

IV-232 – VALIDAÇÃO DOS DADOS DO SATÉLITE ALTIMÉTRICO JASON-2 NA BACIA DO RIO PURUS

Gabriele Furtado da Silva⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade do Estado do Amazonas.

Joecila Santos da Silva⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Mestre em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia pela UFAM. Doutor em Ciência pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e pela Université Toulouse 3 – Paul Sabatier. Professora da Universidade do Estado do Amazonas.

Endereço⁽¹⁾: Av. Constantino Nery, 2229 Conjunto Tocantins Bloco 17 C apto. 311- Chapada - Manaus - AM - CEP: 69050-110 - Brasil - Tel: +55 (92) 99216-3898 - e-mail: gafds.eng@uea.edu.br

RESUMO

As informações hidrológicas do rio Purus, um dos principais tributários do rio Solimões, são de difícil obtenção devido à inacessibilidade da região, à sua dimensão semi-continental, à imensa diversidade natural, cultural e fronteiriça, e à distribuição escassa das estações fluviométricas. Tais fatores, somados à difusão lenta de dados, fazem com que os satélites altimétricos, com cobertura global, tornem-se uma alternativa complementar para o monitoramento das variações de altura da lâmina de água em hidrossistemas amazônicos. Neste contexto, o presente trabalho faz uma avaliação da qualidade desses dados, a partir da validação interna (comparação entre as medidas altimétricas de níveis de água nos pontos de cruzamento de dois traços do satélite) e da validação externa (comparação entre as medidas altimétricas de níveis de água do satélite Jason-2 com dados obtidos em estações limimétricas no rio Purus). O resultado da validação por meio do cálculo do erro quadrático médio entre os dados do satélite Jason-2 e dados *in situ* na estação de Beruri foi de 0,61m e para a estação de Paricatuba, 0,48m. O valor do RMS entre os traços em cruzamento foi de 0,75m.

PALAVRAS-CHAVE: Rio Purus, Dados Altimétricos, Satélite Altimétrico, Validação de Dados.

INTRODUÇÃO

A Amazônia possui uma enorme disponibilidade de recursos hídricos, que supera em muito a demanda regional. Sua bacia hidrográfica ocupa mais de um terço da superfície Sul-Americana, comportando rios que atravessam fronteiras (GONZALEZ *et al.*, 2006). Características resultantes dessa dimensão semi-continental e transfronteiriça, tais como a diversidade natural e cultural, tornam a região da bacia, complexa, bem como a caracterização dos hidrossistemas da mesma (NOVO *et al.*, 1998).

O estabelecimento de redes de monitoramento é uma das práticas adotadas para aquisição de dados hidrológicos. Para isso as estações fluviométricas devem ser colocadas em locais estratégicos, requerendo uma série de observações *in situ* por um período muito longo, demandando custos altíssimos, uma vez que sua operação é algo que exige grande aporte de recursos humanos e financeiros, além de uma importante capacidade de planejamento (ALSDORF *et al.*, 2007). Em função disso a Bacia Amazônia sofre de uma escassez de informações hidrológicas tornando delicado qualquer estudo efetuado em escala regional ou global (SILVA *et al.*, 2010; SEYLER *et al.*, 2013). Além disso, quando existem, as medidas hidrométricas tradicionais se apresentam heterogêneas tanto no espaço como no tempo (SILVA, 2010). Pois, embora esses dados forneçam uma definição temporal densa, existem restrições na resolução espacial, uma vez que existe apenas uma estação fluviométrica a cada 14.150 km² em média e a atualização desse sistema é lenta, variando entre 6 a 12 meses (ANA, 2016).

A aplicação dos dados provenientes dos satélites altimétricos pode complementar a essas medidas, visto que fornecem estimativas com aceitável resolução espacial e temporal, o que proporciona visão sinótica (de conjunto) e multitemporal (de dinâmica) de extensas áreas (FLORENZANO, 2002), sobretudo na bacia Amazônica, formada por vários países da América do Sul, o que dificulta a obtenção dos dados além da

fronteira brasileira. O monitoramento altimétrico não substitui o monitoramento convencional, contudo permite o avanço dos estudos em áreas remotas, podendo, desta maneira, serem monitoradas de forma virtual.

A altimetria espacial é uma técnica de sensoriamento remoto que permite a aquisição de informações sobre o nível de um plano de água através de sensores altimétricos (FU e CAZENAVE, 2001). Nos últimos dezoito anos, vários grupos científicos no mundo passaram a utilizar a altimetria espacial, também, para medir os níveis das águas continentais (mares interiores, rios, lagos, planícies de inundação e reservatórios). Estas novas aplicações permitem construir longas séries temporais de níveis de água (SILVA *et al.*, 2010).

Diante de tal alternativa, realizaram-se validações detalhadas de dados do satélite altimétrico Jason-2 executando comparações com dados de estações linimétricas da rede hidrológica nacional, distribuídas ao longo da bacia do Rio Purus.

OBJETIVOS

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar a validação dos dados do satélite altimétrico Jason-2 na bacia do rio Purus. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: i) Elaborar estações virtuais com dados do satélite altimétrico Jason-2 para construção de séries temporais; ii) Validar as medidas dos níveis de água fornecidas pelo satélite altimétrico Jason-2, comparando com medidas *in situ*; iii) Validar as medidas dos níveis de água fornecidas pelo satélite altimétrico Jason-2, comparando os valores nos pontos de cruzamento das órbitas do satélite.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Purus está localizada na porção Ocidental da Amazônia brasileira compreendendo uma área de aproximadamente 63.000 km², distribuída entre os Estados do Amazonas (73%) e Acre (21%) e, nos países vizinhos, Peru e Bolívia (6%). Apresenta como tributário principal o rio transfronteiriço Purus, o qual apresenta sua nascente localizada nas colinas do Arco Fitzcarrald, situado na floresta baixa Peruana nos estados de Ucayali e Madre de Dios. O curso desse rio no Brasil é de aproximadamente 3.700 km de extensão, partindo do Estado do Acre e adentrando no Amazonas até desaguar nas águas do Rio Solimões (SIGMA, 2006).

DADOS IN SITU

Foram utilizadas as medidas de nível de água das seções de réguas linimétricas retiradas da Rede Hidrometeorológica Nacional, da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no site Hidroweb. O período das medições foi compreendido entre julho de 2008 a julho de 2016, período de disponibilidade de dados altimétricos do satélite Jason-2.

DADOS ALTIMÉTRICOS

Para este estudo foram utilizados dados altimétricos da missão Jason-2, processados com o algoritmo de tratamento de Forma de Onda (FO) *Ice-1*. Os dados altimétricos utilizados neste estudo fazem parte da Rede de Monitoramento Altimétrico do Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHSA) disponíveis na base de dados Hydroweb, da plataforma THEIA-CNES (<http://hydroweb.theia-land.fr/?lang=en&>).

MÉTODOS

ELABORAÇÃO DE ESTAÇÕES VIRTUAIS

Uma estação virtual (EV) consiste na interseção de um traço altimétrico com o plano de água (CALMANT e SEYLER, 2006), sendo possível obter uma série temporal da altura do plano de água (SILVA, 2010). Foi utilizada a metodologia para criação das estações virtuais pela seleção dos dados correspondentes ao cruzamento do plano de água, adaptadas às variações no tempo e no

espaço, através do programa *Multimission Altimetry Processing Software* (MAPS, 2018), juntamente como o mosaico de imagens do programa *Google Earth*, em segundo plano, permitindo uma seleção tridimensional dos dados em um espaço superfície profundidade, descrita em Silva *et al.* (2010).

Adicionalmente, as alturas elipsoidais de nível de água das séries temporais foram convertidas em alturas geoidais, utilizando-se o modelo de ondulação geoidal EGM2008, desenvolvido por Pavlis *et al.* (2012).

VALIDAÇÃO EXTERNA DOS DADOS ALTIMÉTRICOS A PARTIR DE ESTAÇÕES *IN SITU*

Para a validação dos dados altimétricos é necessária a existência de estação linimétrica próximo a órbita de passagem do satélite. A localização da estação linimétrica não precisa, no entanto, estar rigorosamente logo abaixo do traço, porém, deve estar inclusa dentro da faixa imageada do radar altimétrico a uma distância máxima de 50 km, considerando que nenhuma mudança hidrológica significativa seja evidenciada entre o traço do satélite e a posição da estação linimétrica, conforme Silva (2010). A qualidade das séries temporais altimétricas de nível de água foi avaliada computando-se a raiz do erro quadrático médio ou valor eficaz (RMS), definido pela equação (1):

$$RMS = \sqrt{[(\sum_{i=1}^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2) / N]} \quad \text{equação (1)}$$

Onde $H_{1,i}$ é as estimativas de nível do rio pelos dados altimétricos, $H_{2,i}$ é as leituras do nível do rio nas estações fluviométricas e N é o número de medições acatadas.

VALIDAÇÃO INTERNA DOS DADOS ALTIMÉTRICOS A PARTIR DE COMPARAÇÃO NOS PONTOS DE CRUZAMENTOS DOS TRAÇOS DOS SATÉLITES

Sobre os corpos hídricos da bacia do rio Purus existem pontos de cruzamento dos traços das órbitas dos satélites. Essas passagens no ponto de cruzamento, no entanto, não ocorrem simultaneamente, isto é, na mesma data. Para realização dessa etapa de validação, ocorreu a análise de cruzamento restritos, cuja defasagem máxima não ultrapassou dois dias, bem como a distância entre as estações não ultrapassou 50 km, considerando-se que durante esse intervalo e essa distância, entre as passagens de um traço e outro, o nível do rio não varie substancialmente, seguindo a metodologia descrita em Silva *et al.* (2010).

Inicialmente, calculou-se o intervalo de tempo que o satélite leva para passar outra vez em determinado local, ou seja, o tempo de revisita entre um traço e outro. Para isso foram utilizadas as seguintes equações:

$$\Delta t_m = \{ \text{MIN}[(N1-N2), (NT-(N1-N2))] / Nt \} * R_s \quad \text{equação (2)}$$

$$\Delta t_M = \{ \text{MAX}[(N1-N2), (NT-(N1-N2))] / Nt \} * R_s \quad \text{equação (3)}$$

Onde Δt_m é o tempo de revisita com menor intervalo de tempo, Δt_M é o tempo de revisita com maior intervalo de tempo, $N1$ e $N2$ são os números dos traços dos satélites, NT é igual ao total de traços do satélite, para o Jason-2 é 254 e R_s é o tempo de revisita total do satélite, que depende de parâmetros orbitais, sendo de 10 dias para o satélite Jason-2.

Finalizando com o cálculo do RMS na equação 1, entre as medidas altimétricas, das séries temporais, das duas passagens do satélite.

RESULTADOS

ESTAÇÕES VIRTUAIS

Os dados altimétricos provenientes do satélite Jason-2 são resultados do conjunto de 13 estações virtuais elaboradas na bacia do rio Purus. Os dados foram analisados, separadamente, para a geração das séries temporais altimétricas. As localizações das estações virtuais ao longo da bacia são listadas na tabela 1, juntamente com a cota média.

Tabela 1: Discriminação das estações virtuais, com informações de longitude, latitude e a cota média.

Nome da estação virtual	Longitude (°)	Latitude (°)	Cota média (m)
ACRE_J2_ICE1_102_01	-67,86	-10,28	143,58
ACRE_J2_ICE1_165_01	-68,33	-10,61	201,34
ITUXI_J2_ICE1_178_01	-65,73	-8,36	63,62
MUCUIM_J2_ICE_241_01	-64,34	-7,48	73,86
PAUINI_J2_ICE1_165_01	-67,25	-7,67	84,70
PURUS_J2_ICE1_026_01	-70,86	-9,84	225,19
PURUS_J2_ICE1_076_01	-61,59	-4,14	22,47
PURUS_J2_ICE1_089_02	-70,94	-10,00	235,56
PURUS_J2_ICE1_089_06	-71,03	-10,26	251,24
PURUS_J2_ICE1_102_01	-68,31	-9,07	115,22
PURUS_J2_ICE1_165_01	-67,67	-8,83	101,86
PURUS_J2_ICE1_178_01	-65,98	-7,68	65,57
PURUS_J2_ICE1_241_01	-63,67	-5,61	31,97
PURUS_J2_ICE1_254_01	-63,90	-5,60	33,36

VALIDAÇÃO INTERNA

Quatro pontos de cruzamento dos traços do satélite foram obtidos utilizando 13 estações virtuais provenientes do algoritmo Ice-1, para o satélite Jason-2. Os tempos de revisita do satélite, o valor do RMS e as distâncias entre os traços são listados na tabela 2.

Tabela 2: Tempos de revisita, RMS e distancias entre os pontos de cruzamentos do satélite Jason-2.

Ponto de cruzamento	Tempo de revisita (dias)	RMS (m)	Distância entre traços (km)
Purus 089 x 026	2,48	-	8,79
Purus 165 x 102	2,48	-	152
Purus 254 x 178	2,99	-	-
Purus 254 x 241	0,51	0,75	48,40

Os dados indicam tempo de revisita de somente 0,51 dia entre os traços 241 e 254. Para os demais casos, o tempo de revisita é superior a 2 dias, sendo utilizado para o cálculo do RMS. Tal escolha deve-se a consideração de que entre o intervalo de 1,5 dias, o rio não sofre mudanças significativas no nível de água entre as passagens dos mesmos ciclos. Destaca-se que não foi computada a diferença de declividade entre os dois traços, uma vez que há restrições de informações hidrológicas do rio em estudo.

Na figura 1 são indicadas as estações virtuais no rio Purus correspondentes aos traços 254 e 24, com mosaico de imagens Google Earth em segundo plano.



Figura 1: Estações virtuais sobre os traços 254 e 241 no rio Purus. Mosaico de imagens Google *Earth* em segundo plano.

Na Figura 2 é apresentada a série temporal altimétrica dos traços 254 e 241, onde os círculos em verde correspondem ao traço 254 e os círculos em preto correspondem, ao traço 241, ambos compreendidos entre o período de julho de 2008 e julho de 2016. O RMS entre as medidas altimétricas das séries temporais dos traços 254 e 241 foi de 0,75 m e a distância entre eles é 48,4 km.

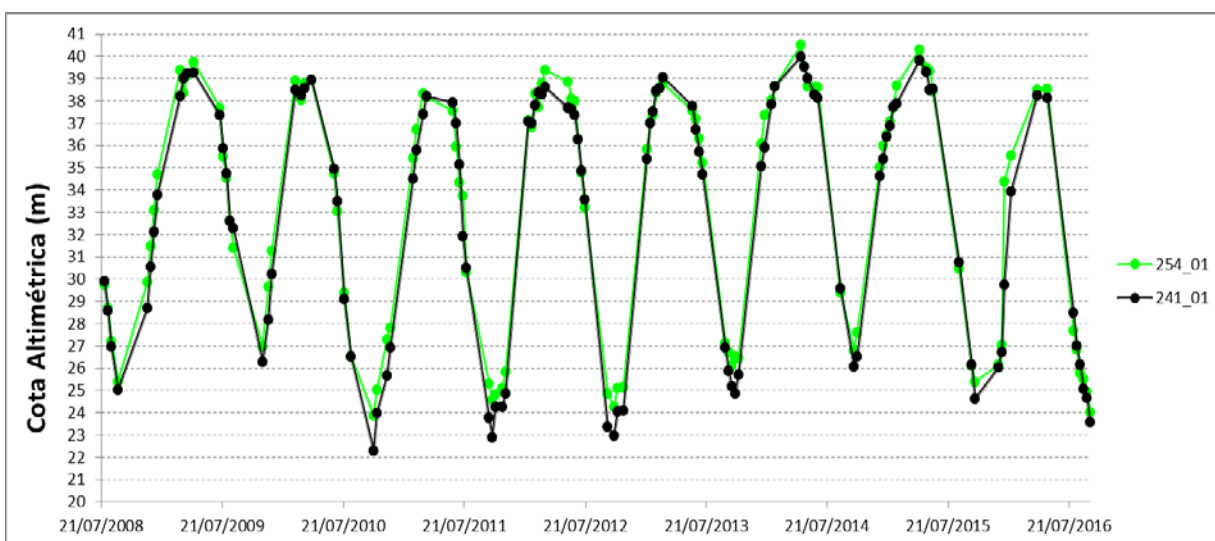


Figura 2: Série temporal altimétrica para o cruzamento dos traços 254 e 241 do satélite Jason-2, no rio Purus, pontos em verde e pontos em preto correspondem aos traços 254 e 241, respectivamente, entre o período de 2008 e 2016.

VALIDAÇÃO EXTERNA

O estudo de validação externa das séries temporais altimétricas de nível de água através da comparação com estações limimétricas foi executado em dois locais. O primeiro foi conduzido utilizando a estação de Beruri, situada à jusante da EV e o segundo, a estação Paricatuba, à montante da EV, ambas localizadas no rio Purus.

As medidas de nível de água da régua Beruri foram niveladas de acordo com o valor de 5,64m, fornecido por Moreira *et al.* (2016) e na estação de Paricatuba efetuou-se uma regressão linear entre os dois pares de dados para obtenção do zero da régua. Na figura 3 consta a localização da estação virtual do traço 076 entre duas régua limimétricas.

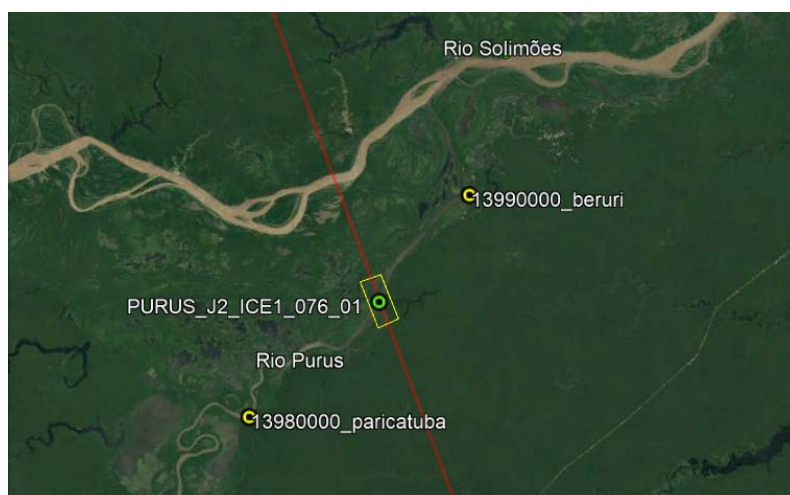


Figura 3: Localização das réguas instalada em Beruri e em Paricatuba no rio Purus, e o traço 076 do satélite altimétrico Jason-2 em vermelho.

Foi computado o RMS entre as medidas do satélite Jason-2 e as medidas das réguas linimétricas. Os resultados dos RMS estão listados na Tabela 3, juntamente com a localização da EV e das réguas assim como as distâncias e posições entre a EV e as estações *in situ*.

Tabela 2: Discriminação das estações fluviométricas

Estação virtual	Latitude (°)	Longitude (°)	Régua	Latitude (°)	Longitude (°)	Distância (km)	Posição	RMS (m)
PURUS 076	-4,14	-61,59	Beruri (13990000)	-3,40	-61,37	37,81	Jusante	0,61
PURUS 076	-4,14	-61,59	Paricatuba (13980000)	-4,41	-61,90	54,2	Montante	0,48

O menor valor de RMS encontrado foi de 0,61 m, resultado da comparação entre os dados de nível de água do traço 076 e a estação fluviométrica Beruri. Valor de RMS de 0,48m foi encontrado entre o traço 076 e estação Paricatuba.

Na Figura 4 são apresentadas as séries temporais da régua em Beruri e da estação altimétrica do traço 076 do satélite Jason-2, resultado de 282 ciclos aproveitáveis durante o período de julho de 2008 a julho de 2016, onde os pontos em azul representam a série temporal do traço 076, e os pontos em preto representam os dados fornecidos pela régua.

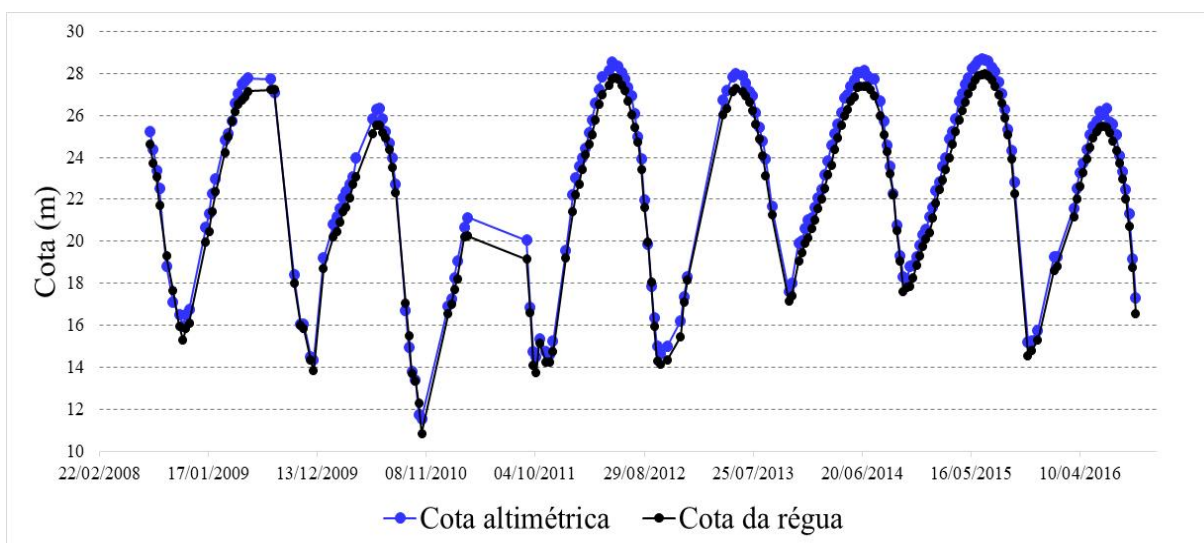


Figura 4: Séries temporais da régua da estação de Beruri e da estação altimétrica do traço 076 do satélite JASON-2, no rio Purus. Pontos em azul e pontos em preto correspondem aos dados de estação virtual e estação *in situ*, respectivamente, entre o período de 2008 e 2016.

Como pode ser observado, entre o período de 2009, 2010 e 2011, as séries temporais obtidas através dos dados de satélite não coincidem com os valores observados pela régua, embora o regime hídrico seja similar. Esse fato decorre, possivelmente, do desnivelamento da régua linimétrica. Dessa forma, os pares de dados correspondentes desse período foram excluídos do cálculo do RMS, sendo utilizado somente 204 ciclos, resultando em um valor de 0,61m.

Para a régua de Paricatuba e o traço 076, o valor de RMS encontrado foi de 0,48m, inferior ao valor encontrado da régua de Beruri com o mesmo traço. O número de ciclos aproveitáveis foi de 224 e a distância da régua a montante do traço foi de 54,2 km. O valor do zero da régua encontrado através da regressão linear entre os dois pares de dados foi de 6,81m.

Na Figura 5, observa-se as séries temporais da régua em Paricatuba e da estação altimétrica do traço 076 do satélite Jason-2, durante o período de 2008 a 2016, onde os pontilhados em azul representam a série temporal do traço 076, os pontilhados em preto representam os dados observados na régua.

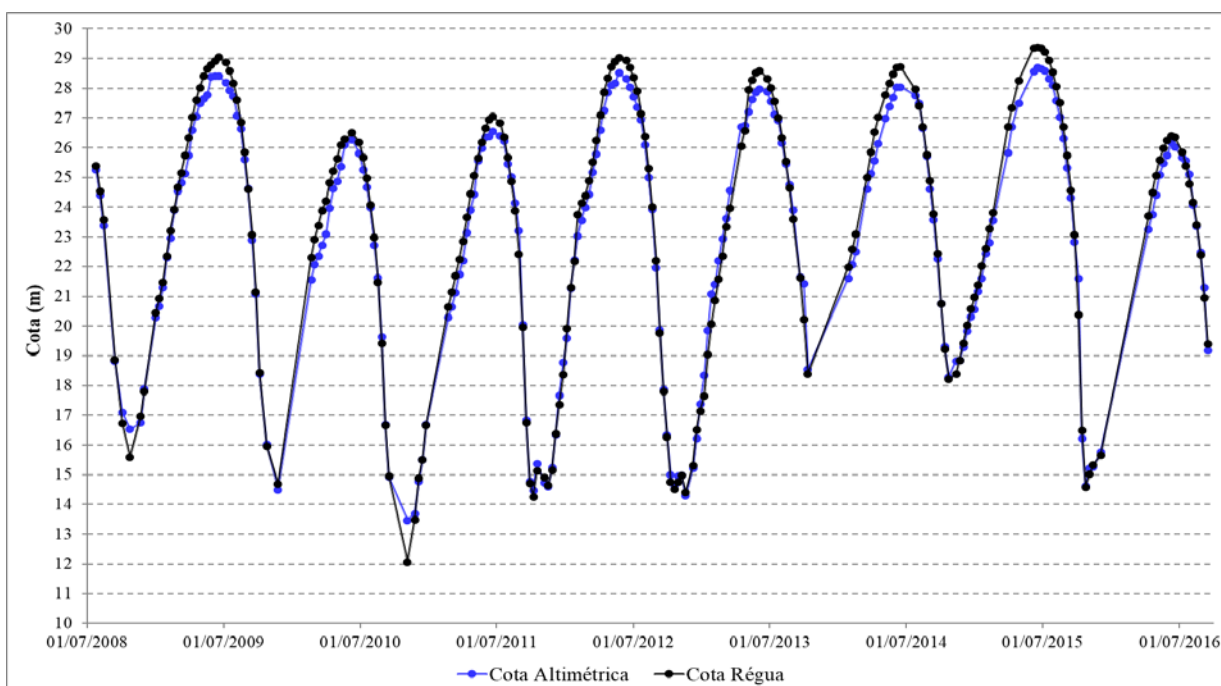


Figura 5: Séries temporais da régua instalada em Paricatuba e da estação altimétrica do traço 076, entre o período de 2008 e 2016 para o satélite Jason-2. Os pontos em azul representam o traço 076, os pontos em preto representam os dados observados na régua.

Ao longo da sub-bacia do rio Purus foram encontradas outras oito estações linimétricas com dados atualizados, no entanto, as distâncias entre elas e as estações virtuais ultrapassavam 60 quilômetros, havendo, portanto, mudanças hidrológicas entre ambas o que impossibilita o estudo de validação.

CONCLUSÕES

A realização do presente trabalho teve por objetivo a validação dos dados altimétricos através de estudo das estimativas dos erros das medidas dos níveis de água do rio Purus com a finalidade de avaliar a qualidade dos dados medidos pelo satélite altimétrico Jason-2.

Para realizar a validação foram usados dois critérios distintos: 1) A validação interna, com comparações dos cruzamentos dos traços do satélite, e 2) a validação externa, com comparações de dados altimétricos com os dados *in situ*, adotando-se a metodologia utilizada por Silva *et al.* (2010) para as missões ERS-2 e ENVISAT.

No trabalho de validação interna, verificou-se comportamento hídrico similar entre os traços comparados, com valor do RMS de 0,75 m entre as séries temporais dos traços 254 e 241. Esse valor foi resultante da distância de 48,4 km entre esses traços com trechos muitos meandrados e cuja declividade não foi deduzida neste estudo.

Os estudos de validação externa, a partir de comparações de dados altimétricos com dados de régua, foi mais trabalhoso. Tal episódio se dá devido à falta de estações linimétricas próximas a pontos interseção entre traços do satélite com corpos d'água. Dessa forma, foram realizados apenas dois estudos em toda a bacia, com erros que variaram de 0,48 m a 0,61m entre a estação altimétrica e as régua Paricatuba e Beruri, destacando-se que as declividades também não foram deduzidas.

Portanto, a validação do satélite Jason-2 para o rio Purus apresenta bons resultados e oferece a possibilidade de observação desse rio como parte de um sistema de monitoramento integrado com os dados *in situ*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANA. Agência Nacional de Águas. Rede Hidrometeorológica da Amazônia. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/RHAmazonica.pdf>>. Acesso: 30 out. 2018.
2. ALSDORF, D. E.; RODRIGUEZ, E.; LETTENMAIER, D. P. *Measuring surface water from space. Reviews of Geophysics*, v.45, n. 2, 2007.
3. CALMANT, S.; SEYLER, F. *Continental surface water from satellite altimetry. Comptes Rendus Geosciences*, v.338, n. 14-15, p. 1113-1122, 2006.
4. FLORENZANO, T.G. *Imagens de Satélite para Estudos Ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
5. FU, L. L.; CAZENAVE, A. *Satellite altimetry and earth sciences. Vol. International Geophysical Series 69*, 2011.
6. GONZALEZ, J. C.; CORDOBA, E. A.; AVELLANEDA, M. N. et al. *Ecosistemas acuáticos de la Amazonia Colombiana: Avances y perspectivas. Revista Colombia Amazonica*, p. 1-18, 2006.
7. NOVO, E. M. L. M.. *Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2010.
8. MAPS. Multimission Altimetry Processing Software. Disponível em: <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/land_surfaces/softwares/maps/maps>. Acesso em: 15 set. 2018.
9. MOREIRA, D. M. Geodésia aplicada ao monitoramento hidrológico da bacia Amazônica. Rio de Janeiro. 2016. Tese de Doutorado. UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2016.
10. PAVLIS, N. K. et al. *The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of geophysical research: solid earth*, v.117, n. B4, 2012.
11. SEYLER, F. et al. *From TOPEX/Poseidon to Jason-2/OSTM in the Amazon basin. Advances in Space Research*, v.51, n. 8, p. 1542-1550, 2013.
12. SIGMA. Bacia do Rio Purus. 2006. Disponível em: <<http://sigma.cptec.inpe.br/purus/purus.html>>. Acesso em: 15 abr. 2018.
13. SILVA, J. S. *Altimetria Espacial Aplicada aos Estudos de Processos Hídricos em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica*. Rio de Janeiro, 2010. Tese de Doutorado. UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2010.
14. SILVA J. S.; CALMANT S.; SEYLER F. *Satellite Altimetry for Hydrology – A review*. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2013. Anais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.
15. SILVA, J. S. et al. *Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. Remote sensing of environment*, v.114, n. 10, p. 2160-2181, 2010.