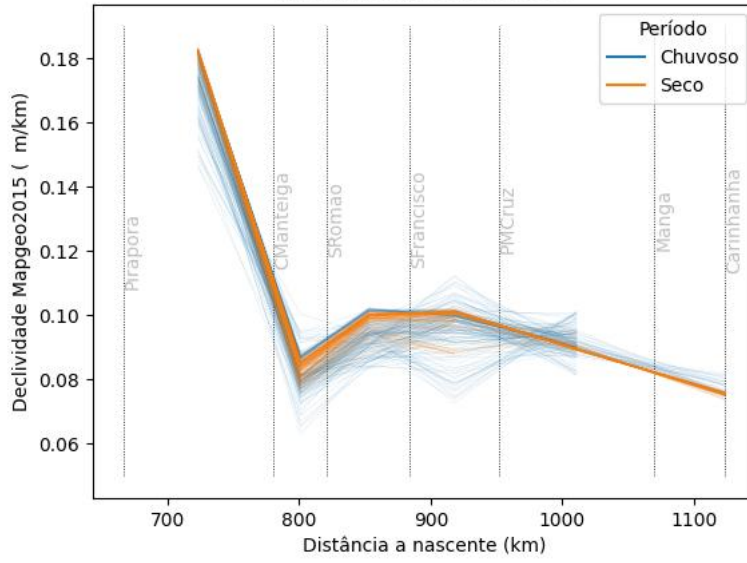
Ano hidrológico 2015-2016



Ano hidrológico 2016-2017



Ano hidrológico 2017-2018



Ano hidrológico 2018-2019

