APLICAÇÃO DA ALTIMETRIA ESPACIAL NA AMAZÔNIA

Joecila Santos da Silva [1] ; Abdel Karim Nidal [2]& Laila Yasmin Bitar Cunha [3]

RESUMO – A bacia hidrográfica amazônica, reconhecida como a maior do planeta, apresenta elevada complexidade hidrológica, marcada por extensas planícies de inundação, forte sazonalidade e grande variabilidade espacial dos níveis d'água. O monitoramento convencional, baseado em estações fluviométricas in situ, enfrenta limitações significativas devido à dimensão territorial, à baixa densidade da rede observacional, à cobertura florestal e às dificuldades logísticas de acesso. Nesse contexto, a altimetria espacial consolidou-se como uma abordagem estratégica para investigar a dinâmica hidrológica amazônica, ampliando a capacidade de observação dos rios, lagos e áreas inundáveis. Este estudo aborda as aplicações de sensores altimétricos orbitais na Amazônia, desde missões pioneiras, como Topex/Poseidon, até sistemas contemporâneos, como Jason-3, Sentinel-3 e SWOT. São discutidos os procedimentos de calibração e validação dos dados por meio de Estações Virtuais, bem como os desafios associados à contaminação dos ecos em corpos hídricos estreitos, margens complexas e ambientes sob influência do dossel florestal. A literatura evidencia que a altimetria espacial contribui para estimativas de níveis d'água, modelagem de vazões, monitoramento de cheias e secas extremas e avaliação do armazenamento hídrico superficial, fortalecendo a gestão sustentável dos recursos hídricos amazônicos.

ABSTRACT– The Amazon River Basin, recognized as the largest in the world, exhibits high hydrological complexity, characterized by extensive floodplains, strong seasonality, and substantial spatial variability in water levels. Conventional monitoring, based on in situ gauging stations, faces significant limitations due to the basin's vast territorial extent, the low density of the observational network, dense forest cover, and logistical constraints on field access. In this context, satellite altimetry has become a strategic approach for investigating Amazonian hydrological dynamics, expanding the capacity to observe rivers, lakes, and flood-prone areas. This study addresses the application of radar altimetric sensors in the Amazon, ranging from pioneering missions such as Topex/Poseidon to contemporary systems such as Jason-3, Sentinel-3, and SWOT. It discusses data calibration and validation procedures through Virtual Stations, as well as the methodological challenges associated with waveform contamination in narrow water bodies, complex river margins, and environments influenced by forest canopy. The literature demonstrates that satellite altimetry contributes to water-level estimation, discharge modeling, monitoring of extreme floods and droughts, and assessment of surface water storage, thereby strengthening the sustainable management of Amazonian water resources.

Palavras-Chave – Altimetria Espacial. Hidrometria. Monitoramento de Rios.

[1]) Universidade do Estado do Amazonas, Av. Darcy Vargas, 1200, Bloco D - Parque 10 - CEP 69050-020, Manaus-AM, Brasil. Fone: (92) 98120-8998. E-mail: jsdsilva@uea.edu.br
[2]) Universidade do Estado do Amazonas, Av. Darcy Vargas, 1200, Bloco D - Parque 10 - CEP 69050-020, Manaus-AM, Brasil. Fone: (92) 99197-0191. E-mail: aknmaka.eng21@uea.edu.br
[3]) Universidade do Estado do Amazonas, Av. Darcy Vargas, 1200, Bloco D - Parque 10 - CEP 69050-020, Manaus-AM, Brasil. Fone: (92) 99442-4730. E-mail: lybc.eng22@uea.edu.br

INTRODUÇÃO

A Região Amazônica abriga o ecossistema de água doce mais extenso e complexo do globo terrestre, drenando uma área superior a 6 milhões de quilômetros quadrados. O rio Amazonas e seus macro-tributários (como os rios Negro, Solimões, Madeira, Tapajós e Purus) são caracterizados por um regime hidrológico pulsante — conhecido como "pulso de inundação" —, onde a amplitude sazonal das águas pode superar 18 metros em determinadas regiões. A quantificação precisa desse volume hídrico e a variação espacial do nível dos rios são vitais para o entendimento dos ciclos biogeoquímicos globais, a conservação da biodiversidade, o transporte hidroviário e a segurança socioeconômica das populações ribeirinhas [1].

Historicamente, o monitoramento dos níveis fluviais na Amazônia tem dependido de redes de estações fluviométricas *in situ*, operadas por órgãos nacionais como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) no Brasil [2]. No entanto, a densidade dessas redes de monitoramento é criticamente baixa em relação à imensidão da bacia. Instalar e manter réguas linimétricas em áreas remotas da floresta tropical envolve custos operacionais astronômicos, além de limitações físicas de acesso. Adicionalmente, as estações físicas fornecem dados pontuais, incapazes de capturar a complexa variabilidade espacial das planícies de inundação (várzeas).

Neste panorama de escassez de dados hidrológicos, o desenvolvimento da Hidrologia Espacial passou a desempenhar um papel revolucionário. Originalmente concebida para mapear a topografia dos oceanos nos anos 1970, a altimetria espacial por radar estendeu com sucesso seu escopo para as águas continentais a partir da década de 1990. Satélites equipados com radares altímetros e, mais recentemente, a laser, enviam pulsos eletromagnéticos em direção à superfície da Terra e medem o tempo de viagem de ida e volta do sinal, permitindo calcular a distância entre o satélite e a superfície da água com precisão centimétrica [3].

A transição da aplicação oceânica para a continental impôs desafios severos à comunidade científica, especialmente na Amazônia. Diferente da superfície oceânica homogênea, o ambiente fluvial apresenta transições abruptas entre terra, floresta densa, praias arenosas e superfícies aquáticas de larguras variadas. Esses fatores causam a distorção dos ecos de retorno, demandando algoritmos sofisticados de reprocessamento de sinal (*retracking*) [4].

A evolução tecnológica contínua das missões espaciais — migrando dos radares de pulso limitado convencionais para os radares de abertura sintética (SAR) e interferométricos — tem superado essas barreiras, permitindo o imageamento de corpos hídricos cada vez menores. Assim, o presente artigo tem como objetivo analisar a aplicação da altimetria espacial na bacia amazônica,

mapeando suas metodologias, ferramentas de validação, principais resultados científicos alcançados e as perspectivas para o futuro do monitoramento hidrológico da maior floresta tropical do mundo.

AS MISSÕES ALTIMÉTRICAS

Para o monitoramento da Amazônia, diferentes missões altimétricas são utilizadas, divididas essencialmente por suas características orbitais (período de revisita e espaçamento de trajetórias) e tecnologia de sensor [5]:

1. Topex/Poseidon (1992–2005) & Jason-1/2/3 (2001–Presente): Desenvolvidas em parceria pela NASA e CNES, possuem um período de revisita curto (aproximadamente 10 dias), o que oferece excelente resolução temporal para capturar a dinâmica de subida e descida dos rios amazônicos. O espaçamento entre as órbitas (*tracks*), contudo, é amplo (cerca de 315 km no equador), limitando o número de rios interceptados.

2. ERS-1/2 (1991–2003), ENVISAT (2002–2012) e SARAL/AltiKa (2013–2021): Configurados com um período de revisita de 35 dias. Embora a resolução temporal seja menor, o espaçamento entre órbitas cai para cerca de 80 km na linha do equador, interceptando uma quantidade significativamente maior de rios de médio e pequeno porte na Amazônia. O SARAL/AltiKa destacou-se por operar na banda Ka, que possui menor faixa imageada (*footprint*) no solo e maior precisão.

3. Sentinel-3A e 3B (2016–Presente): Operados pela Agência Espacial Europeia (ESA), utilizam o Altimetro de Radar SAR (SRAL). A tecnologia SAR reduz substancialmente a faixa imageada do satélite ao longo da área de cobertura, permitindo monitorar rios estreitos (com larguras inferiores a 20 metros) na Amazônia Central.

4. ICESat e ICESat-2 (2003–Presente): Altimetria baseada em laser (Lidar). O ICESat-2 utiliza o sensor ATLAS, que emite múltiplos feixes verdes (532 nm) com uma faixa imageada de apenas 11 metros no solo, oferecendo um detalhamento topográfico sem precedentes das margens e dos rios amazônicos, embora com longos períodos de revisita.

5. SWOT (Surface Water and Ocean Topography - 2022–Presente): Representa a última fronteira tecnológica. Utilizando a interferometria de radar em banda Ka (KaRIn), o SWOT não realiza apenas uma medição pontual abaixo do satélite, mas produz um imageamento bidimensional (swath) de 120 km de largura, sendo capaz de mensurar o nível, o gradiente de declividade e o armazenamento de água de rios e planícies inundadas em quase toda a Amazônia de forma simultânea.

PRINCÍPIO FÍSICO DA MEDIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS

Os radares altimétricos instalados a bordo de diferentes missões altimétricas emitem uma onda na direção do nadir, definida pela vertical em relação ao solo. No retorno, o radar recebe o eco refletido pela superfície da água. A análise do eco permite extrair uma medida do tempo de trajeto

entre o satélite e a superfície da água (Figura 1). No curso do seu trajeto de ida e volta que separa o satélite da superfície terrestre, a radiação radioelétrica emitida pelo altímetro, refletida em seguida pela superfície da água, atravessa a atmosfera da Terra sendo retardada pelo conteúdo gasoso ou eletrônico das diferentes camadas atmosféricas encontradas. Para uma boa precisão da medida altimétrica, necessitam-se corrigir os erros introduzidos por esses efeitos, que podem se traduzir num alongamento da distância ao solo de vários metros [3].

O tempo de emissão e retorno da onda é transformado em distância considerando-se a velocidade de propagação, no vácuo, das ondas eletromagnéticas emitidas. O nível da superfície da água, *h*, deduzidos da medida altimétrica, é obtido pela diferença entre a órbita do satélite, *H*, em relação a um elipsoide de referência e a distância entre o satélite e a superfície da água ($c\Delta t/2 - \Sigma cor$) (Equação 1).

$$h = H - (c\,\Delta t/2 - \Sigma cor) - N \qquad (1)$$

sendo *c* a velocidade da luz no vácuo, Δt o tempo de emissão e retorno da onda eletromagnética, Σcor as correções instrumentais, ambientais e geofísicas e *N*, a ondulação geoidal que faz a conversão das alturas elipsoidais em alturas geoidais, ditas cotas altimétricas [6].

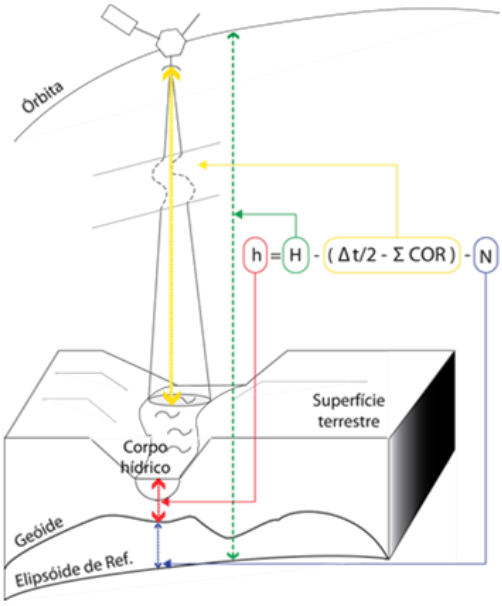


Figura 1 - Princípio da medida por radar altimétrico em hidrossistemas continentais.

ESTAÇÃO VIRTUAL

Os rios, geralmente, não são monitorados pelos satélites altimétricos ao longo do seu curso. Em vez disso, são atravessados em determinados pontos. Assim, cada interseção de um traço do satélite altimétrico com a superfície reflexiva do plano de água consiste numa estação virtual (EV), sendo potencialmente possível obter uma série temporal da superfície da água [7,8]. É como se existisse uma estação hidrográfica no ponto onde, em média, o satélite atravessa o curso de água. Estas medidas

podem ser, depois, utilizadas em estudos hidrológicos de forma similar às observações *in situ*, salvo o facto de não se conhecer com precisão a profundidade do curso de água neste ponto, assim, trabalha-se mais com base nas variações da superfície da água do que na profundidade.

Os grandes lagos e mares interiores, como assemelham-se às condições oceânicas, apresentam condições análogas de aquisição das medidas altimétricas, com superfícies da água extensas, considerando pontos suficientemente afastados das margens e dos relevos circundantes. Nos rios, várzeas e zonas úmidas o sinal é mais complexo devido à heterogeneidade das superfícies observadas, sendo refletido por uma mistura de superfícies de diferentes tipos e com refletividades discrepantes, como cursos de água, florestas, pântanos, entre outros. Isso afeta significativamente a forma do eco refletido, e, em consequência, a capacidade de extrair a informação pretendida, em particular a medida de distância, resultando em medições menos precisas, necessitando de um tratamento mais aprimorado na seleção dos dados altimétricos nessas áreas [4].

Buscando uma alternativa para solucionar tais problemas, foi desenvolvida e testada uma metodologia manual para criação das EVs [7,8], pela seleção dos dados correspondentes ao cruzamento do plano da superfície da água, adaptadas às variações no tempo e no espaço, permitindo uma seleção tridimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade (Figura 2) utilizando-se os programas *Google Earth* [9] e *Multi-mission Altimetry Processing Software* (MAPS) [10].

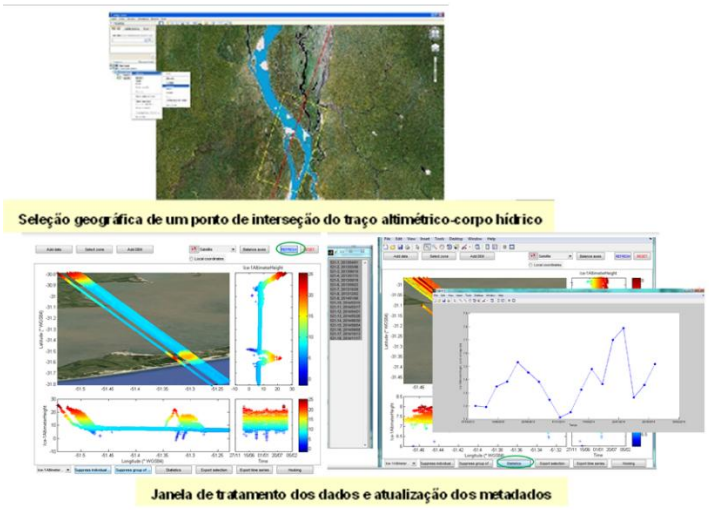


Figura 2 – Exemplo da elaboração de uma estação virtual.

O portal eletrônico *Hydroweb-Theia* (https://hydroweb.next.theia-land.fr/) é fruto de uma cooperação de diversas instituições francesas de pesquisa, entre elas o *Centre National d`Études Spatiales* (CNES) e o *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD). A Universidade do Estado do Amazonas (UEA), por meio do Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHASA) colabora com esta plataforma através de diversos projetos de pesquisa. No

Hydroweb-Theia estão disponíveis 11 336 séries temporais contínuas e de longa duração provenientes de EVs em rios do mundo, em todos os continentes e 124 grandes lagos (Figura 3). As informações no portal eletrônico são constantemente atualizadas com no máximo em um dia e meio após a disponibilização de uma nova medição altimétrica.

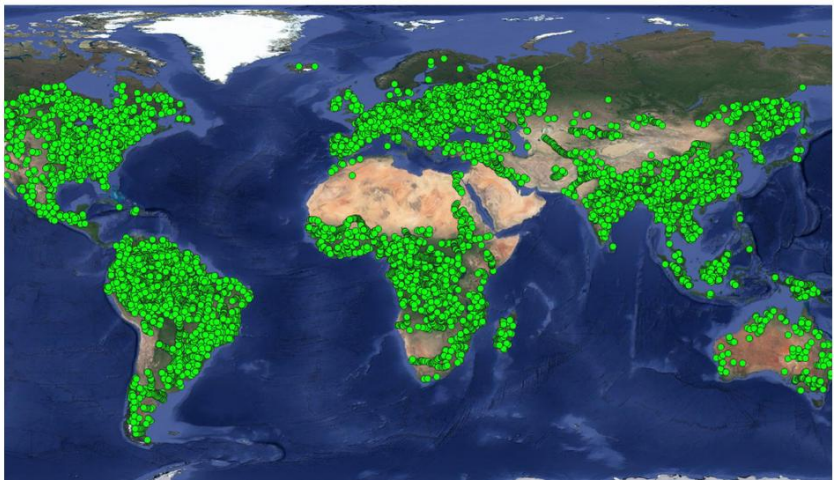


Figura 3 – Séries altimétricas disponíveis no Hydroweb (Fonte: https://www.theia-land.fr/en/product/water-levels-of-rivers-and-lakes-hydroweb/, acesso em: 07 jun 2026).

PRINCIPAIS APLICAÇÕES DA ALTIMETRIA ESPACIAL NA HIDROLOGIA

No início dos anos 70, os satélites começaram a transmitir regularmente os dados sobre a física, à química e a dinâmica das terras continentais, da atmosfera e da biosfera. O GEOS-3 (*Geodynamics Experimental Oceano Satellite*) foi o primeiro satélite dedicado ao mapeamento oceânico, mas ainda assim, alguns autores utilizaram seu radar altimétrico para mapeamento territorial e monitoramento de águas continentais. Miller [12] mostra que os dados GEOS-3 poderiam ser usados para monitorar a SUPERFÍCIE DA ÁGUA dos lagos. Desses estudos pioneiros, destacam-se três eixos principais:

O primeiro eixo de aplicações diz respeito ao monitoramento dos recursos hídricos em relação ao clima e a agricultura. Os estudos nesta linha são numerosos, com sua maioria conduzido em grandes lagos, com extensa revisão da altimetria espacial sobre o tema [13]. O primeiro estudo sobre um sistema fluvial foi realizado com os algoritmos de formas de onda (AFO) do GEOSAT (*GEOdetic SATellite*), cuja discrepância entre os dados do satélite e in situ resultaram em variações de RMS da ordem de 19 e 109 cm, em quatro locais na Amazônia [14]. Atribuiu-se as incertezas parcialmente à determinação da órbita, mas também, aos registros das réguas in situ, esse assunto será abordado no próximo eixo de estudos. Os dados altimétricos do satélite Topex/Poséidon, lançado em 1992 com período de revisita de 10 dias, foram utilizados em diversos estudos de rios e atualmente compõem series temporais longas juntamente com os satélites Jason 1, 2 e 3 lançados posteriormente sob sua órbita [15]. ENVISAT (*ENVIronmental SATellite*) posicionado sob a mesma órbita dos satélites das

missões ERS, que iniciaram em 1991, com um período de revisita de 35 dias, foi a missão mais usada em estudos com propósito de validação dos dados altimétricos em rios, várzeas e zonas úmidas, onde séries temporais de níveis de água com precisão decimétrica foram obtidas [16].

O segundo grande eixo de aplicação da altimetria espacial para hidrologia vem do fato que os traços dos satélites atravessam os corpos hídricos em toda a sua extensão nos diversos contextos hidrológicos. As redes de monitoramento hidrológico, constituídas das estações in situ estão localizadas nas margens e em trechos estreitos e retos do rio, pois necessita-se realizar frequentemente as medidas, sejam os níveis da SUPERFÍCIE DA ÁGUA ou as vazões. Por esta razão, a variabilidade da SUPERFÍCIE DA ÁGUA nas zonas úmidas é globalmente desconhecida. Na primeira aplicação da altimetria espacial para monitoramento de zonas úmidas [17] foi difícil distinguir rio e planície de inundação com os dados do satélite Topex/Poséidon. No entanto, obteve-se sucesso considerando-se uma defasagem de alguns dias nas variações da SUPERFÍCIE DA ÁGUA entre o rio e a planície de inundação adjacente [18]. A variação espaço-temporal do volume de água na bacia do rio Negro, considerando o canal principal em conjunto com a planície de inundação, foi determinada usando-se mosaicos de imagens capturadas pelo radar SAR, do satélite *Japanese Earth Resources Satellite* (JERS-1), para estimar a variação de área inundada para um ciclo sazonal, juntamente com as mudanças da SUPERFÍCIE DA ÁGUA com dados altimétricos do satélite Topex/Poséidon, em 88 EVs combinadas com 8 estações liminimétricas [19]. Uma variação de volume de 331 km^3 foi estimada para toda a bacia do rio Negro, realçando a complexa relação entre o volume potencialmente armazenado na área inundada da bacia e o volume do escoamento do rio durante o mesmo período. De forma similar, monitorou-se a propagação de inundações ao longo do rio Mekong combinando dados de altimetria espacial com imagens do satélite SPOT4 [20]. A mesma metodologia foi utilizada para reestimar o volume de água armazenado nas planícies de inundação da bacia do Negro e o da bacia Amazônica empregando imagens com melhor resolução temporal [21-22]. O primeiro estudo usando dados do ENVISAT para examinar a relação entre rio e planície de inundação foi conduzido na várzea do Curuaí, localizada na bacia Amazônica [23]. Na mesma planície de inundação, a transferência de água entre o rio e a planície, foi estimada utilizando modelagem hidrológica e séries temporais altimétricas dos níveis de água do ENVISAT [24], assim como outros estudos foram desenvolvidos na mesma temática [25].

O terceiro eixo de aplicação consiste na utilização do sistema único de referência geodésica dos dados altimétricos para estudar a declividade dos rios e assim poder modelar a hidrodinâmica do escoamento. Dentre diversas aplicações, os trabalhos pioneiros foram realizados na calha principal do rio Amazonas com dados do satélite SEASAT [26] seguidos pelos dados do satélite

Topex/Poséidon [27]. Com dados mistos dos satélites Topex/Poséidon e ENVISAT ou somente do ENVISAT [25] foi proposta uma metodologia diferente para determinação de perfis de altura e declividade dos rios derivados de dados altimétricos, empregando curvas-chave provenientes das EVs e modelagem hidrodinâmica. Alguns estudos abrangem a estimativa de vazão em EV usando regressões empíricas com estações *in situ* [28] ou modelagem hidrológica e hidrodinâmica [29]. Nesse mesmo eixo, desenvolveram-se curvas-chave em mais de 1000 Evs com dados altimétricos do ENVISAT e vazão resultante da modelagem hidrológica [30].

CONCLUSÃO

Este trabalho analisa as principais aplicações da altimetria espacial no monitoramento dos recursos hídricos continentais, destacando sua contribuição para o avanço do conhecimento hidrológico em grandes bacias hidrográficas. A Altimetria Espacial concentra-se na estimativa da superfície livre da água em rios, várzeas e zonas úmidas, variável essencial para compreender o ciclo hidrológico, a hidrologia de superfície e a gestão dos recursos hídricos em um contexto de incertezas associadas às mudanças climáticas.

Atualmente, a altimetria espacial constitui uma técnica consolidada de sensoriamento remoto, capaz de investigar sistemas hidrográficos em múltiplas escalas, desde pequenos afluentes até bacias inteiras. A bacia Amazônica destaca-se como um dos principais laboratórios naturais para o desenvolvimento e a aplicação dessa técnica, reunindo avanços significativos nas últimas três décadas. As séries temporais altimétricas já alcançam duas décadas em regiões favoráveis, embora muitas ainda sejam limitadas a períodos menores. O reprocessamento de missões antigas com algoritmos especializados pode ampliar esse acervo.

Com o lançamento da missão SWOT, em dezembro de 2022, ampliaram-se a precisão vertical, a resolução espacial e a cobertura de corpos hídricos. Assim, as Estações Virtuais fortalecem e complementam redes *in situ*, sobretudo em áreas amazônicas pouco monitoradas, essenciais à avaliação dos impactos climáticos hidrológicos, atuais e futuros.

AGRADECIMENTOS - O Presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua (Mestrado Profissional em Rede Nacional) pelo apoio técnico científico aportado. Reconhecemos o apoio financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), por meio dos projetos PARHINTINS e GRHAMA.

REFERÊNCIAS

1. Silva, J. S., Calmant, S., Seyler, F., Moreira, D. M., Oliveira, D., & Monteiro, A. (2014). "*Radar altimetry aids managing gauge networks"*. Water Resources Management, 28, 587–603. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0484-z>. Acesso em: 07 jun. 2026.
2. ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2026). "*Monitoramento Hidrológico"*. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico>. Acesso em: 07 jun. 2026.
3. Fu, L., & Cazenave, A. (2001). *Satellite altimetry and earth sciences: A handbook of techniques and applications*. Academic Press, London (UK), 464 p.
4. Calmant, S., Seyler, F., & Crétaux, J.-F. (2008). *"Monitoring continental surface waters by satellite altimetry"*. Survey in Geophysics, 29 (4-5), 1573-0956. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9051-1>. Acesso em: 07 jun. 2026.
5. Silva, J. S. (2024). *"Monitoring of Water Resources by Spatial Altimetry"*, 6 (3), 10612-10636. Disponível em: < https://doi.org/10.56238/arev6n3-374>. Acesso em: 07 jun. 2026.
6. Silva, J. S. (2010). *Altimetria espacial em zonas úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações hidrológicas*. Saarbrücken (GE): Édition Universitaires Européennes. ISBN: 978-613-1-52979-5.
7. Silva, J. S., Calmant, S., Rotuno Filho, O. C., Seyler, F., Cochonneau, G., Roux, E., & Mansour, J. W. (2010). *"Water levels in the Amazon Basin derived from the ERS-2 and Envisat radar altimetry missions"*. Remote Sensing of Environment, 114, 2160–2181. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.020>. Acesso em: 07 jun. 2026.
8. Silva, J. S., Rotuno Filho, O. C., Seyler, F., Calmant, S., Roux, E., Araujo, A. M., & Guyot, J.-L. (2012). *"Water level dynamics of Amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry"*. International Journal of Remote Sensing, 33(11), 3323–3353. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.531914>. Acesso em: 07 jun. 2026.
9. Google Earth. (2026). *Google Earth Pro*, v. 7.3.7.1155 (32-bit). Google LLC.
10. MAPS. (2026). *Multi-mission Altimetry Processing Software*, v. 2.2.
11. Silva, K. M., Silva, J. S., Calmant, S., & Paris, A. (2021). "*Validation of the water levels provided by satellites Jason 1, 2, and 3 in the Amazon Basin"*. Brazilian Journal of Development, 7(3), 26541–26557. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-382>. Acesso em: 07 jun. 2026.
12. Miller, L. S. (1979). *"Topographic and backscatter characteristics of GEOS 3 overland data"*. Journal of Geophysical Research, 84(B8), 4045–4054. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/JB084iB08p04045>. Acesso em: 07 jun. 2026.
13. Crétaux, J.-F., & Birkett, C. (2006). *"Lake studies from satellite radar altimetry"*. Comptes Rendus Geosciences, 338(14-15), 1098-1112. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002>. Acesso em: 07 jun. 2026.
14. Mason, I. M., Rapley, C. G., Street-Perrott, F. A., & Guzkowska, M. (1985). *"ERS-1 observations of lakes for climate research"*. In Proceedings EARSeL/ESA Symposium 'European Remote Sensing Opportunities', Strasbourg, France, 31 March–3 April 1985.
15. Sun, M., Guo, J., Yuan, J., Liu, X., Wang, H., & Li, C. (2021). *"Detecting lake level change from 1992 to 2019 of Zhari Namco in Tibet using altimetry data of TOPEX/Poseidon and Jason-1/2/3 missions"*. Frontiers in Earth Science, 9, 640553. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.640553>. Acesso em: 07 jun. 2026.
16. Crétaux, J. F. (2022). *"Inland water altimetry: Technological progress and applications"*. In: A. Di Mauro, A. Scozzari, & F. Soldovieri (Eds.), Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management. Springer Water, Springer, Cham, 111–139. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_6>. Acesso em: 07 jun. 2026.
17. Cudlip, W., Ridley, J. K., & Rapley, C. G. (1992). *"The use of satellite radar altimetry for monitoring wetlands"*. In Proceedings Remote Sensing and Global Change, 16th Annual Conference, Remote Sensing Society, London, 207–216.

18. Birkett, C. M., et al. (2002). *"Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry"*. Journal of Geophysical Research, 107(D20), 8059. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2001JD000609>. Acesso em: 07 jun. 2026.
19. Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J.-M., León, J. G., & Cazenave, A. (2005). *"Floodplain water storage in the Negro River Basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels"*. Remote Sensing of Environment, 99, 387–399. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.016>. Acesso em: 07 jun. 2026.
20. Frappart, F., Do Minh, K., L'Hermitte, J., Cazenave, A., Ramillien, G., Le Toan, T., & Mognard-Campbell, N. (2006). *"Water volume change in the lower Mekong from satellite altimetry and imagery data"*. Geophysical Journal International, 167, 570–584. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03184>. Acesso em: 07 jun. 2026.
21. Frappart, F., Papa, F., Famiglietti, J. S., Prigent, C., Rossow, W. B., & Seyler, F. (2008). *"Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study for the Rio Negro River basin"*. Journal of Geophysical Research, 113, D21104. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007JD009438>. Acesso em: 07 jun. 2026.
22. Frappart, F., Papa, F., Silva, J. S., Guillaume Ramillien, G., Prigent, C., Seyler, F., & Calmant, S. (2012). *"Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought"*. Environmental Research Letters, 7, 044010. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044010>. Acesso em: 07 jun. 2026.
23. Cauhopé, M. (2004). *"Hauteurs d'eau d'une plaine d'inondation amazonienne par altimétrie spatiale"*. Rapport de stage de DEA, Sciences de la Terre et l'Environnement, UT3, Toulouse-FR, 30 p. (em francês).
24. Bonnet, M. P., Barroux, G., Martinez, J. M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneaou, G., Melack, J. M., Boaventura, G., Maurice-Bourgoin, L., León, J. G., Roux, E., Calmant, S., Kosuth, P., Guyot, J. L., & Seyler, P. (2008). *"Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí)"*. Journal of Hydrology, 349(1–2), 18–30. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.055. Acesso em: 07 jun. 2026.
25. Chávarri, E., Crave, A., Bonnet, M. P., Mejía, A., Silva, J. S., & Guyot, J. L. (2012). *"Hydrodynamic modelling of the Amazon River: Factors of uncertainty"*. Journal of South American Earth Sciences, 44, 94–103. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2012.10.010. Acesso em: 07 jun. 2026.
26. Dunne, T., Mertes, L. A. K., Meade, R. H., Richey, J. E., & Forsberg, B. R. (1998). *"Exchanges of sediment between the floodplain and channel of the Amazon River in Brazil"*. Geological Society of America Bulletin, 110(4), 450–467. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0450:EOSBTF>2.3.CO;2. Acesso em: 07 jun. 2026.
27. Zakharova, E. A., Kouraev, A. V., Cazenave, A., & Seyler, F. (2006). *"Amazon River discharge estimated from TOPEX/Poseidon altimetry"*. Geosciences Comptes Rendus (French Academy of Sciences), 338(3), 188–196. https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.10.003 Acesso em: 07 jun. 2026.
28. Pinel, S., Bonnet, M. P., Silva, J. S., Garnier, J., Moreira, D., Catry, T., Motta Marques, D., & Seyler, F. (2020). "Flooding dynamics within an Amazonian floodplain: water circulation patterns and inundation duration". Water Resources Research, 56(1), e2019WR026081. https://doi.org/10.1029/2019WR026081 Acesso em: 07 jun. 2026.
29. Emery, C. M., Biancamaria, S., Boone, A., Ricci, S., Rochoux, M. C., Pedinotti, V., & David, C. H. (2020). *"Assimilation of wide-swath altimetry water elevation anomalies to correct large-scale river routing model parameters"*. Hydrology and Earth System Sciences, 24, 2207–2233. https://doi.org/10.5194/hess-24-2207-2020 Acesso em: 07 jun. 2026.
30. Paris, A., de Paiva, R. C. D., Silva, J. S., Moreira, D. M., Calmant, S., Garambois, P.-A., Collischonn, W., Bonnet, M. P., & Seyler, F. (2016). *"Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin"*. Water Resources Research, 52, 3787–3814. https://doi.org/10.1002/2014WR01661 Acesso em: 07 jun. 2026.