

Avaliação preliminar comparativa de níveis de água medidos em estações fluviométricas virtuais e convencionais: estudo de caso no rio Madeira

RESUMO

A altimetria espacial é uma técnica que viabiliza a obtenção de medidas de nível de oceanos, rios, lagos e reservatórios. Atualmente, medidas altimétricas de níveis de águas continentais têm sido aplicadas em nivelamento de estações fluviométricas, estimativa de variações espaciais, temporais e de armazenamento de água em rios e zonas de inundação. Assim, objetivou-se avaliar comparativamente os níveis de água de estações virtuais e convencionais no rio Madeira. Foram selecionadas três pares de estações contendo uma real e uma virtual cada, em um período comum de dados, com medidas altimétricas provenientes do portal HIDROSAT (satélite JASON 2) e dados das estações fluviométricas do HIDROWEB(ANA). Verificou-se a relação estatística entre as estações por meio dos coeficientes de correlação de Pearson(R) e coeficiente de Determinação(R^2) e utilizou-se de análises gráficas para verificar a correspondência do comportamento hidrológico ao longo do tempo. Os resultados mostraram que os dados adquiridos pelo satélite retrataram, de forma efetiva, o regime de variação de níveis das estações *in situ* analisadas, além deterem apresentado forte correlação, reforçando a possibilidade de sua utilização como base complementar ao sistema de monitoramento convencional. Ademais, ficou evidente a necessidade de padronização do sistema de referência altimétrico para as estações convencionais.

PALAVRAS-CHAVE: Radares altimétricos. Rio Madeira. Altimetria por Satélite.

Jaqueline de Paula Ananias da Costa

jaqueline.de.paula@engenharia.ufjf.br
<https://orcid.org/0000-0003-0555-0733>
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

Celso Bandeira de Melo Ribeiro

celso.bandeira@ufjf.edu.br
<https://orcid.org/0000-0001-7017-4653>
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

Jussara dos Santos Ferreira

jussara.santos@engenharia.ufjf.br
<https://orcid.org/0000-0001-6310-3187>
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

Alessandro Salles Carvalho

alessandro.carvalho@ufjf.edu.br
<https://orcid.org/0000-0001-7428-0912>
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

Maria Helena Rodrigues Gomes

mariahelena.gomes@ufjf.edu.br
<https://orcid.org/0000-0001-6695-2918>
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil.

INTRODUÇÃO

A adequada gestão dos recursos hídricos depende substancialmente do conhecimento acerca do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas (FIOREZE et al., 2008). Para que esse conhecimento seja efetivo, é essencial que haja o monitoramento da qualidade e quantidade (vazão) dos cursos hídricos de modo a assegurar a multiplicidade dos usos antrópicos ou ecológicos (GONTIJO, 2007).

Segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos - PNRH (BRASIL, 2006), o monitoramento hidrológico vem sendo realizado no Brasil há mais de cem anos e, atualmente, o país dispõe de uma rede hidrometeorológica com aproximadamente 11.000 estações hidrométricas, administradas por órgãos federais, setoriais, estaduais e particulares, dentre as quais 4.641 representam a rede básica nacional em operação, de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (CPRM, 2020). Por meio dessas estações é possível mensurar o volume de chuvas, a evaporação da água, o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos e a qualidade das águas em estações pluviométricas, evaporimétricas, fluviométricas, sedimentométricas e de qualidade da água. Os dados coletados, além de contribuir para a gestão de recursos hídricos, constituem uma ferramenta importante para sociedade, setores econômicos, irrigação e indústria, por exemplo (ANA, 2022).

Apesar do elevado número de estações de monitoramento registrado no território brasileiro, a distribuição se dá de forma desigual, com sua grande maioria ainda concentrada nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país (GONTIJO, 2007) e, ainda existem registros de regiões onde os dados hidrológicos básicos são insuficientes, inexistentes ou com poucos anos de dados (DIAS, 2014). Questões relacionadas a alto custo de instalação e operação, ocorrência de eventos climáticos extremos, depredação, e dificuldades de implantação em localidades distantes, são alguns dos fatores que têm levado à diminuição do número de estações de monitoramento *in situ* tanto no Brasil como no mundo (HARVEY & GRABS, 2003; CALMANT et al., 2006). Tal conjuntura evidencia a necessidade da criação de um sistema que minimize os problemas enfrentados no monitoramento convencional dos recursos hídricos (PEREIRA et al., 2016).

Uma alternativa que vem sendo aprimorada ao longo dos anos é o uso da Hidrologia espacial (técnica de obtenção de dados hidrológicos a partir de sensores satélites) (PEREIRA et al., 2016). Ao invés de estações hidrometeorológicas físicas, são criadas estações virtuais a partir de dados coletados por equipamentos embarcados em satélites, que permitem, entre outros, estimar parâmetros de qualidade de água por meio das relações entre variáveis limnológicas e refletância em uma ou mais bandas espectrais (SANTOS; PEREIRA, 2020).

Pesquisas recentes têm ressaltado: detecção de sólidos totais, turbidez (MELO et al., 2020), sólidos em suspensão, transparência da água por meio do sensoriamento remoto. Destaca-se, ainda, a determinação da concentração de clorofila a em mananciais de abastecimento público (SERBETO et al., 2021) e reservatórios (SANTOS et al., 2021), o que reflete também a aplicabilidade no monitoramento de ambientes aquáticos. Schwatke et al. (2015) criaram uma série temporal de dados para lagos e rios na América com o uso combinado das missões altimétricas ENVISAT, ERS-2, Jason-1 e 2, TOPEX/Poseidon e SARAL. Os resultados trouxeram erros médios quadráticos entre 4-36 centímetros para lagos, e, para rios

os erros ficaram entre 8-114 centímetros, quando comparados às estações convencionais. A altimetria espacial é uma tecnologia que produz dados de níveis do oceano, gelo, rios, lagos, planícies de inundação e reservatórios com uma grande precisão, cerca de alguns centímetros (PEREIRA et al, 2016, SILVA, 2010).

Nos últimos dez anos vários grupos científicos e instituições passaram a utilizar essa técnica para medir e ou a disponibilizar ferramentas e meios para aquisição de séries de dados altimétricos, com aplicabilidade em diferentes estudos hidrológicos como a modelagem, estudos de vazão, planícies de inundação, e variação do nível de água. Entre eles destaca-se o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), o Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH), o Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), a Agência Espacial Européia (ESA), o Centre National d'Études Spatiales (CNES) a National Aeronautics and Space Administration (NASA), o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) (SILVA, 2019; SILVA, 2010).

Assim, a utilização de dados de satélite de observação da Terra, principalmente de altimetria espacial traz alternativas de complementação ao monitoramento existente, de forma homogênea, contínua e frequente, sobretudo em regiões de difícil acesso, com detalhamento espacial e temporal que as redes superficiais de observação não permitem (SILVA, 2010). Contribuindo, assim para a ampliação do monitoramento hidrológico nas mais diversas regiões.

Com isso posto, o objetivo do trabalho foi avaliar comparativamente os níveis de água de estações virtuais e convencionais no rio Madeira.

MÉTODO

A metodologia aplicada neste estudo teve como referência a base de dados disponibilizada pela ANA e pelo projeto de cooperação técnica Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias (Quantidade e Qualidade) (MEG-HIBAM), desenvolvido em 2009 pela ANA e o *Institut de Recherche pour Le Développement* (IRD).

Os dados referentes à altura de nível de água oriundos de estações convencionais, constituem-se em cotas médias diárias disponibilizados pela ANA no portal HIDROWEB (ANA, 2020a). Com relação aos dados de altura de nível de água ou dados altimétricos proveniente de estações virtuais, os mesmos constituem-se em altitudes ortométricas, onde a estimativa dos níveis é dada pelo cálculo da média e da mediana do conjunto de valores medidos pelo altímetro nas áreas imageadas (COSTI et al., 2012).

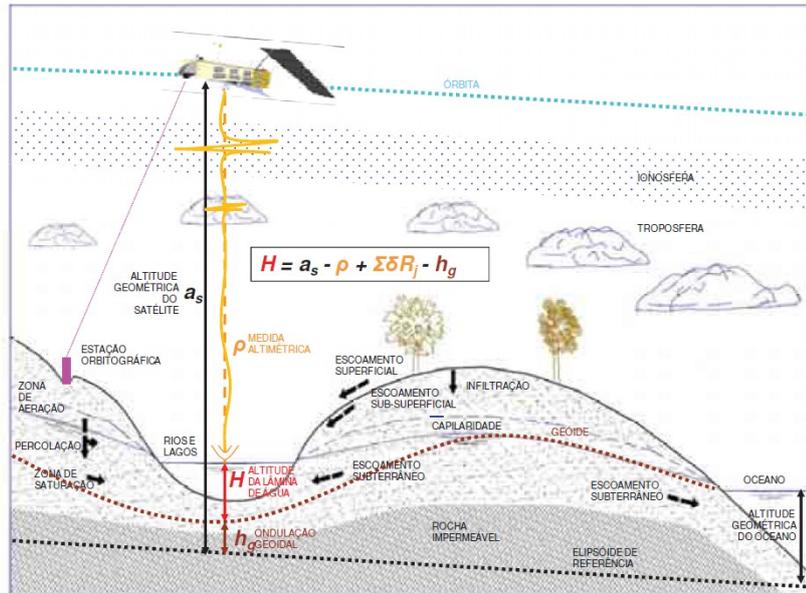
Os níveis dos planos de água H deduzidos das medidas altimétricas em domínio continental, também conhecidos como altitude ortométrica são determinados de acordo com a Figura 1 e a Equação 1, segundo Silva (2010).

$$H = a_s - \rho + \sum \delta R_j - h_g, \quad (1)$$

em que:

- a_s = diferença entre a altitude geométrica do satélite a_s em relação a um elipsóide de referência e a medida altimétrica (ρ),
- δR_j = correções instrumentais, ambientais e geofísicas,
- h_g = ondulação geoidal.

Figura 1 – Princípio da medida altimétrica em hidrossistemas continentais



Fonte: Silva (2010).

Nesse contexto, busca-se avaliar comparativamente os dados de níveis de água medidos em estações virtuais e convencionais ao longo do rio Madeira. O trabalho foi executado utilizando dados de altitude ortométrica obtidos por meio do satélite JASON 2 adquiridos no portal HIDROSAT (ANA, 2020b). O intervalo de tempo entre cada coleta dos dados altimétricos é dado pelo período de repetição da posição do satélite na órbita, também conhecido como período de revisita, que para o satélite JASON 2, utilizado nesse estudo é de 10 dias.

A missão altimétrica JASON 2/Ocean Surface Topography Mission (OSTM), é a terceira de uma série de satélites EUA-Europa projetadas para medir a altura da superfície do mar (NASA, 2022). Os satélites dessa série também permitem que sejam feitas observações da topografia oceânica de modo a investigar o aumento do nível do mar e a relação entre a circulação oceânica e as mudanças climáticas. O satélite JASON 2 também forneceu dados sobre as forças por trás de fenômenos climáticos de grande escala como El Niño e La Niña (NASA, 2022).

Lançado em 20 de junho de 2008, o satélite alcançou sua órbita repetitiva em 4 de julho do mesmo ano, e foi constituído para sequenciar as missões T/P e Jason-1. A carga útil do JASON 2 incluiu os seguintes componentes:

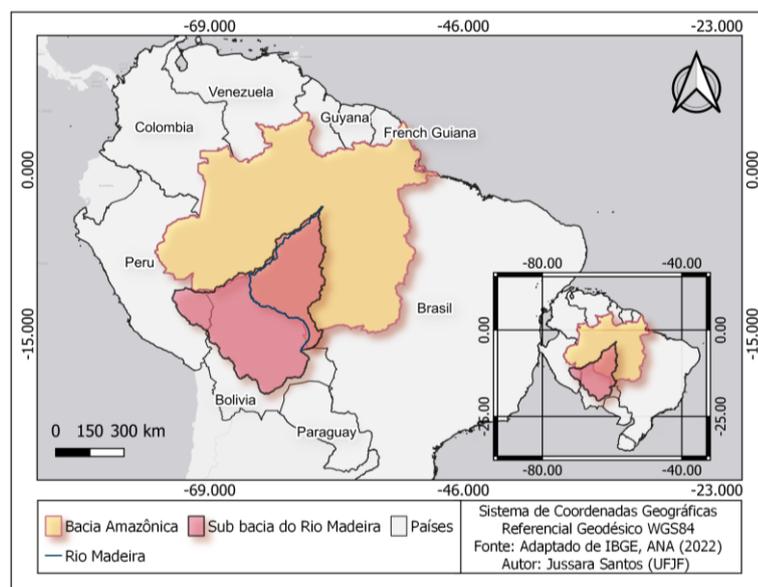
- Altimetro (Poseidon-3), fornecido pelo CNES;
- Microwave Radiometer (AMR), fornecida pela NASA - para corrigir atrasos nas estimadas do altímetro, induzidas pelo vapor de água;
- O sistema de posicionamento DORIS, fornecido pelo CNES - para determinação da precisão da órbita utilizando estações terrestres;

- A matriz refletora Laser, fornecida pela NASA - para calibrar o sistema de determinação da órbita;
- Um receptor de precisão GPS (GPSP), fornecida pela NASA - para fornecer dados de posicionamento complementares para DORIS em apoio da função POD e para aumentar e/ou melhorar os modelos de campo de gravidade;
- Detectores de radiação (Carmen-2), fornecida pelo CNES - para medir partículas de alta energia que poderia perturbar o oscilador ultra-estável na unidade de posicionamento DORIS;
- Telescópio partícula de luz (LPT) unidade de detecção, fornecida por Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) sob responsabilidade do CNES - complementando a estimativa da radiação recebida pelo instrumento DORIS (SILVA, 2019).

LOCAL DE ESTUDO

A área de estudo abrange a região da Bacia Hidrográfica do Rio Madeira, um dos mais importantes afluentes do rio Amazonas (DAMASCENO, 2017). A Bacia do rio Madeira estende-se por três países da América do Sul, Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%) apresentando uma área de drenagem de aproximadamente 1.420.000 km² (GUYOT, 1993; FILIZOLA, 2002). Segundo o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais CEMADEN (2018), o rio Madeira possui uma extensão total de aproximadamente 3317 km, com largura variando entre 440 a 9900 m e profundidade em alguns trechos ultrapassando os 13 m. Além da importância ambiental, esse rio é essencial para a economia de muitas regiões por proporcionar a pesca e permitir o transporte hidroviário (ANDRADE, 2008; CEMADEN, 2018). A Figura 2 apresenta a localização da Bacia do rio Madeira.

Figura 2 – Localização da Bacia do rio Madeira

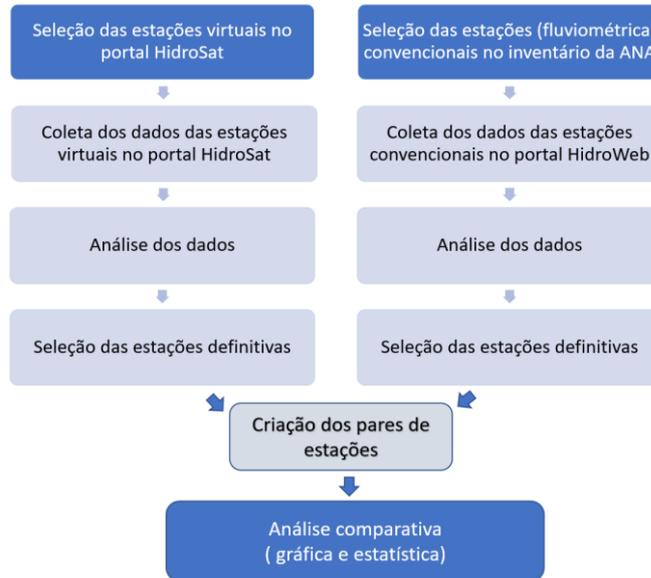


Fonte: Autoria Própria (2022).

LEVANTAMENTO DOS DADOS

A sequência de aquisição de dados utilizada para o desenvolvimento deste trabalho consiste no desenvolvimento de 10 etapas. A Figura 3 apresenta o fluxo da metodologia da aquisição dos dados.

Figura 3 – Fluxo Metodológico



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o desenvolvimento deste trabalho selecionou-se 3 estações virtuais definitivas ao longo do rio Madeira, e de posse de suas coordenadas geodésicas (latitude e longitude), foram selecionadas as estações convencionais de referência. O critério de seleção utilizado para a escolha das estações fluviométricas de monitoramento convencional foi a distância em relação às estações virtuais.

Além da distância, foi definido um período em comum entre os dados das estações fluviométricas (convencionais) e altimétricas (virtuais), para as demais etapas da metodologia. No período analisado foram considerados apenas os dados referentes aos dias da passagem do satélite, sendo assim como o período de revisita do satélite utilizado é de 10 dias, coletou-se cotas médias e altitudes ortométricas de 10 em 10 dias.

Desta forma selecionou-se estações convencionais mais próximas, localizadas a montante das estações virtuais, permitindo assim a criação de três pares de estações, onde cada par foi formado a partir de uma estação *in situ* (convencional) e uma estação virtual, de forma a possibilitar a análise e comparação entre os dados. As Tabelas 1 e 2 apresentam as características das estações virtuais e convencionais selecionadas.

Tabela 1 - Localização das estações virtuais altimétricas ao longo do rio Madeira

Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)	Satélite
1005S06518W1	Jusante Nova Mamoré Virtual JA2	-10,09494	-65,30479	Jason -2 (JA2)
0931S06518W1	Rio Madeira Jusante Abunã Virtual JA2	-9,516833	-65,30569	Jason -2 (JA2)
0534S00614W0	Jusante Manicoré Virtual JA2	-5,577992	-61,07445	Jason -2 (JA2)

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 2 - Localização das estações convencionais ao longo do rio Madeira

Código	Nome da Estação	Latitude (°)	Longitude(°)
15318000	UHE JIRAU JUSANTE RIO BENI	-10,3569444	-65,3647222
15320002	ABUNÃ	-9,70305555	-65,3647222
15700000	MANICORÉ	-5,81666666	-61,3019444

Fonte: Autoria própria (2021).

MÉTODO ESTATÍSTICO APLICADO

Para verificar a relação estatística entre os dados de nível d'água adquiridos por estações convencionais e virtuais foi aplicada a metodologia proposta por Damasceno (2017) e Moraes (2017). Logo, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (R) cujo valor absoluto varia de -1 a 1 e, quanto maior, mais forte é a correlação entre as variáveis analisadas. Dessa forma, um coeficiente de correlação R situado entre 0 e 0,3, positivo ou negativo, é considerado como fraco; 0,3 e 0,8, positivo ou negativo, considerado como moderado e acima de 0,8, tanto para valores negativos e positivos, é considerado forte (MINITAB, 2021).

O coeficiente de Determinação (R^2) permite avaliar as relações entre os dados e a qualidade de previsão, visto que explicita a dependência entre as variáveis, isto é, o quanto a variável dependente Y é explicada pela presença da variável X. O valor de R^2 varia de 0 a 1 e quanto maior o valor reporta uma melhor adequação da função para descrever o fenômeno (MORAIS, 2017).

Vale ressaltar que, consoante ao exposto por Oliveira (2018), as séries temporais reais oriundas das estações *in situ*, são provenientes de dados médios diários observados e possuem uma referência arbitrária, o que impossibilita uma comparação direta com os valores altimétricos. Por isso, depois de definidas as estações virtuais, a análise foi realizada a partir dos coeficientes sobreditos, juntamente com a verificação do comportamento dos registros hidrológicos das estações ao longo do tempo por meio dos cotogramas elaborados.

RESULTADO E DISCUSSÃO

Ao longo do rio Madeira, foram encontrados três locais que satisfizeram as condições para análise comparativa dos dados, nos quais foram formados os pares de estações conforme supracitado. A Tabela 3 apresenta informações referentes

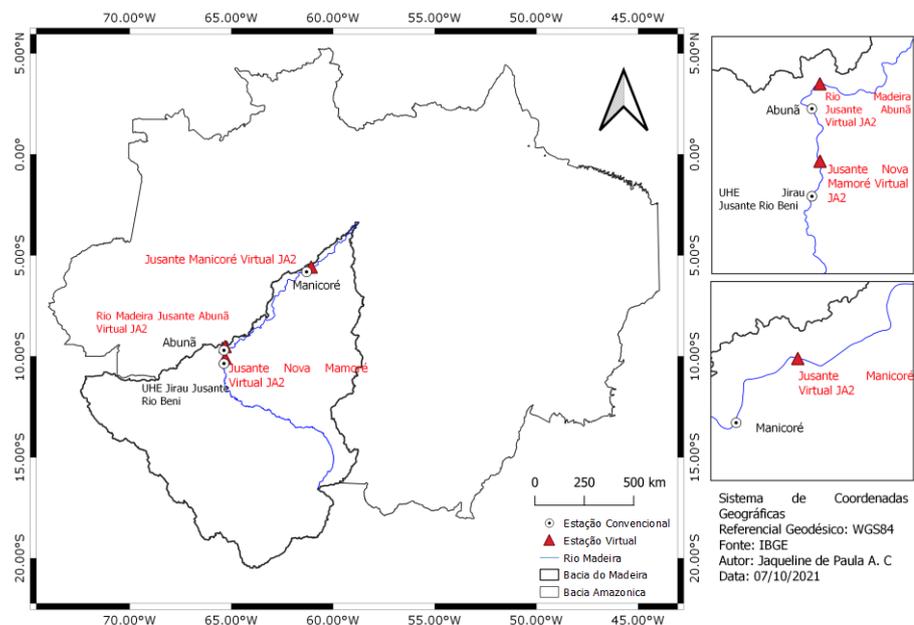
aos pares de estações e a Figura 4 ilustra os traços do Jason 2 (em vermelho), que fazem interseção com o rio Madeira nos três pontos de estudo selecionados com suas respectivas estações convencionais de referência.

Tabela 3 - Pares das estações convencionais e virtuais

Ponto	Estação Fluviométrica(convencional) (A)	Estação Virtual (B)	Distância aproximada entre A e B (km)
1	UHE JIRAU JUSANTE RIO BENI	Jusante Nova Mamoré Virtual JA2	29,649
2	ABUNÃ	Rio Madeira Jusante Abunã Virtual JA2	21,593
3	MANICORÉ	Jusante Manicoré Virtual JA2	36,499

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 4 – Mapa de Localização das Estações



Fonte: Autoria própria (2021).

Para análise comparativa dos níveis de água, definiu-se um período comum entre os dados das medições das estações fluviométricas (convencionais) e altimétricas (virtuais). Devido a falhas nas séries históricas, o período de análise para cada par de estações formado foi distinto, como se pode observar na Tabela 4.

Tabela 4 – Período de análise

Estação Fluviométrica (A)	Estação Virtual (B)	Período Analisado	
UHE JIRAU JUSANTE RIO BENI	Jusante Nova Mamoré Virtual JA2	2010 - 2014	4 anos
ABUNÃ	Rio Madeira Jusante Abunã Virtual JA2	2009 - 2020	11 anos
MANICORÉ	Jusante Manicoré Virtual JA2	2009 - 2019	10 anos

Fonte: Autoria própria (2021).

O primeiro ponto analisado, consiste no par de estações formado pela estação convencional UHE Jirau Jusante rio Beni e a estação virtual Jusante Nova Mamoré JA2. A série altimétrica do rio Madeira nesse trecho é composta pelos dados extraídos dos ciclos 64 ao 228, período compreendido entre 07 de abril de 2010 a 19 de abril de 2014 totalizando 4 anos de dados altimétricos. A estação fluviométrica UHE Jirau Rio Beni utilizada como estação de referência para análise comparativa dos dados é classificada como tipo FDS, que continue uma estação com escala para observação de nível de água, onde também são efetuadas medições de descarga líquida e descarga sólida.

O par formado pelas estações Abunã e Rio Madeira Jusante Abunã Virtual JA2, localizado no estado de Rondônia-RO compõe o segundo ponto analisado. A distância entre a seção da estação fluviométrica e a seção sobrevoada pelo satélite é da ordem de 21,593 Km (cálculo realizado através da calculadora geografia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)).

A estação fluviométrica Abunã, código 15320002 é classificada como tipo FDSQ e, além de constituir em uma estação que realiza medições de nível de água, descarga líquida e descarga sólida, realiza observações de qualidade da água. A série altimétrica na seção onde se localiza a estação virtual é composta pelos dados extraídos dos ciclos 31 a 293 e 1179 a 1057.

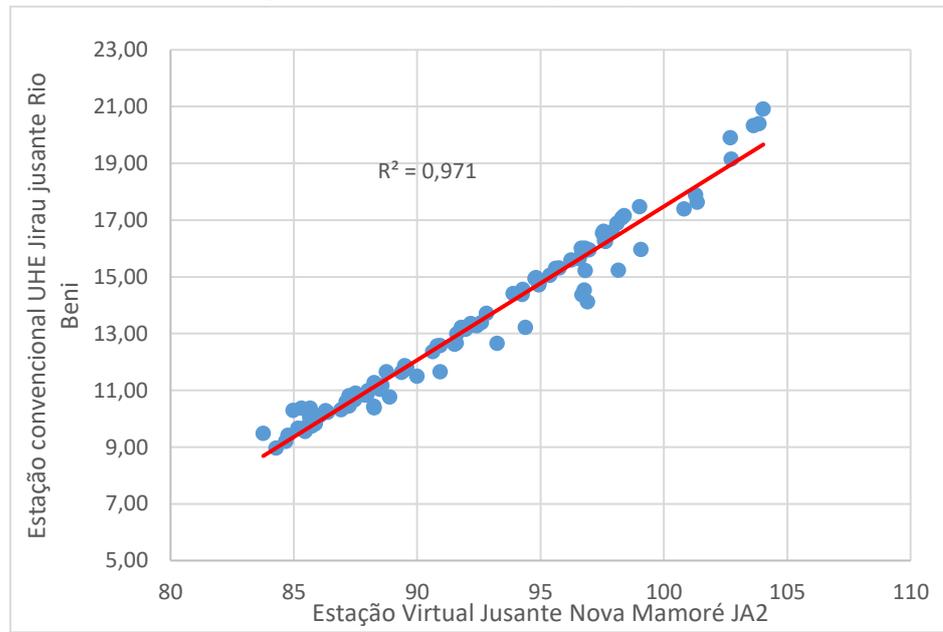
O terceiro e último ponto escolhido para análise foi o par formado pelas estações Manicoré e Jusante Manicoré Virtual JA2 localizado no estado do Amazonas-AM. A distância compreendida entre as duas estações é de aproximadamente 36,499 km. A estação *in situ* Manicoré, está registrada no inventário das estações fluviométricas da ANA como tipo FDSQT. Isto significa que a estação registra dados de níveis por meio das réguas fluviométricas (tipo F) e registros de vazão (tipo D) obtidos por meio de medições de descarga realizadas pela entidade operadora. A mesma realiza medições de descarga líquida (tipo S), indica estação de qualidade da água (tipo Q), além de realizar medições de forma automática através da telemetria (tipo T). A série altimétrica extraída na seção onde se localiza a estação virtual é composta por dados retirados dos ciclos 21 a 303 e 1025 a 1143.

Para verificar a relação estatística entre os dados de nível d'água adquiridos por estações convencionais e virtuais, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (R) que varia de -1 a 1, e quanto maior o valor absoluto mais forte é a correlação entre as variáveis analisadas (MINITAB, 2021).

As figuras 5, 6 e 7 de análise de correlação para cada ponto, reportam o valor de R^2 que representa o coeficiente de determinação, no entanto para se obter o coeficiente de correlação R, basta determinar a raiz quadrada de R^2 . As análises de

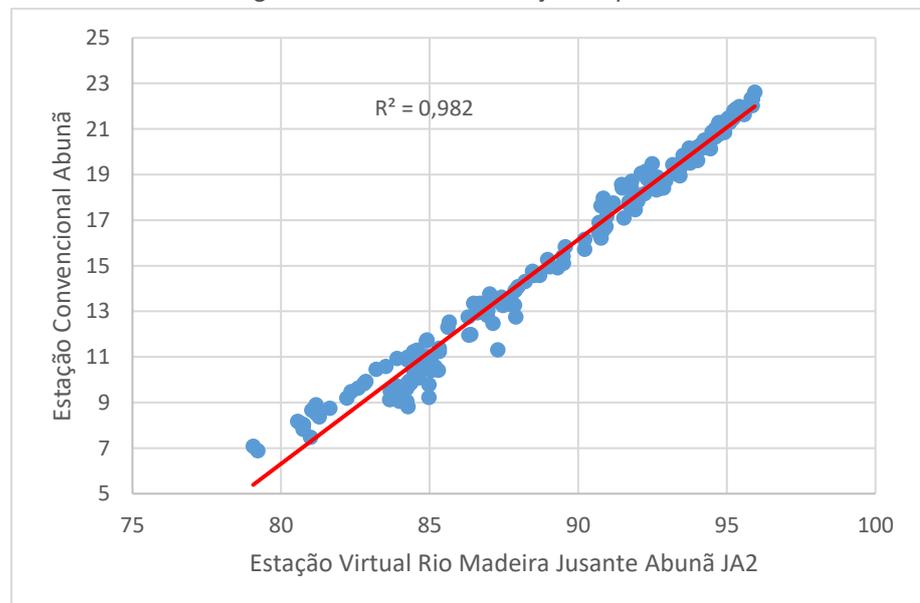
correlação aplicadas aos dados reportaram valores de 0,985, para o par de estações formado pela estação convencional UHE Jirau Jusante Rio Beni e Nova Mamoré virtual JA2, 0,991 para o par de estações formado pela estação convencional Abunã e Jusante Abunã Virtual JA2, e 0,985 para o par de estações formado pela estação convencional Manicoré e Jusante Manicoré Virtual JA2.

Figura5 – Análise de correlação do ponto 1



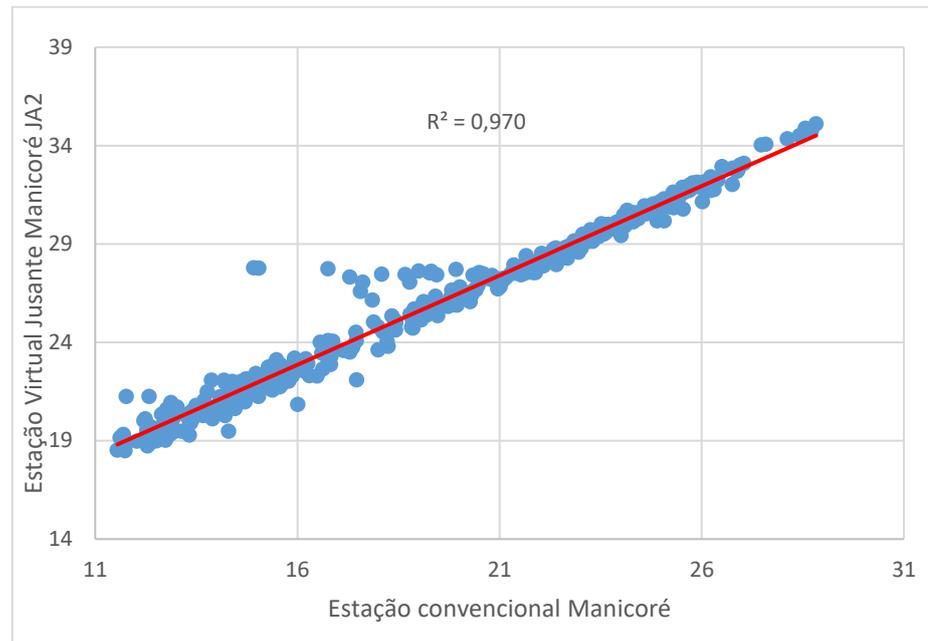
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura6 – Análise de correlação do ponto 2



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura7 – Análise de correlação do ponto 3



Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos valores de R^2 verifica-se que existe uma forte correlação entre os dados dos pares de estações formado para os 3 pontos em estudo, uma vez que os coeficientes de determinação de cada amostra são superiores a 0,8 (0,971; 0,982; 0,970) 75% (0,971; 0,982; 0,970) maiores que os valores de referência discutidos por Damasceno (2017).

A divisão das séries entre nível d'água alto e baixo também é interessante para comparar e analisar os resultados obtidos. A Tabela 5 apresenta os níveis característicos das estações analisadas, ou seja, máximos, mínimos e suas respectivas amplitudes.

A variabilidade do nível de água em cada estação, expressa pela amplitude, foi estudada e comparada com a distância entre cada estação e a largura das seções analisadas. Nota-se no primeiro ponto um crescimento da amplitude de uma seção para a outra, nesse ponto a variabilidade de nível é maior sendo proporcional à diminuição da largura do rio entre uma seção e outra. O segundo ponto também apresenta um crescimento da amplitude, no entanto, em uma magnitude menor com relação ao primeiro ponto, apesar da diminuição da largura do rio entre uma seção e outra. O ponto 3 apresenta um decréscimo na amplitude e um estreitamento da largura do rio entre uma seção e outra. Vale a pena ressaltar que além de fatores relacionados à distância e à largura entre uma seção e outra do rio, deve-se levar em consideração a existência da contribuição de tributários nas margens direita e esquerda ao longo dos três pontos analisados.

Ademais, vale ressaltar que as diferença entre as amplitudes(m) das estações foi maior no ponto 1 atingindo 8,33 m, contrapondo-se aos 1,34 e 0,66 m encontrados nos pontos 2 e 3 respectivamente. Foi possível verificar comportamento similar entre a variabilidade dos dados reportada pelo desvio padrão das estações.

Tabela 5 – Nível máximo, mínimo e amplitude dos dados

Ponto	Nome da estação	NA máximo (m)	NA mínimo (m)	Amplitude (m)	Distância entre as seções (m)	Largura aproximada da seção (m)
1	Convencional UHE Jusante Jirau Rio Beni	20,91	8,97	11,94	29,649	2359,36
	Jusante Nova Mamoré					
	Virtual JA2					
2	Convencional Abunã	22,62	7,08	15,54	21,593	577,99
	Rio Madeira Jusante Abunã					
	Virtual JA2					
3	Convencional Manicoré	28,83	11,55	17,28	36,499	1188,05
	Jusante Manicoré					
	Virtual JA2					

Fonte: Autoria própria (2021).

Legenda: NA= Nível de água

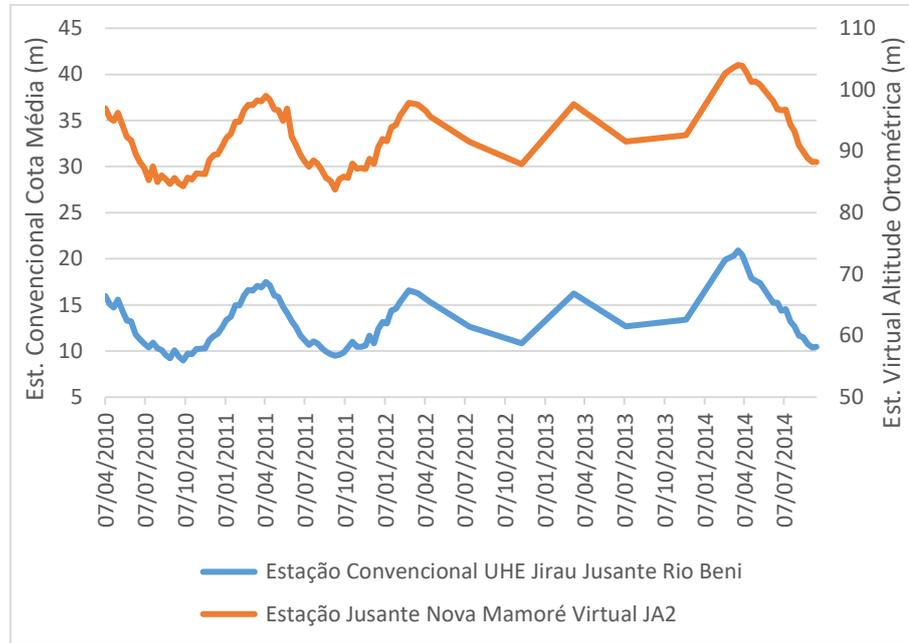
Para que os dados das estações virtuais possam ser comparados aos dados fornecidos pela estação fluviométrica, torna-se necessário que ambos estejam sobre o mesmo sistema de referência. Ao avaliar o nível máximo e mínimo de cada estação é possível perceber uma diferença significativa entre os dados. Uma justificativa que explica essa diferença está relacionada ao sistema de referência das estações analisadas. De acordo com relatório técnico apresentado pelo CPRM (2020), várias estações fluviométricas encontram-se sob referência arbitrária, enquanto as medidas adquiridas no portal HIDROSAT proveniente do satélite JASON 2 são relativas ao geóide.

A falta de uma mesma referência altimétrica para as estações fluviométricas de todo o Brasil é um dos pontos de atenção da rede hidrometeorológica nacional administrada pela ANA. De acordo com Moreira (2016), o fato de tais estações estarem referenciadas por marcos locais arbitrários expõe a fragilidade dessas a possíveis danos físicos ocasionados por movimentações no terreno ou colisão com objetos flutuantes como troncos ou embarcações. Esses fenômenos podem causar, inclusive, a perda da referência estabelecida localmente, impossibilitando, a reconstrução das séries hidrológicas.

Vale a pena ressaltar que vários estudos comprovam a qualidade e a confiabilidade dos dados altimétricos, sendo esse produto um importante complemento ou até mesmo uma alternativa às medidas *in situ* (SILVA, 2010).

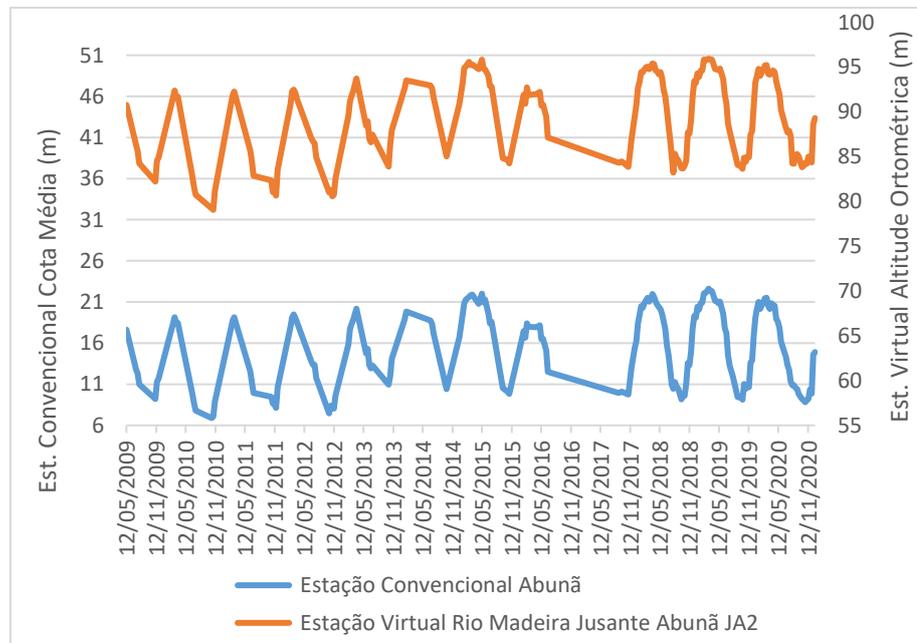
Conforme sobredito, as séries temporais das estações reais correspondem às cotas *in situ* de referencial arbitrário e específico, o que impede a comparação direta com os valores altimétricos (CPRM, 2020). Logo a análise gráfica através dos cotogramas (Figuras 8, 9 e 10) permitem verificar o comportamento do nível de água em cada ponto analisado.

Figura8 - Cotagrama da estação convencional UHE Jirau Jusante Rio Beni e Virtual Jusante Nova Mamoré JA2



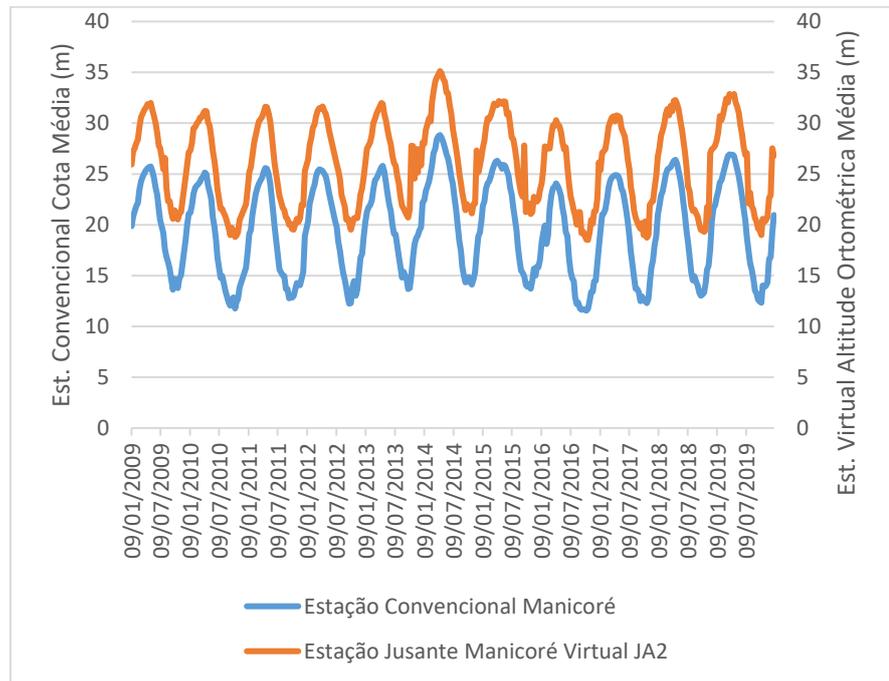
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura9 - Cotagrama da estação convencional Abunã e Virtual Rio Madeira Jusante Abunã JA2



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura10 - Cotograma da estação convencional Manicoré e Virtual Jusante Manicoré JA2



Fonte: Autoria própria (2021).

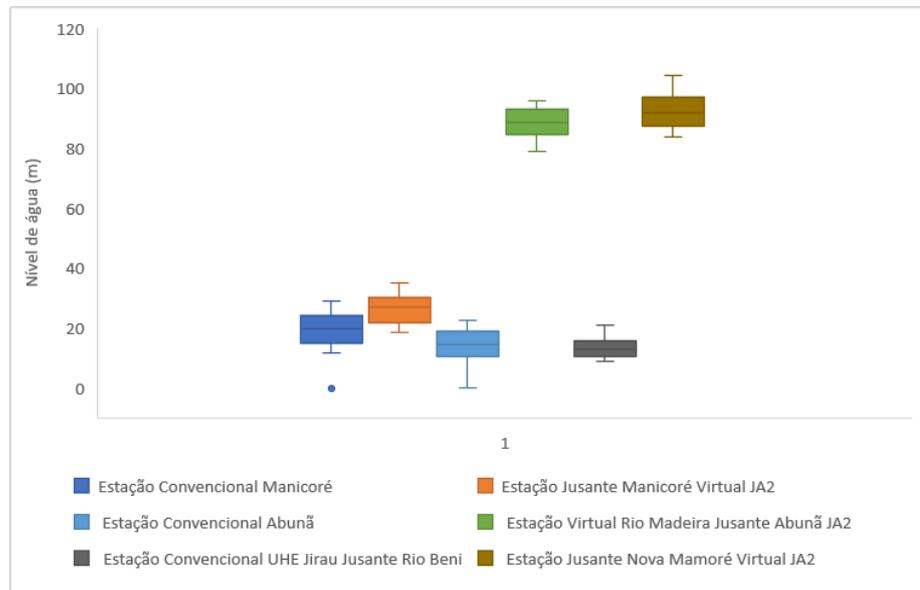
Por meio da verificação e comparação do comportamento do registro hidrológico das estações ao longo do tempo, é perceptível que os dados de cada conjunto de estações (real e virtual), trazidos em cada cotograma, apresentaram períodos correspondentes bem definidos de forma síncrona. Dessarte, similarmente ao verificado por Damasceno (2017) quando da análise dos respectivos cotogramas, foi possível verificar que as estações virtuais retratam de forma efetiva o comportamento hidrológico das estações convencionais.

Pode-se observar através das Figuras 8, 9 e 10, que os dados adquiridos pelo satélite acompanharam o regime de variação de níveis registrado pelas estações *in situ*, sugerindo a possibilidade de utilização desses dados como fonte complementar em estudos hidrológicos.

Como análise adicional aos cotogramas, utilizou-se o gráfico box-plot, Figura 11. Essa ferramenta gráfica permite visualizar a distribuição dos dados e identificar valores discrepantes.

De acordo com o Figura 11 é possível verificar que há uma tendência de valores maiores de nível de água das estações virtuais em comparação com as convencionais de referência. Observando a estação convencional UHE Jirau Jusante Rio Beni, percebe-se uma menor variabilidade dos dados evidenciada claramente pela menor dimensão da caixa neste ponto no gráfico Box-plot, ainda é possível observar nessa estação uma menor amplitude em relação às demais. Apesar da variabilidade do regime hidrológico ser controlada por diversos elementos que caracterizam a bacia, a série de dados apresenta poucos pontos discrepantes (outliers). Somado a isso, o Box plot ilustra, de forma mais evidente, a diferença entre os valores das estações reais e virtuais provenientes dos referenciais.

Figura11 - Box-Plot das estações convencionais e virtuais



Fonte: Autoria própria (2021).

Posto isso, embora ressalta-se aqui a importância da utilização dos dados das estações virtuais de forma complementar para ampliação do monitoramento dos recursos hídricos, ao comparar as medidas altimétricas de níveis de água (provenientes do portal HIDROSAT adquiridas pelo satélite JASON 2), e os dados obtidos em estações fluviométricas pertencentes ao portal HIDROWEB, é possível perceber a necessidade de uniformização de um sistema de referência de modo a permitir a comparação entre os dados das estações. No entanto, os resultados mostraram a potencialidade da utilização de dados altimétricos de forma a complementar e contribuir para a compreensão de processos hidrológicos.

CONCLUSÃO

Objetivou-se neste trabalho analisar de forma comparativa os dados de níveis de água adquirido por estações convencionais e virtuais, em uma seção do rio Madeira com dados provenientes das estações convencionais da ANA e de estações virtuais disponíveis no portal HidroWeb.

Embora os valores não tenham sido comparados de forma direta em razão da divergência entre os sistemas de referência, foi possível verificar, graficamente, que os dados das estações virtuais, adquiridos pelo satélite JASON 2, retrataram o regime de variação das estações convencionais, indicando um comportamento bastante similar. Essa afirmação pode ser interpretada como uma boa eficiência do JASON 2 no registro dos níveis de água no rio Madeira.

Ademais, tal prerrogativa foi corroborada por meio dos coeficientes de correlação de Pearson e de determinação que reportaram valores superiores a 0,9;(forte correlação) entre os dados no período de estudo, retratando a potencialidade da utilização de dados altimétricos em estudos hidrológicos.

Geralmente as estações fluviométricas possuem referenciais arbitrários com coordenadas geográficas não fixas, podendo ser alteradas de acordo com as ocorrências de cheias, erosão/deposição ou até mesmo vandalismo no local onde

estão instaladas. Conclui-se, então, que os dados espaciais de altitude ortométrica possuem uma potencialidade de utilização para entendimento dos processos hidrológicos e, ainda, como alternativas de complemento às medidas in situ ou em locais que não dispõem de estações de monitoramento.

Preliminary comparative assessment of water levels measured in virtual and conventional fluviometric stations: a case study in the Madeira river

ABSTRACT

Spatial altimetry is a technique that makes it possible to obtain level measurements of oceans, rivers, lakes and reservoirs. Currently, altimetric measurements of inland waters levels have been applied in the leveling of fluviometric stations, estimation of spatial, temporal and water storage variations in rivers and flood zones. Thus, the objective was to comparatively evaluate the water levels of virtual and conventional stations on the Madeira river. Three pairs of stations were selected containing one real and one virtual each, in a common data period, with altimetric measurements from the HIDROSAT portal (JASON 2 satellite) and data from the fluviometric stations of HIDROWEB (ANA). The statistical relationship between stations was verified through Pearson's correlation coefficients(R) and Determination coefficient(R²) and graphical analysis was used to verify the correspondence of hydrological behavior over time. The results showed that the data acquired by the satellite portrayed the regime of variation of levels of the in situ stations analyzed effectively, in addition to showing a strong correlation, reinforcing the possibility of your using it as a complementary base to the conventional monitoring system. Furthermore, the need to standardize the altimetric reference system for conventional stations was evident.

KEYWORDS: Altimetric radars. Flow estimation. Madeira River. Satellite Altimetry.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em 18 de agosto de 2020a.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Hidrosat: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidrosat.ana.gov.br/SaibaMais/Sobre>>. Acesso em 13 de outubro de 2020b.

ANDRADE, C. D.. **Análise pluviométrica da bacia transfronteiriça do rio Madeira**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL NOVEMBRO DE 2008.

BRASIL.. Plano Nacional de Recursos Hídricos: Panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil. Brasília: MMA, 2006. Disponível em: <<https://cnrh.mdr.gov.br/o-pnrh-2006>>. Acesso em: 31 de agosto de 2021.

CALMANT, S.; SEYLER, F.. Continental surface Waters from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14, p. 1113-1122, 2006.

CEMADEN.. Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. Previsão da Vazão do rio Madeira. Publicado em 13 de abril de 2018. Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/13042018-previsao-de-vazao-para-bacia-do-rio-madeira/>>. Acesso em 31 de agosto de 2021.

COSTI, A. C. Z.. 2012. **Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos hídricos, Publicação PTARH. DM – 144/2012. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília DF. 158 p.

CPRM.. Relatório Técnico Altimetria de estações fluviométricas desativadas em 2019 no Estado de Rondônia. Porto Velho Abril de 2020.

DAMASCENO, J. A.. 2017. **Monitoramento hidrológico da Bacia do Rio Madeira por altimetria espacial**. Dissertação de Mestrado em Clima e Ambiente. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA Universidade do Estado do Amazonas. Programa de pós-graduação em Clima e Ambiente. Manaus, Amazonas. 115 p.

DIAS, F. S.. Definição de Rede Adaptativa de Monitoramento Hidrometeorológico com Suporte de Sensoriamento Remoto na Bacia do Dois Rios – RJ / Fernanda Spitz Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

FILIZOLA, N.; GUYOT J. L.; MOLINIER M.; GUIMARÃES V.; OLIVEIRA E.; FREITAS MA.. Caracterização hidrológica da bacia Amazônica. In: Rivas, A & Freitas, C. E. de C. **Amazônia uma perspectiva interdisciplinar**. Ed. EDUA, 33-53 p, 2002.

FIOREZE, A. P.; OLIVEIRA, L. F. C.; FRANCO, A. P. B.. Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil”. **Revista Água & Ambiente – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v. 3, n. 2, pp. 62-67, 2008.

GONTIJO, W. C. J.. 2007. **Avaliação e rendimento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método shape e conceito de entropia**. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH. DM – 103/2007. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília DF. 190 p.

GUYOT, J., L.. 1993. Hydrogéochimie des Fleuves de l’amazonie Bolivienne. Universite de Bourdeaux, Bourdeaux.

HARVEY, K. D.; GRABS, W. (Eds).. WMO Report of the GCOS/GTOS/HWRP Expert Meeting on the Implementation of a Global Studies. Toronto, Canadá, 18-20 Novembro, 2003. 51 p

MINITAB.. Statistical software. Interpretar os principais resultados para correlação. Disponível em: < <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/key-results/>>. Acesso em 8 de setembro de 2021.

MORAIS, J. D.. 2017. **Avaliação de modelos digitais de elevação provenientes de dados de sensoriamento remoto de distribuição gratuita**. Dissertação de Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Instituto de Geociências. Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 94 p.

MOREIRA, D. M.. **Geodésia aplicada ao monitoramento hidrológico da bacia Amazônica** (2016) Tese de Doutorado. Rio de Janeiro. UFRJ /COPPE.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Disponível em:<<http://www.nasa.gov/>>. Acesso em julho de 2022.

OLIVEIRA, B. L. F. 2018.. **Monitoramento hidrológico transfronteiriço da bacia Amazônica por altimetria espacial**. Tese de Doutorado. Manaus. Dissertação de Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade do Estado do Amazonas. 93 p.

PEREIRA, E. O.; GONTIJO, L. A. C.; MAILLARD, P. Altimetria por satélite radar aplicada a hidrologia no brasil, 2016. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:PfzBHzN5H8UJ:www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/download/44022/23273/+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em 23 de setembro de 2020.

SANTOS, E. P.; JESUS, T. B.; CARNEIRO, A. S. R.; SANTOS, R. L.; FRANCA-ROCHA, W. J. S.; COSTA, T. S.. Espectrorradiometria de Campo e Dados Sentinel-2 Aplicado ao Estudo da Clorofila-a em Corpos Hídricos de Reservatórios, **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, n. 1, p. 38707, 2021. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_38707.

SANTOS, F. C.; PEREIRA, F. W.. Estimativa de constituintes opticamente ativos da água por sensoriamento remoto orbital. **Geo UERJ**, n. 37, p. 38068, 2020. <http://dx.doi.org/10.12957/geouerj.2020.38068>.

SCHWATKE, C.; DETTMERING, D.; BOSCH, W.; SEITZ, F.. DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 10, p. 4345-4364, 2015.

SERBETO, L. F.; MENDES, G.; RIBEIRO, C. B. M.; PEREIRA, R. O.. Determinação da Concentração de Clorofila-a por Sensoriamento Remoto no Reservatório de Chapéu d'Úvas (MG), Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3561-3576, 2021.

SILVA, J. S. 2010. Altimetria Espacial Em Zonas Úmidas Da Bacia Amazônica: aplicações hidrológicas. Sarrebruck: Éditions Universitaires Européennes.

SILVA, K. M. 2019. Validação dos níveis de Água fornecidos pelos satélites altimétricos Jason 1, 2 E 3 na Bacia Amazônica.

Recebido: 26nov. 2021

Aprovado: 20out. 2022

DOI: 10.3895/rbgeo.v10n4.14979

Como citar: COSTA, J. A.; RIBEIRO, C. B. M.; FERREIRA, J. S.; CARVALHO, A. S.; GOMES, M. H. R.. Avaliação preliminar comparativa de níveis de água medidos em estações fluviométricas virtuais e convencionais: estudo de caso no rio Madeira. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 10, n. 4, p. 239-259, out./dez. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Jaqueline de Paula Ananias da Costa

Rua Silvino Augusto Moreira, 662, CEP 36032-530, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

