

## MAPEAMENTO DA DINÂMICA DE SEDIMENTOS NA AMAZÔNIA POR SENSORIAMENTO REMOTO: OPORTUNIDADES E DESAFIOS

*Alice C. Fassoni-Andrade<sup>1,2</sup> ; Thiago Orsi Laranjeiras<sup>2</sup>; Hugo Oliveira Fagundes<sup>3</sup>;  
Rodrigo Cauduro dias de Paiva<sup>3</sup>; Fabien Dudand<sup>1</sup>*

**ABSTRACT** – The spatial-temporal analysis of surface suspended sediments concentration (SSSC) in rivers has been carried out with remote sensing data in support of in situ data. This study shows examples of how SSSC mapping can be used to assist hydrology and ecology studies in the central Amazon. Hydraulic and hydrodynamic processes that occur in floodplain lakes in the central Amazon, such as the backwater effect and the resuspension of sediments, were evaluated from the spatial-temporal mapping of sediment. Richness and distribution of birds in the Negro River was also assessed with this mapping. There are more species typical of white-water rivers where the SSSC is higher. SSSC estimated by remote sensing data can also be used to evaluate the results of hydrosedimentological simulations, assess anthropic actions that affect SSSC in rivers and understand the responses of hydrological systems to climate change. Despite the challenges related to the estimation of SSSC in rivers and lakes, the use of remote sensing data has been increasingly important for hydrological and ecological studies.

**Palavras-Chave** – Satélite; rios; lagos.

<sup>1</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brazil.

<sup>2</sup> Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Núcleo de Gestão Integrada de Roraima, Boa Vista, RR.

<sup>3</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil. Caixa Postal 15029. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970.

## 1 - INTRODUÇÃO

A avaliação dos padrões espaciais e temporais da concentração de sedimentos em suspensão na superfície (CSSS) em rios de grandes bacias possui um grande desafio devido à escassez de dados de monitoramento *in situ*. Em particular, a bacia Amazônica possui rios e planícies de inundações extensas de difícil acesso e monitoramento. A variação de sedimentos nesses ambientes tem um papel importante nos processos ecológicos da bacia, como a distribuição e riqueza de espécies (Melack and Forsberg, 2001). Além disso, a bacia sofre grande pressão antrópica relacionada à atividades que promovem a variação de sedimentos nos rios, como o desflorestamento (Coe et al., 2009; Leite et al., 2012), a mineração e a construção de barramentos para geração de energia hidrelétrica (Latrubesse et al., 2017).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta que complementa os dados de monitoramento *in situ* para avaliação e caracterização dos padrões de CSSS em rios e lagos. No estudo de Fassoni-Andrade e Paiva (2019), 2760 imagens de satélites foram utilizadas para avaliar padrões espaço-temporais da CSSS durante 15 anos nos rios e lagos da Amazônia central. Devido à cobertura de nuvens e às lacunas nas imagens, os padrões espaço-temporais dos dados foram recuperados por meio de um processamento de filtragem temporal. Posteriormente, foram elaborados mapas que resumem a dinâmica de CSSS, como o mapa da Figura 1. A mistura das cores azul, verde e vermelho na figura representa quanto tempo cada ponto é mapeado em uma classe de CSSS: alta (vermelha), moderada (verde) ou baixa (azul). Por exemplo, um ponto amarelo (mistura do vermelho e verde) permanece aproximadamente 50% do tempo na classe alta e 50% do tempo na classe moderada. O mapa facilita a interpretação da variação de sedimentos e foi validado com acurácia global de 71%.

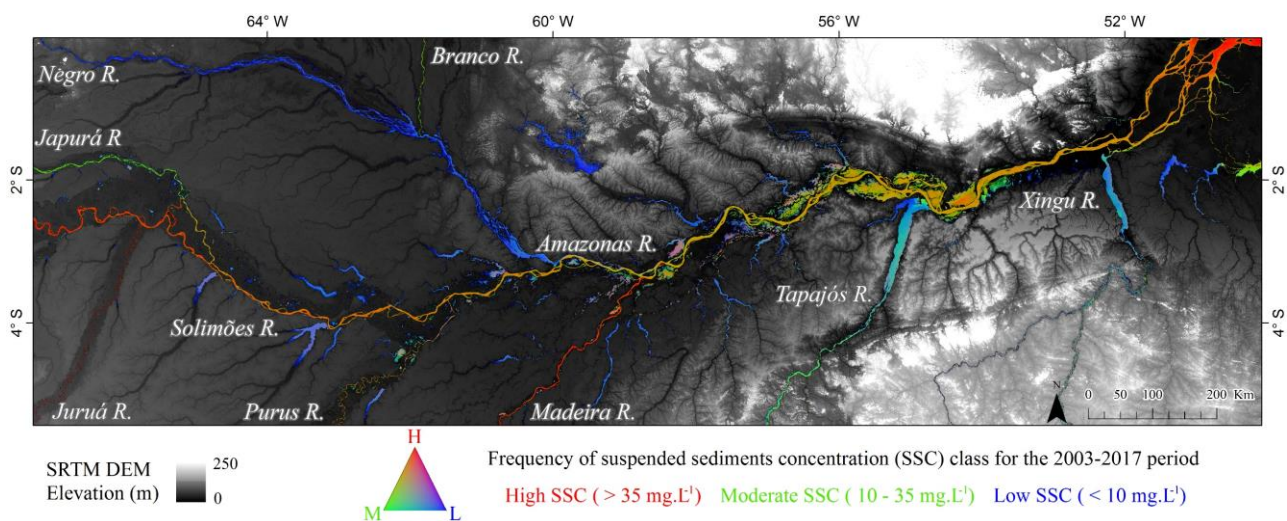


Figura 1. Mapeamento da frequência de classe de CSSS (Fonte: Fassoni-Andrade e Paiva, 2019).

Este trabalho tem como objetivo mostrar como mapeamentos da dinâmica de CSSS podem ser utilizados para auxiliar estudos que abordam temáticas como hidrologia e ecologia. Para mostrar esse alcance dos dados de sensoriamento remoto, utilizou-se o mapeamento realizado para a Amazônia por Fassoni-Andrade e Paiva (2019; Disponível em [data.mendeley.com/datasets/wy2mz3nm7p/1](https://data.mendeley.com/datasets/wy2mz3nm7p/1)).

## 2 - PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM LAGOS DE PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO

A região central da bacia Amazônica possui diversos lagos ao longo da planície de inundação do rio Amazonas que recebem água de bacias locais e do rio principal (Mertes, 1997; Mertes et al., 1995). Essas planícies possuem importância nos fluxos de carbono, nutrientes e sedimentos, os quais sustentam ecossistemas diversos (Junk et al., 2012; Melack et al., 2009). No entanto, poucos estudos foram feitos para compreender a troca de água entre o rio e a planície de inundação bem como a variação da CSSS nesses ambientes.

O mapeamento da variação de sedimentos, baseado nas reflectâncias nas faixas do vermelho e infravermelho próximo (Fassoni-Andrade e Paiva, 2019), permitiu inferir sobre processos hidráulicos e hidrodinâmicos que ocorrem na planície de inundação da Amazônia central. Por exemplo, a ressuspensão de sedimentos em lagos rasos fica clara durante o período de água baixa (novembro) ao longo do médio Rio Amazonas (Figura 2a). Na figura, altos valores da reflectância na faixa do infravermelho próximo representam maiores CSSS. Esse processo foi documentado no Lago Grande de Curuai (Bourgoin et al., 2007). Por outro lado, o Lago Andirá recebe sedimentos do rio no período de enchente (novembro a março; Figura 2b), mas a CSSS é reduzida no período de cheia possivelmente devido a contribuição da bacia local com menor CSSS. Esse processo também foi documentado para um lago com características geomorfológicas parecidas (Lesack e Melack, 1995).

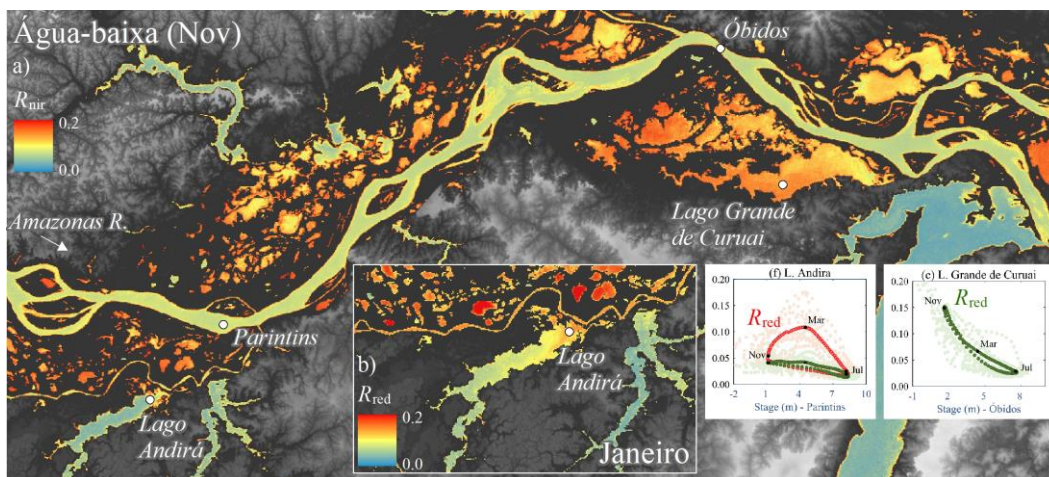


Figura 2. a) Reflectância no infravermelho próximo mapeada em novembro e b) reflectância do vermelho mapeada em janeiro (Fonte: Modificado de Fassoni-Andrade e Paiva, 2019).

### 3 - DISTRIBUIÇÃO E RIQUEZA DE ESPÉCIES

A distribuição e a frequência da ocorrência de sedimentos, que dependem do rio e das fontes locais, são importantes para analisar o ciclo e a produtividade dos nutrientes (Melack and Forsberg, 2001). Portanto, o mapeamento da variação espaço-temporal da CSSS pode trazer informações sobre a riqueza de espécies na Amazônia como peixes, pássaros e plantas (Junk et al., 2015, 2011). Rios com diferentes tipos de água (e diferentes cargas de sedimentos e nutrientes) criam florestas alagáveis que diferem em estrutura e composição florística. Como as aves são estritamente associadas à vegetação, rios com diferentes tipos de água na Amazônia abrigam comunidades de aves distintas, com diversas espécies indicadoras (Laranjeiras et al., 2019).

Além disso, a variação, mesmo que pequena, na CSSS em rios de um mesmo tipo de água ou ao longo do rio também parecem implicar em variações na avifauna. Ao longo do Rio Negro, o maior rio de água preta do mundo e com baixíssimas CSSS, há mudanças na composição e riqueza de espécies de aves a partir da desembocadura do Rio Branco, um rio de água branca e rico em nutrientes (Laranjeiras et al., submetido). Essas mudanças foram correlacionadas com as variações na CSSS estimadas através do mapeamento espaço-temporal de Fassoni-Andrade e Paiva (2019) e parecem ser causadas pela entrada das águas barrentas do Rio Branco (Leenher e Santos, 1980; Latrubesse e Franzinelli, 2005; Cunha e Sawakuchi, 2017; Marinho, 2019). Por exemplo, onde a concentração de sedimentos é maior, ocorrem mais espécies de aves típicas de rios água branca (Figura 3). Além disso, o input de sedimentos do Rio Branco parece ter contribuído para a formação e produtividade das ilhas fluviais no baixo Rio Negro, proporcionando essas mudanças na avifauna (Laranjeiras et al., submetido).

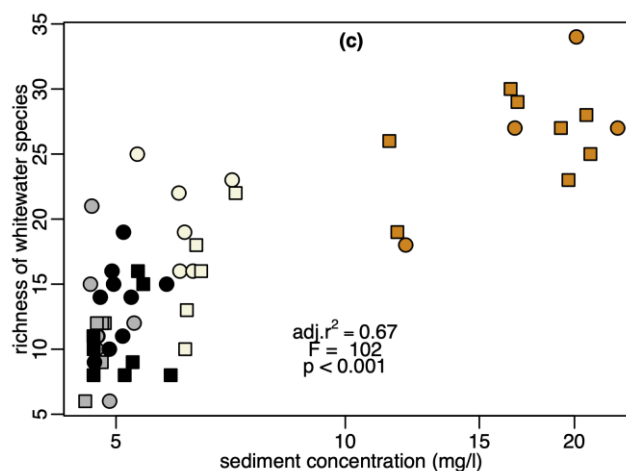


Figura 3. Relação entre o número de espécies de aves típicas de rios de água branca (previamente identificadas como indicadoras) e a CSSS ao longo dos rios Negro (em preto, cinza e bege) e Branco (em laranja). Cada ponto representa uma localidade onde a avifauna foi amostrada (Fonte: Laranjeiras et al., submetido).



Por outro lado, a importância dos valores absolutos de concentração de sedimentos na água para a biodiversidade nas florestas alagáveis ainda merece maiores investigações. Ainda não está claro, pelo menos ao longo do Rio Negro, se a atual CSSS na água está influenciando a produtividade e estrutura das florestas alagáveis ou se essas estão refletindo valores muito maiores de períodos geológicos passados (Latrubesse e Franzinelli, 2005; Cunha e Sawakuchi, 2017; Marinho, 2019). Quantificar a deposição e a variação dos sedimentos e a produtividade das florestas alagáveis pode iluminar essa questão.

---

## **4 - AVALIAÇÃO DE MODELOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS**

Além de auxiliar no entendimento da hidrologia dos sistemas, os dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados para analisar o desempenho de modelos hidrossedimentológicos e auxiliar na interpretação dos resultados (Fagundes et al., 2020b). Esses modelos conseguem representar, a partir de equações matemáticas, processos como a perda do solo na bacia hidrográfica por erosão e o transporte de sedimentos pelos rios até a foz. No entanto a representação de diversos processos por esses modelos, como a ressuspensão de sedimentos do leito, é um desafio. Além disso, dados de monitoramento podem não ter uma abrangência espaço-temporal suficiente para representar esses processos.

A Figura 4 exemplifica os resultados da simulação hidrossedimentológica realizada por Fagundes et al. (2020a) utilizando o modelo MGB-SED América do Sul. Nota-se que existe semelhança nos padrões espaciais da CSSS simulada e na variação espacial da CSSS mapeada por Fassoni-Andrade e Paiva (2019; Figura 1), mostrando coerência dos valores simulados frente aos dados observados por sensoriamento remoto. No entanto, um aumento da CSSS nos dados de sensoriamento entre a estação de Óbidos e a foz foi observada por Fassoni-Andrade e Paiva (2019), relacionados possivelmente a ressuspensão de sedimentos devido a força da maré (Figura 1). Não há estações de monitoramento nessa região que possa explicar esse aumento. Por outro lado, esse processo não é representado pelo modelo hidrossedimentológico (Figura 4). Assim, os dados de sensoriamento remoto podem ser uma ferramenta para complementar dados observados e avaliar modelos.

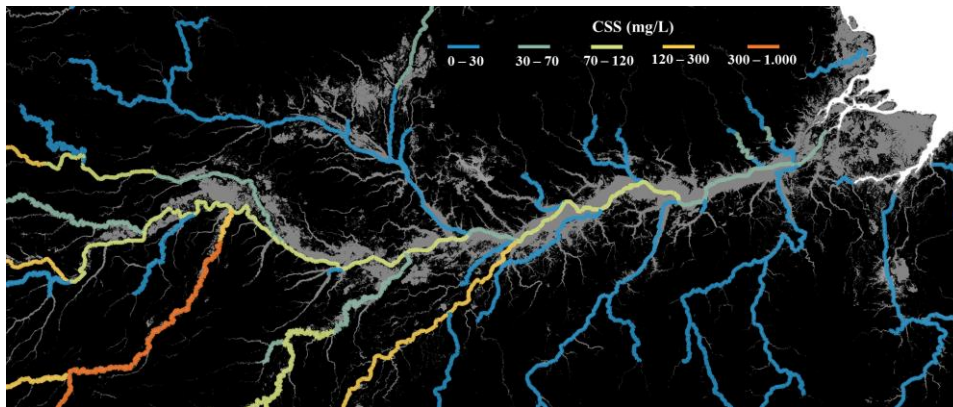


Figura 4. Concentração média de longo período de sedimentos em suspensão simulada entre 1990 e 2009 (modelo MGB-SED América do Sul; Fonte: Fagundes et al., 2020a).

## 5 - ALTERAÇÕES ANTRÓPICAS E TENDÊNCIAS EM SÉRIES HISTÓRICAS

A bacia Amazônica sofre grande pressão antrópica relacionada ao garimpo ilegal, à construção de hidrelétricas (Forsberg et al., 2017; Latrubesse et al., 2017) e ao desflorestamento (Coe et al., 2009; Leite et al., 2012). Essas ações promovem a erosão do solo ou afetam o transporte de sedimentos nos rios de forma que podem ser avaliadas em conjunto com séries temporal da CSSS. Por exemplo, Lobo et al. (2015) mostraram que a CSSS nos rios da Bacia do Rio Tapajós, estimada a partir de imagens dos satélites da série Landsat, estavam sincronizada com as atividades de mineração na bacia durante 1973 e 2013. Foi observado um pico de concentração de sedimentos coincidente com um pico de produção de ouro em todos os locais analisados durante o início dos anos 90.

A extensa série temporal (2003-2017) do mapeamento espaço-temporal da CSSS produzido por Fassoni-Andrade e Paiva (2019), além de permitir a avaliação de ações antrópicas, também permite avaliar tendências e condições extremas de secas e inundações, bem como entender as respostas do sistema frente às mudanças climáticas. Por exemplo em relação à troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação, altos níveis durante as inundações promovem maior aporte de sedimentos em lagos de médio alcance do rio Amazonas (Rudorff et al., 2017), enquanto baixos níveis médios parecem promover a maior entrada de sedimentos em outros lagos (Fassoni-Andrade e Paiva, 2019).

## 6 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados estudos que utilizaram o mapeamento da dinâmica de sedimentos por sensoriamento remoto na Amazônia central para avançar em questões relacionadas

a hidrologia e a ecologia. Muitos desafios ainda existem para a estimativa da CSSS utilizando dados de sensoriamento. Por exemplo, foi demonstrado que modelos empíricos locais são mais precisos que modelos regionais na Amazônia devido as características dos rios (Montanher et al., 2014). Além disso, a ocorrência e a variação sazonal de outros componentes presentes na água, como a clorofila, afeta a estimativa da CSSS. A baixa concentração de sedimentos, como no rio Negro, e a alta cobertura de nuvens também são desafios para a criação de modelos precisos. No entanto, cada vez mais o sensoriamento remoto vem sendo utilizado como dado complementar ao dado *in situ*, principalmente com o lançamento de novos satélites com melhores resoluções radiométrica, espacial e temporal.

## 7 - REFERÊNCIAS

- Bourgoin, L.M., Bonnet, M.P., Martinez, J.-M.M., Kosuth, P., Cochonneau, G., Moreira-Turcq, P., Guyot, J.L., Vauchel, P., Filizola, N., Seyler, P., 2007. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. *J. Hydrol.* 335, 140–156. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.023>
- Coe, M.T., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S., 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Cunha, D. F. D., & Sawakuchi, A. O. (2017). Evolução sedimentar do Arquipélago de Anavilhanas no baixo Rio Negro, Amazônia Central. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fagundes, H. de O., Fan, F.M., Paiva, R.C.D. de, Siqueira, V.A., Buarque, D.C., Kornowski, L.W., Laipelt, L.S., Collischonn, W., 2020a. Sediment flows in South America supported by daily hydrologic-hydrodynamic modeling. *Earth Sp. Sci. Open Arch.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/essoar.10503046.1>
- Fagundes, H. de O., Paiva, R.C.D. de, Fan, F.M., Buarque, D.C., Fassoni-Andrade, A.C., 2020b. Sediment modeling of a large-scale basin supported by remote sensing and in-situ observations. *Catena* 190. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104535>
- Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R.C.D. de, 2019. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. *Remote Sens. Environ.* 221, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.038>
- Forsberg, B.R., Melack, J.M., Dunne, T., Barthem, R.B., Goulding, M., Paiva, R.C.D., Sorribas, M. V., Silva, U.L., Weisser, S., 2017. The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLoS One* 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182254>
- Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Schöngart, J., Cohn-Haft, M., Adeney, J.M., Wittmann, F., 2011. A classification of major naturally-occurring amazonian lowland wetlands. *Wetlands* 31, 623–640. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>
- Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Schöngart, J., Wittmann, F., 2012. A classification of major natural habitats of Amazonian white-water river floodplains (várzeas). *Wetl. Ecol. Manag.* 20, 461–475. <https://doi.org/10.1007/s11273-012-9268-0>
- Junk, W.J., Wittmann, F., Schöngart, J., Piedade, M.T.F., 2015. A classification of the major habitats

- of Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. *Wetl. Ecol. Manag.* 23, 677–693. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9412-8>
- Laranjeiras, T. O., Naka, L. N., & Cohn-Haft, M. (2019). Using river color to predict Amazonian floodplain forest avifaunas in the world's largest blackwater river basin. *Biotropica*, 51(3), 330–341.
- Laranjeiras, T. O., Naka, L. N., Leite, G.A., & Cohn-Haft, M. (submetido). The confluence effect in Amazonia: changes on the floodplain avifauna along the world's largest blackwater river.
- Latrubesse, E. M., & Franzinelli, E. (2005). The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. *Geomorphology*, 70(3-4), 372-397.
- Latrubesse, E.M., Arima, E.Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V.R., Horta, F.M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P.A., Ribas, C.C., Norgaard, R.B., Filizola, N., 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nat. Publ. Gr.* 546, 363–369. <https://doi.org/10.1038/nature22333>
- Leenheer, J. A., & Santos, U. D. M. (1980). Considerações sobre os processos de sedimentação na água preta ácida do rio Negro (Amazônia Central). *Acta Amazonica*, 10(2), 343-357.
- Leite, C.C., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S., De Barros Viana Hissa, L., 2012. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. *Global Biogeochem. Cycles* 26. <https://doi.org/10.1029/2011GB004133>
- Lesack, F.W., Melack, J.M., 1995. Flooding hydrology and mixture dynamics of lakewater derived from multiple sources in an Amazon floodplain lake. *Water Resour. Res.* 31, 329–345.
- Lobo, F.L., Costa, M.P.F., Novo, E.M.L.M., 2015. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sens. Environ.* 157, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.030>
- Marinho, R. R. (2019). Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro-Amazonas, Brasil. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus.
- Melack, J.M., Forsberg, B.R., 2001. Biogeochemistry of the Amazon Floodplain Lakes and Associated Wetlands. *Biogeochem. Amaz. Basin its Role a Chang. World.*
- Melack, J.M., Novo, E.M.L.M., Forsberg, B.R., Piedade, M.T.F., Maurice, L., 2009. Floodplain Ecosystem Processes, in: *Amazonia and Global Change*. <https://doi.org/10.1029/2008GM000727>
- Mertes, L. a. K., 1997. Documentation and significance of the perirheic zone on inundated floodplains. *Water Resour. Res.* 33, 1749. <https://doi.org/10.1029/97WR00658>
- Mertes, L.A.K., Daniel, D.L., Melack, J.M., Nelson, B., Martinelli, L.A., Forsberg, B.R., 1995. Spatial patterns of hydrology, geomorphology, and vegetation on the floodplain of the Amazon river in Brazil from a remote sensing perspective. *Geomorphology* 13, 215–232. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00038-7](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00038-7)
- Montanher, O.C., Novo, E.M.L.M., Barbosa, C.C.F., Rennó, C.D., Silva, T.S.F., 2014. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 29, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.001>
- Rudorff, C.M., Dunne, T., Melack, J.M., 2017. Recent increase of river-floodplain suspended sediment exchange in a reach of the lower Amazon River. *Earth Surf. Process. Landforms.* <https://doi.org/10.1002/esp.4247>