

UTILIZAÇÃO DE DADOS DE SENSORES REMOTOS COMO INSTRUMENTO DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO MADEIRA

USE OF REMOTE SENSOR DATA AS AN INSTRUMENT FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT IN THE MADEIRA RIVER BASIN

USO DE DATOS DE SENSORES REMOTOS COMO INSTRUMENTO PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO MADEIRA

Thiago Oliveira dos Santos

Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pela Universidade do Estado do Amazonas - UEA
t.santos.720@gmail.com

Joecila Santos da Silva

Professora na Universidade do Estado do Amazonas - UEA
jsdsilva@uea.edu.br

Gisely Pereira de Souza Ventura

Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pela Universidade do Estado do Amazonas - UEA
gisely_am@hotmail.com

Adrien Paris

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
aparis@groupcls.com

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo validar dados de profundidade obtidos por intermédio da equação da curva chave elaborada com base em dados do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB) e Altimetria Espacial (Sentinel 3A). Utilizando como comparativo para validação, dados de profundidade obtidos por intermédio de batimetria. Os valores encontrados com relação aos parâmetros da curva chave são coeficiente A (250,074); coeficiente B (1,738) e o Coeficiente Z_0 (13,788). As vazões simuladas produziram resultados consistentes e aplicáveis para o estudo, tornando assim desnecessária a calibração do modelo. O percentual de confiança apresentado pela curva chave foi de (95%). Os valores podem ser explicados pela geometria da seção. Foi possível identificar a existência de uniformidade no conjunto de dados o que indica um bom ajuste da curva chave. A diferença existente entre os dados obtidos pela curva chave (MGB/Altimetria Espacial) e (*in situ*) relacionados a profundidade média foi de (1,17m). Quando comparados, os valores encontrados relacionados ao desvio padrão, foi possível identificar uma diferença de (0,76 cm). A validação de informações geomorfológicas relacionadas a variável profundidade, podem auxiliar na criação de novas alternativas para o monitoramento hidrológico da bacia Amazônica.

Palavras-chave: Altimetria espacial; Curva chave; Monitoramento hidrológico; Rio Madeira.

ABSTRACT

The present study aimed to validate depth data obtained through the key curve equation elaborated based on data from the Large Basin Hydrological Model (MGB) and Spatial Altimetry (Sentinel 3A). Using as a comparison for validation, depth data obtained through bathymetry. The values found in relation to the parameters of the key curve are coefficient A (250.074); coefficient B (1.738) and the Coefficient Z0 (13.788). The simulated flows produced consistent and applicable results for the study, thus making model calibration unnecessary. The percentage of confidence presented by the key curve was (95%). Values can be explained by section geometry. It was possible to identify the existence of uniformity in the data set, which indicates a good fit of the key curve. The difference between the data obtained by the key curve (MGB/Spatial Altimetry) and (in situ) related to the average depth was (1.17m). When compared, the values found related to the standard deviation, it was possible to identify a difference of (0.76 cm). The validation of geomorphological information related to variable depth can help create new alternatives for the hydrological monitoring of the Amazon basin.

Keywords: Spatial altimetry; Rating curve; Hydrological monitoring; Madeira river.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo validar los datos de profundidad obtenidos a través de la ecuación de la curva clave elaborada a partir de datos del Modelo Hidrológico de Gran Cuenca (MGB) y Altimetría Espacial (Sentinel 3A). Utilizando como comparación para la validación, los datos de profundidad obtenidos mediante batimetría. Los valores encontrados en relación a los parámetros de la curva clave son el coeficiente A (250.074); coeficiente B (1,738) y el coeficiente Z0 (13,788). Los flujos simulados produjeron resultados consistentes y aplicables para el estudio, haciendo innecesaria la calibración del modelo. El porcentaje de confianza presentado por la curva clave fue (95%). Los valores se pueden explicar mediante la geometría de la sección. Fue posible identificar la existencia de uniformidad en el conjunto de datos, lo que indica un buen ajuste de la curva clave. La diferencia entre los datos obtenidos por la curva clave (MGB / Altimetría espacial) y (in situ) relacionados con la profundidad media fue de (1,17 m). Al comparar los valores encontrados relacionados con la desviación estándar, fue posible identificar una diferencia de (0,76 cm). La validación de información geomorfológica relacionada con la variable profundidad puede ayudar a crear nuevas alternativas para el monitoreo hidrológico de la cuenca del Amazonas.

Palabras clave: Altimetría espacial; Curva clave; Monitoreo hidrológico; Rio Madeira.

1. INTRODUÇÃO

A bacia Amazônica abrange uma área de drenagem de 6.112.000 km², apresentando uma alta pluviosidade, que varia de 200 a 6.000 mm.ano⁻¹, dependendo da região e uma vazão média na foz do rio Amazonas de 238.000 m³.s⁻¹.ano⁻¹, contribuindo com, aproximadamente, 15% a 20% da descarga de água doce nos oceanos. A bacia Amazônica é composta particularmente pelos rios Solimões/Amazonas e por 14 importantes afluentes onde cada um deles apresenta mais de 1.000 Km de extensão. Os afluentes do Sul são: rios Juruá, Javari, Jutai, Purus, Madeira, Tapajós e Xingu. Já os afluentes do Norte são: rios Içá, Japurá, Negro, Uatumã, Nhamundá, Trombetas e Jari. Vale ressaltar que vários afluentes de dimensão menor operam como canais de conexão entre a planície de alagamento e o canal principal (MOLINIER et al., 1995; MOLION, 1998; GOULDING et al., 2003; RONCHAIL et al., 2005; SILVA, 2010).

Devido a sua vasta extensão territorial e diferentes características geomorfológicas, a bacia Amazônica possui uma significativa heterogeneidade espacial e temporal da precipitação. Há uma marcada sazonalidade do ciclo hidrológico, que se apresenta em oposição entre o norte e o sul da bacia (SILVA et al., 2013). Na porção central, ao longo do canal principal, o período chuvoso ocorre entre os meses de fevereiro-março-abril. Influenciada pela Zona de Convergência Intertropical - ZCIT, a região norte da bacia apresenta seus máximos e mínimos de chuva nos meses de maio-junho-julho/janeiro-fevereiro-março, enquanto que na região sul, influenciada pela Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS, a estação chuvosa e seca inicia-se no mês de dezembro/junho-julho-agosto, (FIGUEROA; NOBRE, 1990; MARENGO, 1992; MOLINIER et al., 1996; BORMA et al., 2013). Observa-se, então, uma defasagem nos picos de chuva em torno de 6 meses, aproximadamente, o que implica também na defasagem do pico de cheias e vazões dos principais tributários da bacia Amazônica.

Os níveis máximos dos rios da bacia Amazônica são atingidos em diferentes épocas do ano, em virtude dessas defasagens, que acabam acarretando em diferentes efeitos na propagação das ondas de cheia, afetando o nível de água na cidade de Manaus, por exemplo, localizada na confluência dos rios Negro e Solimões (MOLINIER et al., 1997; GUYOT et al., 1998). De acordo com o estudo de Marengo; Uvo (1996), existe uma correspondência entre chuva e vazões de rios caracterizada como fortemente não linear, entretanto, grandes anomalias de precipitação resultam em anomalias de descarga de rios de mesmo sinal. De acordo com os autores, isto acontece porque as vazões integram a variabilidade espacial da precipitação dentro da bacia.

Como exemplos de tais fenômenos resultantes do aumento na magnitude dos níveis de água máximos e mínimos observados em rios da bacia Amazônica (ESPINOZA et al., 2009). Os fenômenos resultantes desta maior ou menor defasagem, podem ser citadas as cheias de 2009, (CHEN et al., 2009; CHEN et al., 2010), e as secas de 2005 (ARAGÃO et al., 2007; MARENGO et al., 2008; ZENG et al., 2008; CHEN et al., 2009; ESPINOZA et al., 2011; MARENGO et al., 2011; FRAPPART et al., 2012).

Como os rios Amazônicos são extensos, os escoamentos naturais tornam-se extremamente complexos. De acordo com Silva (2010), a vazão, na planície aluvial, do rio Solimões-Amazonas é influenciada pela fraca declividade da lâmina de água que é em torno de 1 a 6 cm.km^{-1} (MEADE et al., 1991), pelas fortes velocidades observadas, resultante dos regimes hidrológicos (GUYOT et al., 1998) e pelas características regionais dos seus afluentes ligados ao regime de chuva da bacia (RONCHAIL et al., 2005; VILLAR et al., 2009). Em outras palavras, há um deslocamento das águas empurradas pela onda de cheia dos rios de origem andina, diferentemente do escoamento clássico (MOLINIER et al., 1996), que se processa por gravidade, de forma que há uma necessidade de se levar em consideração uma caracterização espacializada ou distribuída do fenômeno, que, por outro lado, exige conhecimentos e estudos diferenciados.

Com uma área de drenagem com valor aproximado de 1.420.000 Km^2 , na Bolívia (51%), no Brasil (42%) e Peru (7%), o rio Madeira é um dos mais importantes afluentes amazônicos (GUYOT et al., 1993; FILIZOLA et al., 2002). Seu nome tem origem na língua Tupi *Mã-nd-yê-rê* que significa impedimentos e voltas, fazendo referência às diversas cachoeiras, meandros e curvas existentes no rio. A vegetação é do tipo mesclada, com a presença de pastagens e vegetação do tipo savana localizada nas áreas inundadas e florestas tropicais em áreas não inundadas. Mesmo com o forte impacto de origem antrópica do desmatamento tendo convertido parte das áreas florestais em pastagem (SANT'ANNA, 2007).

Devido suas dimensões semicontinentais, o estudo hidrológico da bacia Amazônica é desafiador, as dificuldades impostas pela localização de corpos hídricos em áreas remotas é a principal dificuldade. Esse cenário torna viável e necessário a utilização da tecnologia espacial (satélites). Uma das bases para uma gestão de recursos hídricos de sucesso, é o monitoramento hidrológico contínuo. A aplicação da altimetria espacial pode ser considerada uma importante ferramenta para o monitoramento das variações de níveis de água nos corpos hídricos da bacia Amazônica. Sua cobertura espacial permite o acesso a áreas remotas e de difícil acesso, tornando possível a obtenção

de dados de cota fluviométrica nessas áreas. Desta forma utilizar dados provenientes de satélites altimétricos é fundamental para que seja possível uma visualização da superfície em escala continental com detalhes espaciais e temporais maiores quando comparados com as redes hidrometeorológicas ou estações de superfície (ALSDORF et al., 2001). O presente estudo tem como objetivo validar dados de profundidade obtidos por intermédio da equação da curva chave elaborada com base em dados do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB e Altimetria Espacial - Sentinel 3A. Utilizando como comparativo para validação, dados de profundidade obtidos por intermédio de batimetria.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A bacia do rio Madeira é localizada na parte sudoeste da bacia amazônica na margem direita do rio Amazonas abrangendo os estados de Rondônia, Amazonas, parte da (sub-região do Madeira), Mato Grosso, parte (porção noroeste) e Acre (pequena faixa a sudeste do estado) em território boliviano e peruano (MUNIZ, 2013). A (figura 1) representa a localização da bacia do rio Madeira.

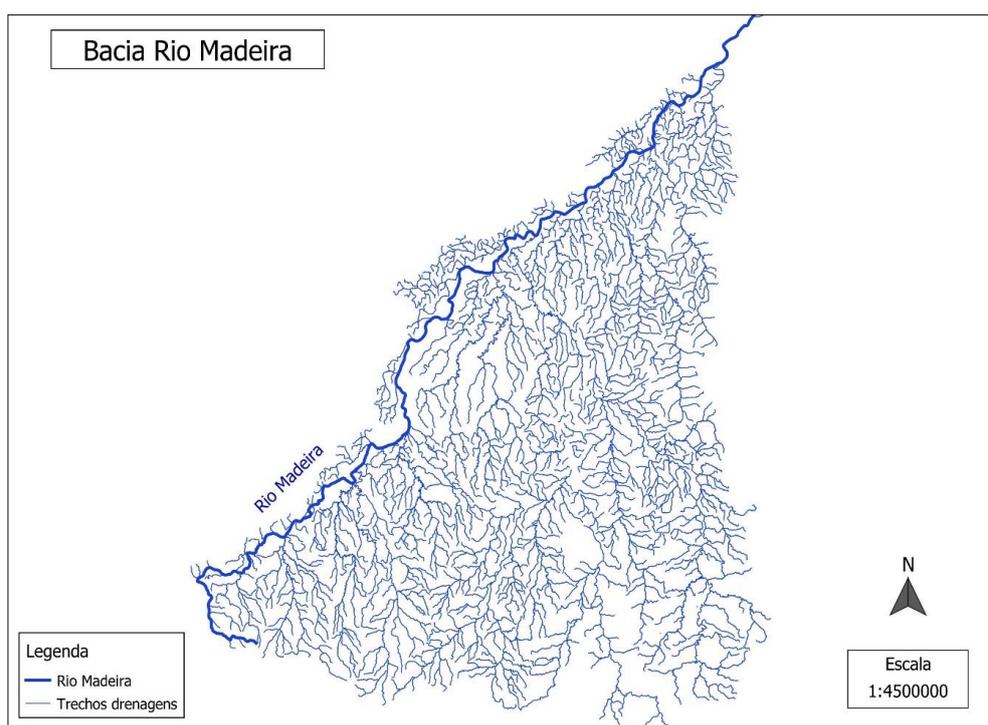


Figura 1- Mapa de localização da bacia do rio Madeira. Fonte: ANA; IBGE, 2021. Elaboração: Paula Adrienny De Andrade Viana, 2021.

No alto do rio Madeira é possível observar a presença de uma planície de inundação conhecida pelo nome de os *Llanos de Moxos*, formando a planície do rio Beni, composta pelos rios Beni, Mamoré e Guaporé (GUYOT, 1993; ESPINOZA et al., 2009).

O rio Madeira apresenta períodos de cheias, vazantes e secas. O perfil hidrológico tem início no final de janeiro até o mês de junho, com o período de seca começando em julho até o final de novembro. O ano hidrológico do rio Madeira tem cerca de 365 ± 5 dias.

A bacia hidrográfica do rio Madeira é caracterizada por uma estação seca que ocorre durante os meses de julho, agosto, setembro e outubro. A estação chuvosa da bacia hidrográfica do rio Madeira ocorre durante os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, tendo janeiro como o mês mais úmido (ESPINOZA et al, 2009). Devido as dimensões da bacia, eventos relacionados ao *El Niño* oscilação sul (*ENSO*) são muitos sazonais e muitas vezes há uma relação bastante distinta para cada situação específica (ESPINOZA et al., 2009a; 2009b; ESPINOZA et al., 2013; SEILER et al., 2013). A (figura 2) representa o mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Madeira juntamente com a área de estudo localizada no município de Manicoré.

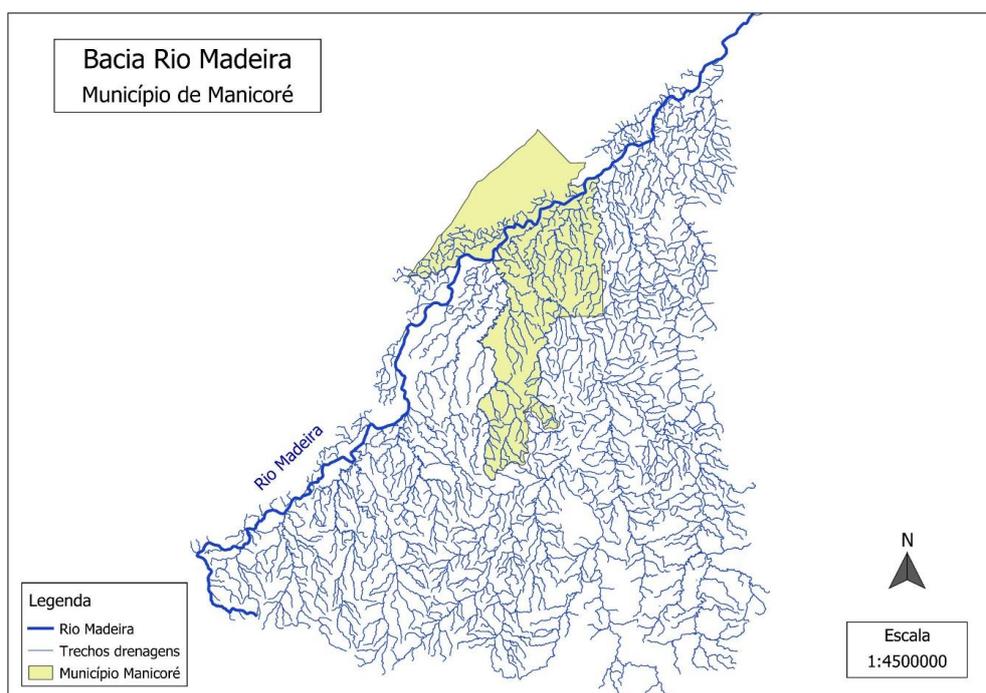


Figura 2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Madeira e da área de estudo localizada no município de Manicoré no estado do Amazonas. Fonte: ANA; IBGE, 2021. Elaboração: Paula Adrienny De Andrade Viana, 2021.

2.2. Dados *in-situ*

Os dados *in-situ* utilizados no estudo foram obtidos por intermédio de um levantamento hidrográfico feito pelo Serviço de Sinalização Náutica - SSN-9 durante o período de 30 de janeiro a 16 de março do ano de 2017 com o objetivo de atualizar a carta náutica e o incremento da segurança de navegação do referido trecho do rio Madeira, compreendido entre o Km 320, proximidade da Ilha das Araras, e o Km 460, nas proximidades do município de Manicoré, no estado do Amazonas. O equipamento utilizado na batimetria realizada durante o levantamento hidrográfico foi o ecobatímetro E.M 2040C.

Os dados de profundidade gerados pela batimetria foram utilizados no estudo com a finalidade de auxiliar no processo de validação dos dados de profundidade estimados pela curva chave produzida com dados do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias – MGB e Altimetria Espacial – Satélite Sentinel 3A.

2.3. Dados altimétricos

Os dados de cota altimétrica foram obtidos com base na missão Sentinel 3A (2016 – atual), utilizando o algoritmo de *FO Ice-1*. Esses dados altimétricos estão disponíveis na base de dados Hydroweb, do site Theia-CNES: <<http://hydroweb.theia-land.fr/?lang=en&>>. Os dados de nível de água estimados, são fornecidos por intermédio de estações virtuais (E.V), que correspondem ao ponto de cruzamento da passagem do satélite com um corpo hídrico. A terminologia é apenas para diferenciá-la de uma estação *in-situ*. Foi escolhido um ponto de cruzamento entre a passagem do satélite Sentinel 3A e o corpo hídrico analisado no estudo. A elaboração da estação virtual foi realizada utilizando o software MAPS 2.3. Vale ressaltar, que a elaboração de estações virtuais pode ser uma opção viável quando não se tem estações convencionais disponíveis na área de interesse.

2.4. Dados secundários de vazão e parâmetros da curva chave

Por intermédio da utilização do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB, foram obtidos os dados secundário de vazão simulada juntamente com a cota do fundo (H_0). Foi utilizado o MGB-IPH calibrado na Amazônia (Siqueira et al, 2018). Esse recorte é uma extensão do MGB para América do Sul. Foi realizada uma simulação durante o período de 2014 a 2020 com diferentes produtos de chuva como, *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation - MSWEP*, com o qual o modelo foi calibrado. Também foi utilizado IMERG e TAPPER que cobrem o período recente. O conjunto de dados utilizados no estudo são provenientes da melhor simulação. Todos os parâmetros necessários para o cálculo da equação da curva chave, como, valores de vazão, H_0 e os parâmetros a e b que são constantes a serem determinadas, foram obtidos com base na simulação hidrológica com o Modelo de Grandes Bacias - MGB. Somente o parâmetro (H) foi obtido com base nos dados altimétricos do satélite Sentinel 3A durante o ano de 2017. Logo abaixo temos a representação da equação da curva chave que é utilizada para estimar valores de vazão em corpos hídricos. A curva-chave torna possível a medição diária de vazão pela relação entre cota-vazão dada pela equação.

$$Q = ax(h - h_0)^b$$

Em que Q é a vazão; h , a leitura da régua correspondente à vazão Q ; h_0 , a leitura da régua correspondente à vazão nula; A e B , são constantes próprias a cada estação.

2.5. Validação dos dados de profundidade

Foi feita uma análise utilizando estatística básica entre os dados de profundidade *in-situ* e os dados de profundidade estimados pela curva chave. Com o objetivo de verificar a diferença existente entre os dados de profundidade *in-situ* (batimetria) e os dados de profundidade estimados pela curva chave com base em dados obtidos pelo Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB e Altimetria Espacial – Sentinel 3A. Para realização da validação dos dados foi feita a seleção dos dados de batimetria próximo à área de localização da estação virtual (EV-338-S3A). Essa seleção de dados teve como objetivo reduzir o número de medidas realizadas pela batimetria, delimitando e utilizando um conjunto de medidas próximo as obtidas pela estação virtual.

Os dados de profundidade foram obtidos com o auxílio do parâmetro (Z_0) da curva chave. Por intermédio da utilização deste parâmetro foi possível obter os dados de profundidade através da subtração do (Z_0) pelos valores de cota altimétrica do satélite Sentinel 3A dentro do recorte temporal

(2016-2019). Com a obtenção dos valores de profundidade *in-situ* e a profundidade estimada pela curva chave com o auxílio do parâmetro (Z_0), foi possível realizar a validação dos dados de profundidade. Tornou viável o cálculo da média, desvio padrão, profundidade máxima, profundidade mínima e amplitude entre os dois conjuntos de dados.

O recorte temporal utilizado pela estação virtual (EV-338-S3A) compreende os anos de 2016-2019. Sendo 2019 apenas os três primeiros meses do ano. A batimetria da área de estudo foi realizada durante o ano de 2017, logo os valores de profundidade são referentes ao mesmo ano. Com base neste cenário, a validação dos dados de profundidade teve como recorte temporal apenas o ano de 2017.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estação virtual com dados do satélite Sentinel 3A

Foi produzido um cotograma com dados provenientes do satélite Sentinel 3A (Figura 3). O gráfico abrange os anos 2016-2019. Com base na análise do cotograma é possível observar o comportamento do nível da água ao longo dos anos. Sendo possível, desta forma, analisar a sazonalidade durante os anos de 2016 – 2018, vale ressaltar que foi incluído no cotograma (Figura 3), os três primeiros meses de 2019 (janeiro a março). A determinação dos períodos sazonais é importante para auxiliar na viabilização da utilização de metodologias que podem identificar e analisar às diferenças hidro morfológicas e hidrodinâmicas estabelecidas durante os períodos de cheia e estiagem.

O rio Madeira é um caso especial quando o assunto é análise hidrológica. Alguns fatores de origem antropogênica devem ser considerados durante a análise. Um desses fatores é a construção da hidrelétrica de Jirau e Santo Antônio. O estudo desenvolvido por Damasceno (2017), indica que existe uma tendência de sazonalidade em relação as medidas de variações máximas e mínimas nos pontos do rio Madeira onde a interferência humana pode ser identificada.

Quando analisamos todo o percurso do rio Madeira incluindo o antes e depois das hidrelétricas, é possível verificar as características do rio, onde a presença de fortes variações hidrológicas não são notadas, mesmo com a forte ação antropogênica, como a construção de usinas hidrelétricas. A variabilidade de cotas (máximas – mínimas) tem característica sazonal no decorrer do percurso do rio, tendo relativo crescimento no início e notório recuo próximo a primeira hidrelétrica. O crescimento volta a ocorrer até a presença da segunda usina hidrelétrica. A característica sazonal do rio Madeira, só volta a ocorrer após a segunda hidrelétrica. Com base na análise da estação virtual utilizada no estudo, foi possível identificar o ano hidrológico do rio Madeira que tem em média 365 ± 22 dias. O período da cheia compreende os meses de janeiro até junho. Enquanto que o período da vazante ocorre durante os meses de julho a dezembro. Os picos de cheia são observados nos seguintes meses (abril, maio e junho) – secas (setembro, outubro e novembro). A (figura 3) representa o cotograma da área analisada no estudo localizada na bacia do rio Madeira.

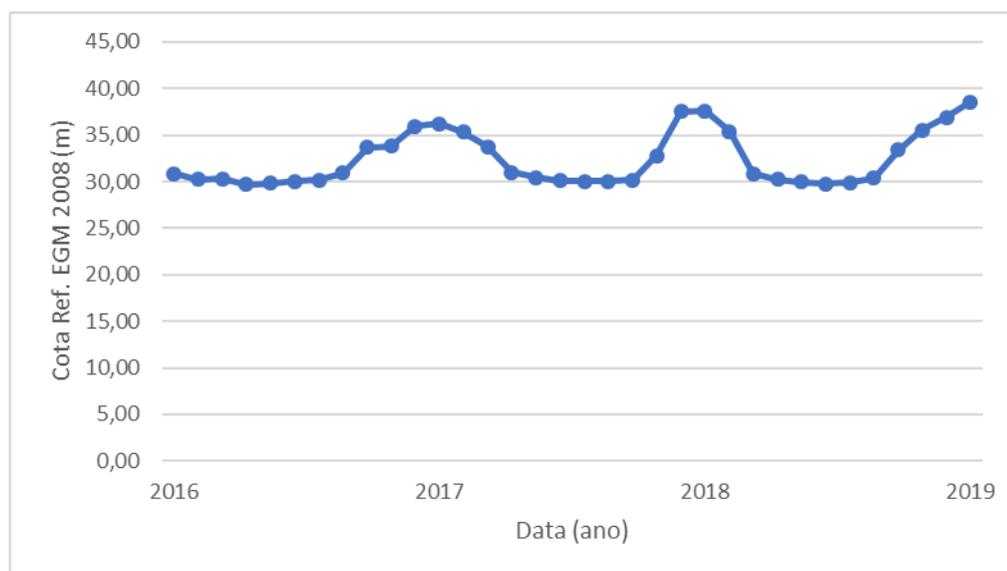


Figura 1 - Cotagrama da estação virtual EV-Madeira-338-S3A, elaborada com dados do satélite Sentinel utilizando o software MAPS 2.3. Elaboração: Thiago Oliveira dos Santos, 2019.

A tabela 1, apresenta a distribuição das informações e valores de cota/amplitude da estação virtual (Ev-338-S3A), elaborada com dados do satélite Sentinel 3A.

Tabela 1 - Estação virtual elaborada no trecho do estudo localizado no rio Madeira, utilizando dados do satélite Sentinel 3A.
Elaboração: Thiago Oliveira dos Santos, 2019.

Estação virtual	Traço	Latitude (°)	Longitude (°)	Cota mínima (m)	Cota máxima (m)	Amplitude (m)
Madeira-338-S3A	338	-5,781356	-61,4157	29,71	38,57	8,85

3.2. Validação dos dados de profundidade *in-situ* e curva chave

É importante ressaltar que cursos d'água de leitos móveis, geralmente com tendência a formação de meandros, declividades pequenas e sujeitos, geralmente, à extravasamento frequente, dificilmente apresentam condições favoráveis ao estabelecimento de uma curva chave única. É devido esse tipo de cenário que se torna importante o conhecimento da seção transversal que se estar trabalhando ou analisando. Um dos fatores que acabam influenciando na dificuldade ou até mesmo no impedimento do estabelecimento de uma curva chave, é a vegetação recobrendo as margens e o leito maior do rio, essa condição pode ser um fator de instabilidade da relação cota e vazão, principalmente pela variação da rugosidade, ligada às variações sazonais da vegetação ou a ações antrópicas (JACON; CUDO, 1989).

A (figura 4) representa os valores de cada parâmetro utilizado e obtido pela curva chave elaborada com dados de vazão simulada (MGB) e cota altimétrica (Sentinel 3A).

Num	Mini	Lat	Lon	coefA	coefB	CoefZ0	ENS	RMSE	KGE	ErrQmin	ErrQmax	indicateur	NumPts	Ope
1	12268	-5.811	-61.432	250.074	1.738	13.788	0.931	8.164	0.957	5.054.257	10.016.628	0.000	31	1

Figura 2 - Valores e parâmetros obtidos pela curva chave elaborada com dados de vazão simulada e cotas altimétricas. Elaboração: Thiago Oliveira dos Santos, 2020.

Os coeficientes (A, B e Z_0) são os valores de saída da curva chave. O valor correspondente ao coeficiente Z_0 (13,788) da curva chave, foi utilizado na subtração da média da série temporal da estação virtual (EV-338-S3A) com o objetivo de obter o valor de profundidade da mesma. O valor encontrado na subtração foi de 18,62 metros. A (figura 5) representa na forma de um cotograma os valores de profundidade recuperados para cada passagem do satélite na área de estudo onde fica localizada a estação virtual (EV-338-S3A).

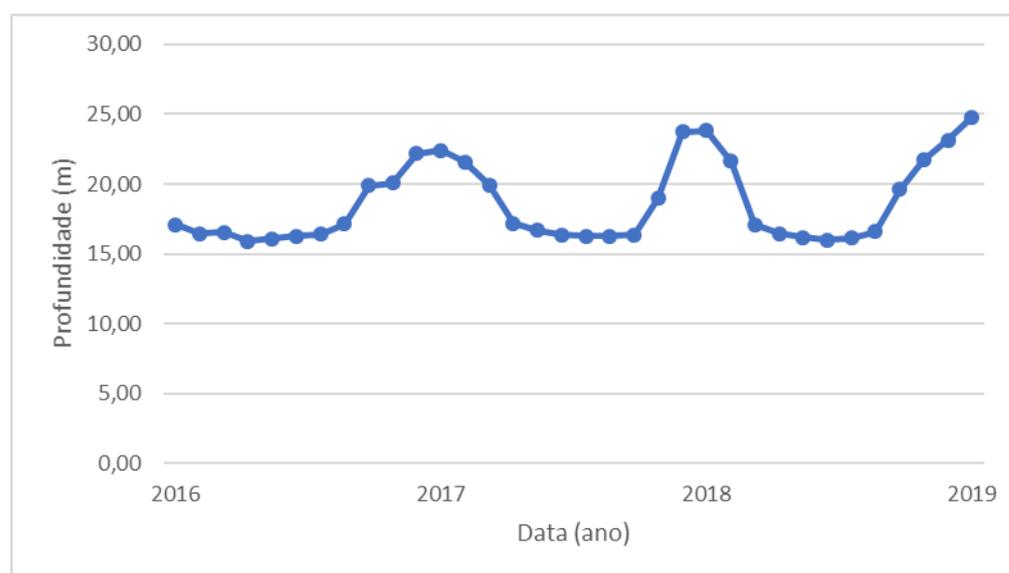


Figura 3 - Comportamento dos valores de profundidade recuperados da estação virtual S3A-338 elaborada através de valores obtidos pela subtração do valor das cotas a cada passagem do satélite pelo coeficiente Z_0 da curva chave. Elaboração: Thiago Oliveira dos Santos, 2020.

A profundidade mínima encontrada na estação virtual (EV-338-S3A) foi de 15,93 m juntamente com a profundidade máxima de 24,78 m. A amplitude encontrada foi de 8,85 m. A (figura 6) representa os parâmetros estimados pela curva chave elaborada com dados do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB e Altimetria Espacial – satélite Sentinel 3A com o recorte temporal de 2014 a 2020.

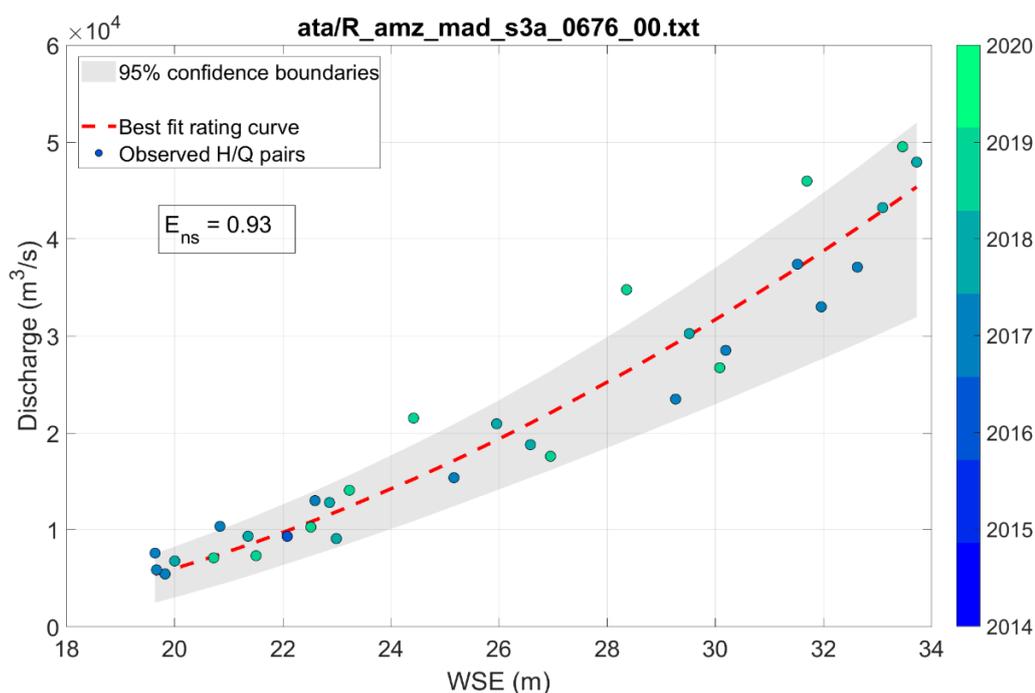


Figura 4 - Relação entre descarga (MGB-IPH) e cota altimétrica (S3A) no rio Madeira. *Elaboração: Adrien Paris, 2020.*

O tracejado na cor vermelha mostra o padrão de elevações da água em relação aos pares de vazão com o melhor ajuste da curva chave. O percentual de confiança é de 95%. Os valores podem ser explicados pela geometria da seção. É possível identificar a existência de uma certa uniformidade no conjunto de dados, o que indica um bom ajuste da curva chave. A utilização da metodologia de elaboração da curva chave com dados de modelagem (MGB) e altimetria espacial (S3A), pode ser aplicada em diversos corpos hídricos conforme indica o estudo desenvolvido por Paris et al., (2016). Também é possível aplicar essa metodologia em qualquer série temporal altimétrica, independente da missão.

É importante ressaltar que os valores de cota representados na (tabela 2) não contam com a subtração pelo coeficiente Z_0 (13,788) da curva chave nas passagens do satélite na estação virtual (EV-338-S3A). A (tabela 2) apresenta os valores de cota média/profundidade e desvio padrão dos dados analisados (altimetria/*in-situ*).

Tabela 2 - Valores de comparação entre dados de cota da estação virtual (Ev-338-S3A) com os dados de profundidade (*in situ*) obtidos pela batimetria da área de estudo. *Elaboração: Thiago Oliveira dos Santos, 2020.*

Tipo do dado	Cota/Profundidade (m)	Desvio Padrão/Cota (m)
EV-338-S3A (cota altimétrica)	32,40 m	2,85 m
<i>In situ</i> (profundidade)	12,05 m	6,94 m

É importante ressaltar que o volume de dados utilizados para obtenção da cota altimétrica, profundidade e desvio padrão são desiguais devido a sua diferente forma de obtenção. Os dados altimétricos são obtidos pela passagem a cada 27 dias do satélite Sentinel 3A enquanto que a batimetria da área de estudo é feita de maneira altamente detalhada extraindo dados de profundidade

de vários pontos da área da seção estudada. Essa diferença acabou gerando uma certa disparidade em relação ao volume de dados de cota (altimetria) e profundidade (*in situ*), sendo que, os dados da batimetria estão em maior quantidade. Podemos até certo ponto, afirmar que essa diferença pode ter alterado os valores encontrados para média e desvio padrão.

Para verificar a uniformidade do conjunto de dados de cota e profundidade (altimetria/*in situ*) foi calculado o desvio padrão. É possível observar que os valores (tabela 2) são distantes, tendo uma diferença de 4,09 m em termos de amplitude dentro do conjunto de dados. Isso indica que o conjunto de dados analisados referentes à cota altimétrica são mais homogêneos em relação aos dados *in situ*. Porém, é quando delimitamos um pouco mais a área de análise com o objetivo de igualar o número de observações de dados de cota altimétrica com os de batimetria, é que se torna possível com um nível maior de confiança, a comparação entre os dois conjuntos de dados. A variação percentual encontrada entre os dados de cota estimada pela altimetria comparados com os dados de profundidade obtidos pela batimetria foi de 62,8%. A (figura 7) representa o cotograma comparativo entre os dados de profundidade estimados pela curva chave com os dados de profundidade obtidos pela batimetria. A análise feita na (figura 7) conta com os valores de profundidade estimados com o auxílio do Z_0 (13,788) da curva chave em comparação com os dados de profundidade *in-situ* (batimetria).

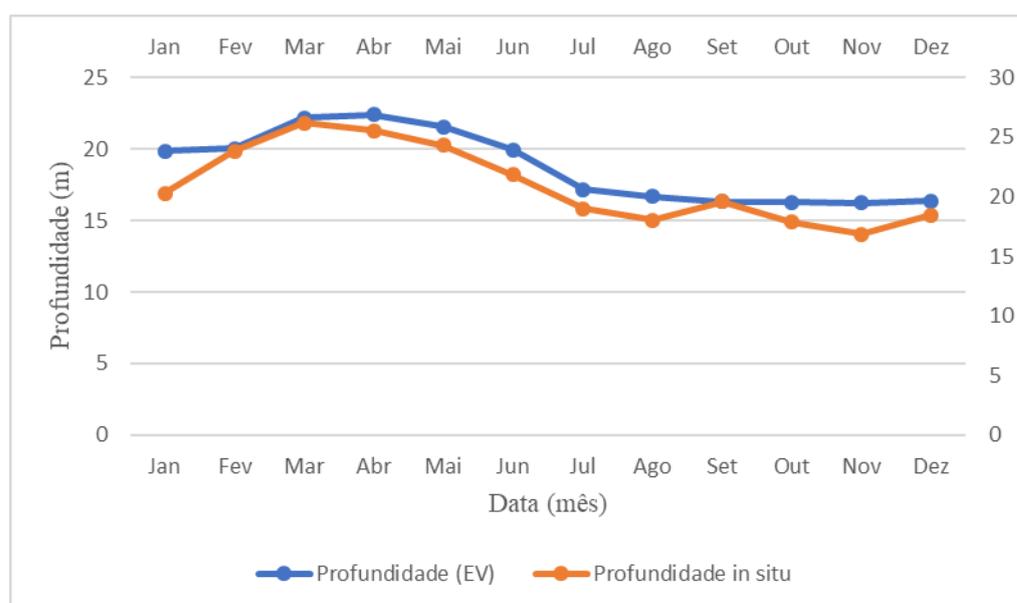


Figura 5 - Cotograma comparativo entre dados de profundidade estimados pela curva chave com base nos dados da (EV-338-S3A) com os dados de profundidade provenientes da batimetria realizada na área de estudo. Elaboração: Thiago Oliveira dos Santos, 2020.

Com base na análise do cotograma da (figura 7) é possível identificar um padrão de comportamento semelhante em relação aos dados de profundidade estimados pela curva chave com os dados de profundidade obtidos pela batimetria. A seleção de dados mais próximos ao traço do satélite, ou seja, a passagem do satélite, possibilitou que a comparação ocorresse de maneira mais restrita, uma vez que, a quantidade de dados de profundidade obtidos pela batimetria tem um número superior ao número de observações feitas pelo satélite. O satélite Sentinel 3A conta com um tempo de revisita de 27 dias, fornecendo um total de 12 medidas mensais de cota altimétrica.

A batimetria realizada na área de estudo foi feita durante o ano de 2017, o que tornou necessário a utilização de apenas um ano de medidas de cotas altimétricas transformadas em

profundidade com o auxílio do Z_0 (13,788) da curva chave. A (tabela 3) representa a organização desses valores de análise e comparação.

Tabela 3 - Organização de dados comparativos entre profundidade estimada pela curva chave e dados de profundidade *in situ* com seus respectivos valores com base no ano de 2017. Elaboração: Thiago Oliveira dos Santos, 2020.

Organização dos valores	Profundidade (m)	Desvio padrão	Profundidade mínima (m)	Profundidade máxima (m)	Amplitude (m)
EV-338-S3A	18,76	2,49	16,25	22,41	6,16
In situ	19,93	3,25	16,85	26,19	9,34

Com base na análise do cotograma (figura 7) e na (tabela 3) é possível notar que existe uma leve diferença entre os valores apresentados na (tabela 3). É fundamental realizar um comparativo com os valores exibidos na (tabela 2), onde os dados analisados tiveram uma determinada diferença em termos de quantidade, uma vez que, os valores identificados na (tabela 2) foram obtidos com base na análise do recorte temporal completo da estação virtual (2016 a 2019) e de todos os dados de profundidade obtidos pela batimetria. Esse cenário tornou possível a identificação da disparidade existente e conseqüentemente apontou para a necessidade da realização de uma seleção de dados de profundidade (*in situ*) com maior aproximação da localização da estação virtual utilizada no estudo.

Desta forma foi elaborado o cotograma (figura 7) e a (tabela 3), onde é possível identificar e analisar as diferenças existentes entre os valores de profundidade estimados pela curva chave e os valores de profundidade (*in situ*). Com a utilização de dados consistidos e apenas dados de profundidade próximos a área de passagem do satélite, os valores de média e desvio padrão são mais próximos quando comparados aos exibidos na (tabela 2). Os valores estão próximos, o que indica que, os dados (MGB/Altimetria Espacial) utilizados para obter a curva chave e conseqüentemente adquirir os valores de profundidade a cada passagem do satélite da (EV-338-S3A), são compatíveis com os dados de profundidade obtidos em campo por embarcações equipadas para realização de batimetria. Os valores encontrados no desvio padrão calculado na (tabela 3), indicam a homogeneidade do conjunto de dados. Com base nesse panorama é possível afirmar que os dados de profundidade estimados pela curva chave indicam uma homogeneidade superior aos dados de profundidade (*in situ*). A diferença entre os dados de profundidade estimados pela curva chave (MGB/Altimetria Espacial) e (*in situ*) relacionados aos valores de profundidade média foi de 1,17m. Já quando comparamos os valores encontrados relacionados ao desvio padrão, identificamos uma diferença de 0,76 cm.

A diferença existente entre a profundidade mínima e máxima foi de 0,6 cm (mínima) e 3,78 m (máxima). A variação percentual entre os dados de profundidade estimados pela curva chave, comparados com os dados de profundidade obtidos pela batimetria foi de (- 6,2%). O valor negativo foi gerado devido o padrão de análise seguir a ordem (altimetria x *In-situ*) e no caso em questão, o valor estimado pela altimetria é menor, o que gerou uma variação percentual negativa. Por último, a diferença relacionada a amplitude ficou na faixa de 3,18 m.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A validação dos dados de profundidade foi realizada utilizando dados *in situ* oriundos da batimetria da área de estudo (proximidade de Manicoré) realizada pelo Serviço de Sinalização Náutica - SSN-9 da Marinha do Brasil, como forma de contribuir com a produção de informações para o monitoramento hidrológico na região da Bacia do rio Madeira, impactando de maneira positiva na

gestão de recursos hídricos na bacia Amazônica.

A utilização de dados altimétricos oriundos do satélite Sentinel 3A e do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB tem sido amplamente utilizada para produzir estudos hidrológicos em bacias hidrográficas, unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH. Um alto número de estações virtuais elaboradas na bacia Amazônica, já passaram pelo processo de validação, indicando assim, um caminho seguro para análise de longas séries históricas de dados. O mesmo é possível dizer sobre o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB, validado e publicado por Paiva et al., (2013).

Esse cenário tornou viável a utilização dos dados de (Modelagem/Altimetria Espacial) confiáveis e aplicáveis dentro da proposta do estudo. Durante o desenvolvimento do estudo alguns problemas técnicos acabaram ocorrendo, sendo necessário a aplicação de algumas medidas para corrigi-los. O problema com a localização geográfica da área de estudo e a baixa disponibilidade de dados, fez com que fosse necessário reduzir o número de missões altimétricas que seriam utilizadas no estudo. Desta forma, foi utilizado somente o satélite Sentinel 3A com o seu respectivo traço 338, onde foi elaborada a estação virtual (EV-338-S3A), com um recorte temporal de (2016 a 2019). As vazões simuladas pelo Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB foram obtidas com base na localização da área de estudo, uma vez que, os dados de vazão *in situ* apresentaram baixa disponibilidade e consistência.

Por intermédio da associação entre os dados de cota e vazão com dados de (Modelagem/Altimetria espacial) foi elaborada a curva chave com os seguintes valores de saída coeficiente A (250,074); coeficiente B (1,738) e o Coeficiente Z_0 (13,788). As vazões simuladas no MGB produziram resultados consistentes e aplicáveis para o estudo, o que tornou desnecessário a calibração do modelo. O percentual de confiança apresentado pela curva chave foi de (95%). Os valores podem ser explicados pela geometria da seção. Foi possível identificar a existência de uma uniformidade no conjunto de dados o que indica um bom ajuste da curva chave. A utilização da metodologia de elaboração da curva chave com dados de (Modelagem/Altimetria Espacial) pode ser aplicada em diversos corpos hídricos.

O valor do coeficiente Z_0 (13,788) foi utilizado para obter os valores de profundidade pela curva chave. O valor de profundidade foi obtido pela média da série temporal completa (2016 a 2019) onde foi encontrado o valor de 18,62 m. O coeficiente Z_0 (13,788) também foi utilizado para obter o valor de profundidade pela curva chave a cada passagem do satélite durante toda a série temporal.

Os dados *in situ* apresentaram um alto volume de medidas de profundidade ao longo da batimetria realizada na área de estudo. Foi necessário realizar o tratamento dos dados para uma melhor visualização espacial e temporal. A análise dos dados de profundidade pela curva chave com os dados *in situ* ocorreram em dois momentos. No primeiro momento, foi realizada uma comparação com base em todos os dados de profundidade *in situ* com os dados de profundidade gerados pela curva chave. Essa comparação indicou uma grande distância em termos de valores de (média e desvio padrão) conforme foi indicado na (tabela 2). Porém, quando foi realizada uma comparação com o tratamento/consistência e delimitação dos dados de profundidade *in situ* o mais próximo possível da área da estação virtual (EV-338-S3A), os valores apresentaram um leve ajuste. É preciso ressaltar que o ano utilizado para fazer essa análise foi (2017), tanto para série temporal altimétrica, quanto para os dados *in situ*. A diferença entre os dados de (Modelagem/Altimetria Espacial) e (*in situ*) relacionados a profundidade média foi de 1,17m. Já quando comparamos os valores encontrados relacionados ao desvio padrão, identificamos uma diferença de 0,76 cm. A diferença existente entre a profundidade mínima e máxima foi de 0,6 cm - (mínima) e 3,78 m - (máxima). Por último, a diferença relacionada a amplitude ficou na faixa de 3,18 m.

Por fim, a metodologia proposta fornece resultados satisfatórios apesar de apresentar uma leve disparidade entre os dados de profundidade obtidos pela curva chave elaborada com dados de (Modelagem/Altimetria Espacial) e os dados de profundidade obtidos por batimetria. É possível que essa disparidade possa ter sido causada pela diferença do volume de dados gerados pela curva chave

quando comparado ao alto volume de dados gerados pela batimetria. Tal cenário pode ser mitigado por um novo tratamento/consistência no conjunto de dados de batimetria. Desta forma é possível concluir que a metodologia proposta pode ser aplicada em outros corpos hídricos, tornando-se uma importante ferramenta de gestão de recursos hídricos e monitoramento hidrológico na bacia Amazônica.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é parte da Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação – Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – Profªgua, polo da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Os autores agradecem a Agência Nacional de Águas (ANA) e ao *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère* (CTHO) do *Laboratoire d'Études en Géophysique et d'Océanographie Spatiales* (LEGOS), pelos *Geophysical Data Records* (GDRs) e as correções troposféricas correspondentes, a *European Space Agency* (ESA) pela garantia do uso dos dados da missão Sentinel 3A disponibilizados para o estudo. Ao Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHASA-UEA) por disponibilizar os computadores para o tratamento dos dados e elaboração das estações virtuais. A Marinha do Brasil pela disponibilidade dos dados da batimetria realizada na área de estudo. O primeiro autor agradece a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pela concessão da bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

- ALSDORF, D. E.; BIRKETT, C. M.; DUNNE, T.; MELACK, J.; HESS, L. Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. **Geophysical Research Letters**. v. 28, n. 14, p. 2671-2674, 2001a.
- ARAGÃO, L.; MALHI, Y.; CUESTA, R.M.R.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L.O.; SHIMABUKURO, Y.E. Spatial patterns and fire response of recente Amazonian Droughts. **Geophysical Research Letters**. v. 34, p. 07701, 2007.
- BORMA, L. S.; TOMASELLA, J.; ROBALLO, S. T.; CUARTAS, L. A.; RODRIGUES, D. A.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Impactos dos eventos extremos de seca e cheia sobre os recursos hídricos amazônicos e ações da Defesa Civil. In: BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 209-242. ISBN 978-85-7975-078-6.
- CHEN, J. L.; WILSON, C. R.; TAPLEY, B. D.; YANG, Z. L.; NIU, G.Y. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. **Journal of Geophysical Research**. v. 114, 2009.
- CHEN, J.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D. The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. **Water Resources Research**. v. 46, p. W12526, 2010.
- DAMASCENO, J.A. **Monitoramento hidrológico da bacia do rio madeira por altimetria espacial**. 2017. 113f. Dissertação (mestrado em clima e ambiente) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, INPA, Manaus, 2017.
- ESPINOZA JC.; RONCHAIL J.; FRAPPART F.; LAVADO W.; SANTINI W.; GUYOT JL. The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970 – 2012 period: A focus on the 2012 flood. 2013 **Journal of Hydrometeorology**. 14, 1000-1008. doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.
- ESPINOZA, J. C. V.; LAVADO, W.; ORDONEZ, J. J.; FRAIZY, P.; GUYOT, J. L.; RONCHAIL, J.; VAUCHEL, P.; COCHONNEAU, G. FILIZOLA, N.; LABAT, DAVID.; OLIVEIRA, EURIDES. Evolución regional de los caudales em el conjunto de La cuenca Del Amazonas para el período de 1974-2004 y su relación com factores climáticos. **Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA**. (1), 66-89, 2009.

ESPINOZA, J. C.; GUYOT, J. L.; RONCHAIL, J.; COCHENEAU, G.; FILIZOLA, N.; FRAIZY, P.; LABAT, D.; DE OLIVEIRA, E.; ORDONEZ, J. J.; VAUCHEL, P. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin. **Journal. Hydrology**. v. 375, p. 297-311, 2009.

ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L.; JUNQUAS, C.; VAUCHEL, P.; LAVADO, W.; DRAPEAU, G.; POMBOSA, R. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): understanding the exceptional 2010 drought. **Geophys**. v. 38, n. 13, 2011.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over Central and Western Tropical South America. **Climanalise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. v. 5 n. 6, p. 36-45, 1990.

FRAPPART, F. ; PAPA, F. ; SILVA, J.S. ; RAMILLIEN, G. ; PRIGENT, C. ; SEYLER, F. ; CALMANT, S. Surface Freshwater Storage and Dynamics in the Amazon Basin during the 2005 Exceptional drought. **Environmental Research Letters**. n. 7, p. 1-7, 2012.

GOULDING, M. ; BARTHEM, R.B. ; FERREIRA, E. **The Smithsonian Atlas of the Amazon**. Washington : Smithsonian Books, 2003.

GUYOT, J.; LOUP. Le bassin du Rio Madeira à Villabella. In: Hydrogéochimie des fleuves de L'Amazonie Bolivienne. Editions de l'Ortom. **Collection Études et Thèses.Paris**, 1993(p.39-48).

GUYOT, J.L.; CALLEDE, J.; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E. Lavariabilidade 490 hydrologique actualledans le bassin de l'Amazone. **Bulletin de l'Institut Français 491 d'EtudesAndines**. v. 27, n. 3, p. 779-788, 1998.

JACCON, G.; CUDO, K.J. **Hidrologia curva-chave análise e traçado**. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. DNAEE/CNPQ/ORSTOM, 1989.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, F. I. The drought of Amazônia in 2005. **Journal of Climate**. v. 21, p. 495-516, 2008.

MARENGO, J. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. **International Journal of Climatology**. V. 12, N. 8, p. 853-863, 1992.

MARENGO, J.; ALVES, L.M.; BESERA, E.A.; LACERDA, F.F. Variabilidade e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro. **Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas**. ISBN: 978-85-64265-01-01, 2011.

MARENGO, J.A. ; UVO, C.B. Variabilidade e mudança climatica no Brasil e Amaerica do Sul. **Climanalise**. p. 1-4, 1996.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A. Clima da região amazônica. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; JUSTI DA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009.

MEADE, R.H.; RAYOL, J.M.; DA CONCEIÇÃO, S.C.; NATIVIDADE, J.R.G. Backwater effects in the Amazon river basin of Brazil. **Environmental Geology and Water Sciences**. v. 18, n. 2, p. 105-114, 1991.

MOLINIER, M. **Régionalisation des débits du bassin amazonien: premiers résultats**. VIII JOURNÉES HYDROLOGIQUES – Orstom, 1995.

MOLINIER, M.; GUYOT, J. L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V. **Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement** (ACTES DE LA CONFÉRENCE DE PARIS mai 1995). IAHS Publ. no. 238, 1996.

MOLINIER, M.; GUYOT, J.L.; CALLEDE, J.; MAURICE, L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V.; CORTEZ, J. **Hydrologie du bassin Amazonien**. In: Théry, H. **Evioronnenmental et développement em Amazonie brésilienne**. Paris: Editions Belin, p. 24-41, 1997.

MOLION, L.C.B. A Amazônia e o clima da terra. **Revista Ciência Hoje**. v. 8, n. 48, p. 42-46, 1998.

MUNIZ, L. S.; FILIZOLA, N.P.; ALVES, C. S. **Análise multitemporal da variabilidade de cotas fluviométricas do rio Madeira - uma avaliação de danos sob extremas condições hidrológicas** - Brasil. In: Anais do XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguacu - Paraná 13 a 18/04/2013 / São José dos Campos, SP :

MCT/INPE, 2013. Internet ISBN: 978-85-17-00065-2 Organização Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. . <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/indexaut.htm#letraL>>

PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; BONNET M.P.; BUARQUE, D.C.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C.B. Large scale hydrologic and hydrodynamic modelling of the Amazon River basin. **Water Resour.** v. 49, p. 1226-1243, 2013.

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

RONCHAIL, J.; LABAT, D.; CALLÈDE, J.; COCHONNEAU, G.; GUYOT, J.L.; FILIZOLA, N.; OLIVEIRA, E. Discharge variability within the Amazon basin. Regional Hydrological Impacts of Climatic Changes – Hydroclimatic Variability. **IAHS.** n. 296, p. 21-30, 2005.

SANT'ANNA, L. **O maior rio do Mundo.** In: Amazônia – Ainda é possível salvar? Grandes Reportagens de O Estado de São Paulo. 12 – 13. Nov. / Dez. 2007.

SEILER, C.; HUTJES, W.R.; KABAT, P. 2013. Climate variability and trends in Bolivia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 52, 130–146. doi:10.1175/JAMC-D-12-0105.1.

SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F. Variabilidade espacial do nível d'água na bacia Amazônica durante eventos extremos. In: BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia: causas e consequências.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 209-242. ISBN 978-85-7975-078-6.

SILVA, J.S. **Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações Hidrológicas.** Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. ISBN: 978-613-1-52979-5, 2010.

SIQUEIRA, V.A. ; PAIVA, R.C.D. ; FLEISCHMANN, A.S. ; FAN, F.M. ; RUHOFF, A.L. ; PONTES, P.R.M. ; PARIS, A. ; CALMANT, S. ; COLLISCHONN, W. Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in south America. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions.** <https://doi.org/10.5194/hess-2018-225>, 2018.

VILLAR, J.C.E.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L.; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N.; LAVADO, W.; DE OLIVEIRA, E.; POMBOSA, R.; VAUCHEL, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology.** v. 29, n. 11, p. 1.574-1.594, 2009.

ZENG, N.; YOON, J.H.; MARENGO, J.A.; SUBRAMANI, A.; NOBRE, C.A.; BIRKETT, C.M. Cause and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters.** v. 3, n. 014002, 2008.