

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

10 Lições sobre a hidrodinâmica do baixo rio Amazonas

Alice César Fassoni-Andrade¹, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva², Fabien Durand³, Sly Wongchuig³, Claudio Barbosa⁴, Leandro Guedes Santos⁵, Daniel Medeiros Moreira⁵

Abstract: The Amazon River is unique in that it has the largest fluvial flow in the world and a large estuary. The river has a strong influence on regional and global processes, such as sediment transport, vegetation distribution, and carbon and methane emissions. Thus, understanding the hydrodynamics of the Amazon River is of great importance to better understand all these processes. Here we present a synthesis of hydrodynamic processes revealed by two hydrodynamic models applied to different stretches of the Amazon River. HEC-RAS 2D model was used to characterize the hydrodynamics of large floodplains in the middle to lower Amazon River. In the Amazon River estuary, the SCHISM model was used to characterize the tide. Five lessons are presented about the extent of the flooded area, volume, water flow, and residence time of the floodplains. Four lessons show how the seasonality of the Amazon River discharge affects the amplitude, the geographic extent of tidal influence, and the tide-induced flow reversal. The impact of extreme floods on flood duration in the floodplain and tidal variability is also assessed. The study highlights, as a final lesson, the advance in understanding the hydrodynamics of the Amazon River and the many opportunities for further studies, especially to understand the impacts of environmental and climate change on this system.

Resumo: O rio Amazonas é único por ter o maior fluxo fluvial do mundo e um estuário de grande extensão. O rio exerce forte influência sobre os processos regionais e globais, como o transporte de sedimentos, distribuição da vegetação, e emissões de carbono e metano. Assim, compreender a hidrodinâmica do rio Amazonas é de grande importância para entender melhor todos esses processos. Aqui apresentamos uma síntese de processos hidrodinâmicos revelados por dois modelos hidrodinâmicos aplicados em diferentes trechos do rio Amazonas. O modelo HEC-RAS 2D foi utilizado para caracterizar a hidrodinâmica de grandes planícies de inundação no trecho médio-baixo do rio Amazonas. Já no estuário do rio Amazonas, o modelo SCHISM foi utilizado para caracterizar a maré. Cinco lições são descritas sobre a extensão da área inundada, volume, fluxos de água e tempo de residência das planícies de inundação. Quatro lições mostram como a sazonalidade da descarga do rio Amazonas afeta a amplitude, a extensão geográfica da influência da maré e a inversão do fluxo induzida pela maré. O impacto das cheias extremas na duração da inundação nas planícies e na variabilidade da maré também é pontuado. O trabalho destaca, como última lição, o avanço no entendimento da hidrodinâmica do rio Amazonas e as muitas oportunidades de estudos principalmente para entender os impactos das alterações ambientais e climáticas nesse sistema.

Palavras-Chave – Planície de inundação, maré, estuário.

1) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB), Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, alice.fassoni@unb.br

2) Institute of Hydraulic Research, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

3) Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Toulouse, France.

4) Instrumentation Lab for Aquatic Systems (LabISA), Earth Observation Coordination of National Institute for Space Research (INPE).

5) CPRM, Serviço Geológico do Brasil, Belém and Rio de Janeiro.

INTRODUÇÃO

A bacia do rio Amazonas é a maior bacia do mundo (equivalente a 70% da área do Brasil), contribuindo com 17% do volume total de água doce exportada para os oceanos anualmente (CALLÈDE *et al.*, 2010). O médio-baixo rio Amazonas, composto por extensas planícies de inundação e redes de canais, se estende por mais de 800 km, de Óbidos até o oceano. O volume estimado de água que escoia no estuário é equivalente ao volume somado dos demais seis maiores rios do mundo, e seu conhecimento é fundamental para estimar a exportação de sedimentos para o oceano (ARMIJOS *et al.*, 2020), os fluxos globais de carbono e metano (RICHEY *et al.*, 2022), e para compreender a circulação oceânica e o clima (JAHFER; VINAYACHANDRAN; NANJUNDIAH, 2017). Além disso, esses fluxos são importantes para o gerenciamento de recursos hídricos e desastres naturais (por exemplo [SACE](#)), para utilização em simulações numéricas de mudanças climáticas e para entender a conectividade do rio e lagos da planície de inundação, que, por sua vez, afetam os ecossistemas, o transporte e a pesca comercial e de subsistência nas planícies amazônicas.

Devido à extensão da planície de inundação do rio Amazonas (cerca de 20 a 50 km de largura) e do seu estuário (cerca de 1000 km de extensão), as medições *in situ* da topografia, do nível e do fluxo de água são limitadas. A hidrodinâmica detalhada do sistema rio-planície de inundação é, portanto, pouco conhecida. Apesar de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos terem sido aplicados à bacia amazônica para entender os processos hidrodinâmicos em grande escala (FASSONI-ANDRADE *et al.*, 2021), ainda há poucos estudos que aplicaram uma modelagem hidrodinâmica 2D abrangente e detalhada em grandes áreas da Amazônia. Essa avaliação poderia abordar questões ainda não totalmente exploradas, tais como (1) Como os processos hidrodinâmicos se distribuem e variam no médio-baixo rio Amazonas? (2) Quais são os fatores que controlam a variabilidade da maré no rio Amazonas? (3) Qual é a quantidade de água que flui pela planície de inundação? (4) Qual é o impacto de inundações intensas e fracas nas variáveis hidrodinâmicas? Esse estudo sintetiza 10 lições sobre os processos hidrodinâmicos ao longo do médio-baixo rio Amazonas considerando dois modelos hidrodinâmicos aplicados em trechos caracterizados por extensas planícies de inundação e com influência da maré.

METODOLOGIA

A hidrodinâmica de oito unidades de várzea do rio Amazonas central (40.000 km²) foi caracterizada usando o modelo hidráulico 2D HEC-RAS. Dados de sensoriamento remoto foram usados no modelo, como a topografia da planície de inundação estimada por imagens Landsat, a elevação da superfície da água a partir de altimetria e produtos de extensão da água superficial. A modelagem representou bem o nível da água (precisão de 77 cm) e a extensão da inundação (~80% - período de águas altas, ~52% - período de águas baixas). Detalhes da aplicação do modelo podem ser encontrados em FASSONI-ANDRADE *et al.* (2022).

No trecho de 1000 km do estuário do Amazonas, que tem forte influência das marés, o modelo hidrodinâmico SCHISM foi utilizado para avaliar como a descarga do rio controla a amplitude da maré, a extensão geográfica da influência da maré e a reversão do fluxo induzida pela maré. A maré foi bem representada pelo modelo com um erro complexo médio de 16 cm na estação de águas baixas e 23 cm na estação de cheias. Para mais detalhes da modelagem, consultar FASSONI-ANDRADE *et al.* (2023).

RESULTADOS

Lição 1: A extensão da inundação é limitada pela topografia

A caracterização da área inundada da planície de inundação do rio Amazonas mostra um platô durante o período de cheia, com variações interanuais de 3% (Figura 1). Isso possivelmente ocorre devido as restrições topográficas em que terras altas nos limites da planície de inundação limitam a expansão da inundação. A variação interanual do volume e da profundidade da água, por outro lado, é de cerca de 20% durante a cheia, mostrando que essas variáveis são mais sensíveis a um aumento da cheia do rio Amazonas do que a extensão da inundação.

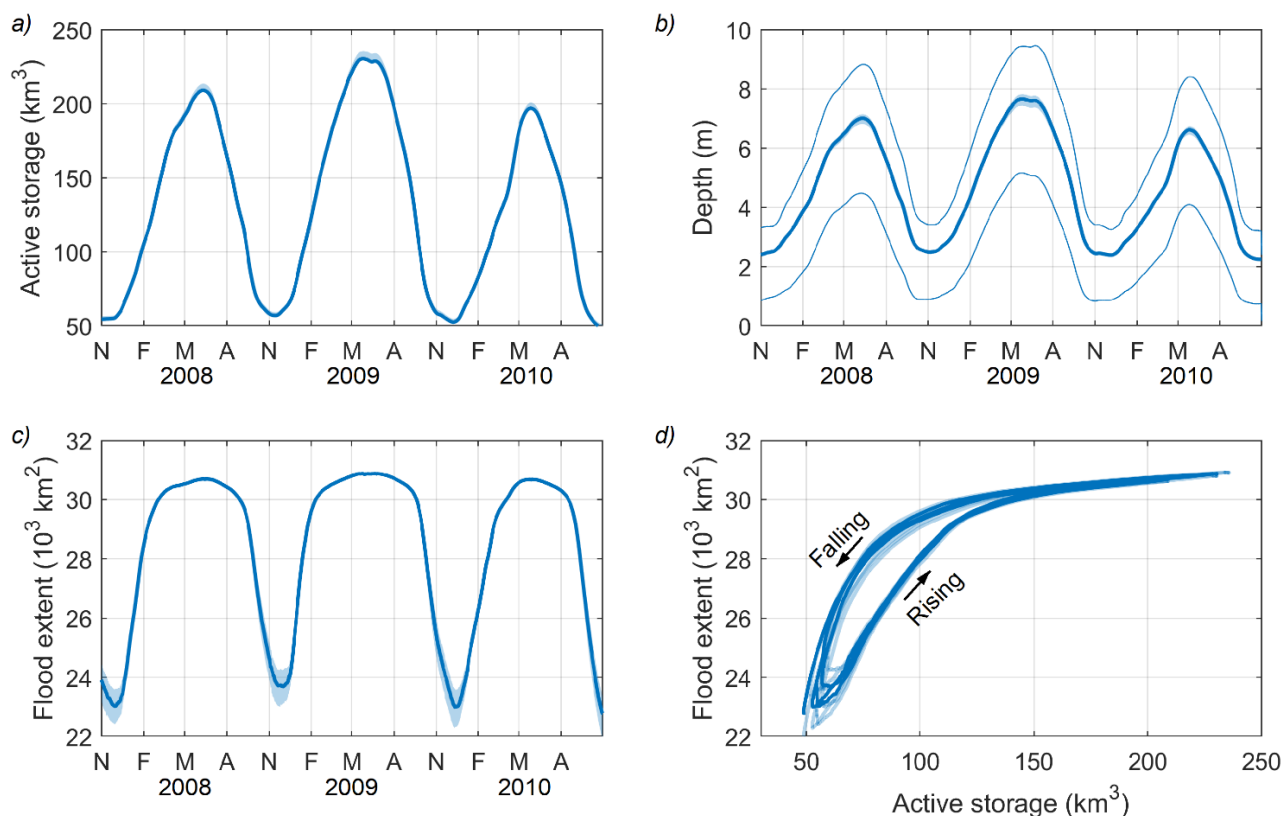


Figura 1. Séries temporais de a) armazenamento ativo, b) profundidade média \pm percentil 25 e 75 e c) extensão da inundação na planície de inundação. d) Relação entre o volume e a extensão da inundação na planície de inundação.

Lição 2: Hidrodinâmica da planície de inundação é complexa

A relação entre o volume e a extensão da inundação na planície de inundação indica uma histerese no sentido anti-horário, como também documentado por Rudorff et al. (2014b) para a planície de inundação de Curuai. Ou seja, para o mesmo volume armazenado, a extensão da inundação é maior no período de vazante do que no período de enchente (Figura 1d). Isso pode estar relacionado à complexidade hidrodinâmica da planície de inundação, como a assimetria do hidrograma do rio Amazonas, em que o período de enchente é mais lento do que o período de vazante (FLEISCHMANN et al., 2016), a reversão da inclinação da superfície da água da planície de inundação do rio (ZHANG; WERNER, 2015) ou o tempo necessário para que a água preencha as partes mais profundas da planície de inundação antes de inundar as regiões superiores.

Lição 3: Fluxos na planície são expressivos durante a cheia

As várzeas do rio Amazonas são intensamente ativas durante a cheia (maio/junho) com fluxos de até 20% da descarga do rio principal. Esses valores são muito significativos, pois são semelhantes em magnitude à descarga média dos maiores afluentes do rio Amazonas (por exemplo, $28.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o rio Negro e $31.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o rio Madeira). Além disso, o rio Amazonas é o rio mais largo do mundo durante a cheia se considerarmos as planícies (20-50 km de largura) como uma extensão contínua do canal do rio.

Devido a geomorfologia da planície com diversas unidades de várzea, a troca de água do rio com a planície é intensa com fluxos entrando na planície e retornando ao rio em cada unidade de várzea. Isso indica que o armazenamento na planície, ou o fluxo líquido, é muito pequeno em relação ao fluxo instantâneo.

Lição 4: Cheias extremas afetam a duração da inundação, mas não o momento do fluxo máximo

Cheias do rio Amazonas acima e abaixo da média podem afetar em um mês o início da cheia na planície de inundação. Por exemplo, a inundação na planície iniciou em março no ano de 2008 enquanto em anos de cheia intensa (2009) e fraca (2010) o início foi em fevereiro e abril, respectivamente. Apesar do período de alta troca de água do rio com a planície variar, o momento do fluxo máximo sempre ocorre com o pico da cheia do rio Amazonas, em maio/junho.

Períodos mais curtos de água-baixa na planície de inundação (ou cheias mais longas) podem ser prejudiciais para a agricultura das comunidades ribeirinhas uma vez que a plantação pode ser inundada antes do período da colheita (DE VASCONCELOS *et al.*, 2022).

Lição 5: Renovação da água nas unidades de planície é alta durante a cheia e aumenta de montante para jusante

O tempo de residência da água na planície de inundação representa uma condição teórica que relaciona o volume de água e o fluxo líquido na planície de inundação. Nas unidades de várzea a renovação da água é em média 6 dias na cheia e diversos meses na água baixa, mas pode variar de 10 a 1,5 dias durante a cheia dependendo da unidade de várzea. Unidades mais a jusante do rio no trecho entre Manaus e Santarém possuem renovação de água mais rápida nas cheias (Figura 2).

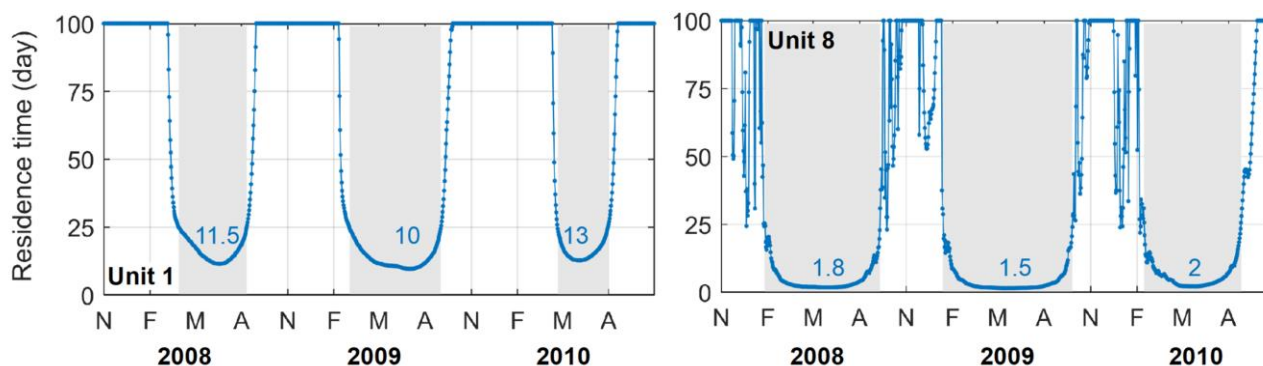


Figura 2. Tempo de residência de unidades da planície de inundação a montante (unidade 1) e a jusante (unidade 8).

Lição 6: A extensão da influência da maré no rio Amazonas é variável

A caracterização da maré no estuário do rio Amazonas permitiu avaliar o limite geográfico da influência da maré no nível da água. Esse limite varia mais de 300 km e depende da cheia do rio Amazonas. A influência da maré no nível da água permanece detectável até 800 km para o interior durante a água baixa do rio Amazonas (Óbidos), enquanto durante a cheia ela se estende do oceano até 500 km, próximo a região de Prainha. Vale ressaltar que o limite do modelo é a região de Óbidos e que, portanto, a maré possivelmente alcança um limite superior a 800 km para o interior.

Lição 7: A amplitude da maré é controlada pelo fluxo do rio Amazonas

O estuário do rio Amazonas pode ser dividido em três trechos (Figura 3): O trecho superior de Óbidos até Prainha (300 km de extensão) onde o nível da água é influenciado primariamente pela cheia do rio Amazonas e sazonalmente pela maré. Durante o período da cheia do rio, a amplitude da maré é nula nesse trecho, mas pode atingir 60 cm em Prainha no período de água baixa. O trecho intermediário de cerca de 350 km (Prainha até Porto de Santana, ~150 km do oceano) corresponde a região em que o rio e a maré afetam o nível da água ao longo de todo o ano. Nesse trecho, a amplitude pode atingir valores de cerca de 1 (cheia) e 1,4 m (água baixa) no meio do trecho dependendo do período. Já o trecho inferior, de Porto de Santana até o oceano, o nível da água é influenciado principalmente pela maré. Nesse trecho a amplitude da maré ao longo do ano é cerca de 2,6 m em Porto de Santana e 4 m na foz do rio Amazonas.

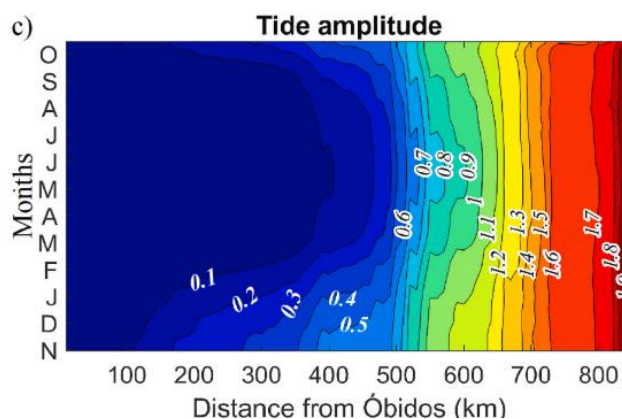


Figura 3. Variabilidade da amplitude da maré ao longo do rio Amazonas em 2018.

Lição 8: O limite onde ocorre a inversão de fluxo induzida pela maré é variável

A reversão completa do fluxo da maré entre a maré alta e baixa é uma característica bem conhecida no oceano costeiro, mas ao longo do estuário do rio Amazonas a extensão do trecho que ocorre a inversão do fluxo varia 170 km (Figura 4), sendo controlada sazonalmente pela descarga do rio. Até 500 km de Óbidos a inversão de fluxo não ocorre, apesar da velocidade da água reduzir. A partir desse trecho até 670 km de Óbidos (próximo a Porto de Santana), a inversão de fluxo ocorre sazonalmente dependendo da cheia do rio Amazonas. De Porto de Santana até a foz, a inversão de fluxo ocorre duas vezes ao dia ao longo de todo o ano.

Lição 9: Cheias e secas extremas afetam principalmente o trecho central do estuário

Anos de baixa e alta vazão do rio Amazonas afetam a maré ao longo do rio. Inundações acima e abaixo da média provocam respectivamente uma redução e um aumento da amplitude em até 10%. Baixas e altas vazões do rio Amazonas no período de água baixa agem de forma similar, mas as anomalias da amplitude da maré podem atingir até 25%. O trecho central do estuário (de 300 km a 700 km a montante da foz) é o mais afetado por essas anomalias, de forma que a extensão espacial da influência da maré parece não variar em anos de cheia e secas extremas.

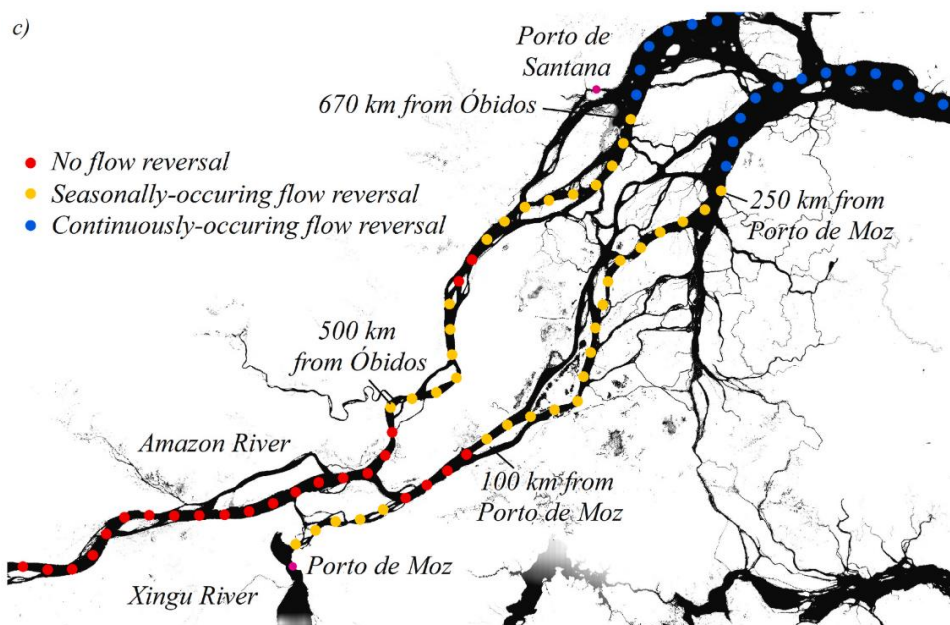


Figura 4. Mapa dos regimes de fluxo de maré do estuário amazônico. Os locais onde o fluxo do rio se inverte pelo menos uma vez em um ciclo de maré de 28 dias são exibidos em marcadores azuis (quando isso ocorre durante todo o ano) e amarelos (quando isso ocorre apenas em algumas estações). Os locais onde essa inversão do fluxo do rio nunca ocorre estão em marcadores vermelhos.

CONCLUSÃO

Lição 10: Ainda temos muitas oportunidades de aprendizado

A hidrodinâmica do baixo rio Amazonas com a presença de grandes planícies de inundação e um estuário extenso é complexa. A caracterização desse sistema a partir de modelos hidrodinâmicos abriram oportunidades para compreender melhor essa hidrodinâmica, mas ainda há muito o que aprender sobre esse sistema.

Apesar dos estudos concordarem que a maré é observada na estação de Óbidos (800 km do oceano) no período de água baixa, observações de estações de telemetria a montante de Óbidos e o estudo de Yamazaki et al. (2012) indicam que o estuário do rio Amazonas é muito mais extenso, podendo atingir a região de Manaus (mais de 1800 km do oceano). Mais estudos e observações são necessários para avaliar a extensão da influência da maré no rio Amazonas.

A bacia Amazônica é de longe a maior bacia do mundo e ainda não temos estimativas precisas da quantidade de água exportada para o oceano. Essa não é uma tarefa fácil devido a extensão do estuário e aos tributários pouco monitorados. A estação com medição contínua de vazão mais próxima

do oceano (Óbidos) parece apresentar grandes incertezas devido à dificuldade operacional de medir um grande fluxo e por não considerar o fluxo que passa pela planície de inundação. Além disso, ainda não sabemos a quantidade de água que o rio Amazonas troca com a bacia do rio Tocantins pelo canal de Breves. Os canais da foz do rio Amazonas ainda estão sujeitos a grandes modificações, como a recente alteração da foz do rio Araguari para o canal do rio Amazonas (SILVA DOS SANTOS *et al.*, 2018).

Ainda não sabemos muito bem como as alterações ambientais, como desmatamento e reservatórios, e as mudanças climáticas, como alteração na vazão e o aumento do nível do mar, vão afetar a vazão do rio Amazonas, a troca de água com a planície de inundação e a maré no estuário. Tampouco conhecemos esses impactos nas grandes cidades e pequenas comunidades ao longo do rio Amazonas. A bacia está sofrendo constantes alterações e mais estudos são necessários.

REFERÊNCIAS

ARMIJOS, E. *et al.* Rainfall control on amazon sediment flux: Synthesis from 20 years of monitoring. **Environmental Research Communications**, [s. l.], v. 2, n. 5, p. 051008, 2020.

CALLÈDE, J. *et al.* The River Amazon water contribution to the Atlantic Ocean. **Revue des sciences de l'eau**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 247–273, 2010. Disponível em: <https://www.erudit.org/en/journals/rseau/2010-v23-n3-rseau3946/044688ar/abstract/>.

DE VASCONCELOS, M. A. *et al.* Climate Change and Its Impact on the Agricultural Calendar of Riverine Farmers in Médio Juruá, Amazonas State, Brazil. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 12, 2022.

FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. **Reviews of Geophysics**, [s. l.], v. 59, n. 4, p. 1–97, 2021.

FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* Expressive riverine fluxes over Amazon floodplain units revealed by high resolution 2D modelling. **ESS Open Archive**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://essopenarchive.org/doi/full/10.1002/essoar.10512355.1>.

FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* Seasonal to interannual variability of the tide in the Amazon estuary. **Continental Shelf Research**, [s. l.], v. 255, n. April 2022, p. 104945, 2023.

FLEISCHMANN, A. S. *et al.* On river-floodplain interaction and hydrograph skewness. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 7615–7630, 2016.

JAHFER, S.; VINAYACHANDRAN, P. N.; NANJUNDIAH, R. S. Long-Term impact of Amazon river runoff on northern hemispheric climate. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1–9, 2017.

RICHEY, J. E. *et al.* Fluvial Carbon Dynamics across the Land to Ocean Continuum of Great Tropical Rivers. In: CONGO BASIN HYDROLOGY, CLIMATE, AND BIOGEOCHEMISTRY. [S. l.]: American Geophysical Union (AGU), 2022. p. 391–412. *E-book*. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119657002.ch20>.

SILVA DOS SANTOS, E. *et al.* The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 624, p. 887–899, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.211>.

YAMAZAKI, D. *et al.* Analysis of the water level dynamics simulated by a global river model: A case study in the Amazon River. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 48, n. 9, p. 1–15, 2012.

ZHANG, Q.; WERNER, A. D. Hysteretic relationships in inundation dynamics for a large lake-floodplain system. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 527, p. 160–171, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.068>.