

Desafios na compreensão do fluxo de sedimentos no Lago Grande de Curuai na Amazônia Central: Abordagem via Modelagem Numérica em 2D

E. N. MANARA, F. M. FAN, B. A. SCAPIN

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-6683>*

eduardonmanara@gmail.com*

Submitted October 19, 2023 - Accepted December 1, 2023

DOI: 10.15628/holos.2023.16372

RESUMO

Este estudo investigou a dinâmica sedimentar na planície de inundação do Rio Amazonas por meio de simulações com Delf3D. A vazão média pelo Lago Grande de Curuai foi de 5.000 m³/s, ultrapassando os valores observados em mais de 2%, com picos podendo exceder 20.000 m³/s. Padrões sazonais de concentração de sedimentos (fev a

set) foram identificados. Apesar de defasagens nos picos simulados em relação às observações, as simulações ofereceram informações cruciais sobre a dinâmica de transporte de sedimentos na região, fundamentais para tomadas de decisões informadas e proteção ambiental.

Palavras-chave: Planícies de Inundação; Modelagem Computacional; Transporte de Sedimentos.

Challenges in Understanding Sediment Flow in Lago Grande de Curuai in Central Amazon: A 2D Numerical Modeling Approach

ABSTRACT

This study investigates sediment dynamics in the Amazon River floodplain, using Delf3D simulations. The average flow was 5,000 m³/s through Lago Grande de Curuai, surpassing observed values by over 2%, with peak flows potentially exceeding 20,000 m³/s. Seasonal sediment

concentration patterns (Feb to Sep) were identified. While simulations exhibited peak lags compared to observations, they provided crucial information about sediment transport dynamics in the region, vital for informed decision-making and environmental protection.

KEYWORDS: Floodplains; Computational Modeling; Sediment Transport.

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica, devido à sua grande dimensão, é afetada por variações climáticas globais, havendo ao longo do Rio Amazonas, e da maioria de seus afluentes, altos índices de precipitação anuais, distribuídos entre períodos chuvosos e secos que levam a grandes e periódicas oscilações de níveis e vazões (NEILL et al., 2006; MOLINIER et al., 1997; 1996; JUNK et al., 2011). Nessa região os pulsos de inundações são a principal força ecológica das áreas de várzeas, controlando a ocorrência e distribuição de plantas e animais, processos de produção primária e secundária, a decomposição e o ciclo de nutrientes na água e no solo. Sedimentos em suspensão, transportados durante eventos de inundação desempenham um papel crucial nesse ecossistema visto que partículas podem constituir uma fonte de contaminantes e/ou nutrientes para águas adjacentes (CAVALVANTI et al., 2012; CRISPIM et al., 2015). Associados às características geomorfológicas, as inundações também diretamente relacionadas aos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos (BONNET et al., 2008; JUNK, 1997; DUNNE et al., 1998; IRION et al., 1997).

As planícies de inundação desempenham um papel crucial na produção, transporte e deposição de sedimentos, mas compreender esses processos na região amazônica tem sido um desafio. Através da simulação numérica, este estudo busca melhorar o entendimento do transporte e deposição de sedimentos na várzea do Lago Grande de Curuai. O uso de modelos computacionais é essencial para analisar a dinâmica de sedimentos em sistemas complexos, como áreas de várzea. Esta abordagem fornecerá informações valiosas sobre os processos hidrossedimentológicos nesta região e contribuirá para o manejo e conservação dos ecossistemas de planícies de inundação da Amazônia.

Este estudo apresenta simulações inéditas de sedimentos 2D na planície de inundação do Lago Grande de Curuai, realizadas utilizando o modelo hidromorfodinâmico Deflt3D. A escolha do Deflt3D é justificada por sua capacidade comprovada de capturar complexidades de sistemas fluviais, especialmente em áreas de várzea. Além disso, a literatura atual ressalta a importância crescente da representação precisa dessas áreas por meio de softwares para melhor compreensão de ecossistemas similares, enfatizando a relevância desta pesquisa. Este estudo destaca os desafios enfrentados na compreensão do fluxo de sedimentos na Amazônia e ressalta a importância da modelagem computacional para o avanço desse campo. Ao explorar as características específicas da planície de inundação no Lago Grande de Curuai, espera-se não apenas melhorar a compreensão da dinâmica de sedimentos nesta região única, mas também contribuir para a fundamentação teórica e prática necessária para o manejo sustentável dos ecossistemas de várzea na Amazônia. Isso se alinha às necessidades atuais da região para conservação e desenvolvimento sustentável.

1 FLOODPLAIN OF LAGO GRANDE DE CURUAI

A Várzea do Lago Grande de Curuai (Figura 1), na região do rio Amazonas, abrange uma área de 3.660 km² e é composta por 30 lagos interligados por canais. É considerada uma importante área de armazenamento de sedimentos (MOREIRA-TURCQ et al., 2004; BOURGOIN et al., 2007; BONNET et al., 2008). A dinâmica hidrológica é influenciada pelas flutuações anuais do

Rio Amazonas, com níveis de inundação variando de 575 a 2.090 km². Durante a cheia, a entrada de água do rio e as chuvas regionais contribuem para o armazenamento de água superficial nos lagos, com até 10 metros de profundidade (MOREIRA-TURCQ et al., 2004).

A sedimentação na várzea ocorre de forma variável, diminuindo à medida que se afasta do canal principal do rio. A deposição de sedimentos está relacionada aos ciclos de inundação, onde o fluxo de água durante a cheia permite o transporte de materiais mais grosseiros, enquanto a vazante contribui para a decantação dos sedimentos de menor granulometria (IRION et al., 1997). Estudos indicam uma alta taxa de deposição, de até 1 cm/ano em determinadas áreas (MOREIRA-TURCQ et al., 2004). A várzea do Lago Grande de Curuai tem papel importante no contexto da bacia Amazônica, retendo sedimentos e contribuindo para o balanço sedimentar da região (MOREIRA-TURCQ et al., 2003; 2013; BOURGOIN et al., 2007).

Em resumo, a Várzea do Lago Grande de Curuai possui uma dinâmica hidrológica complexa, influenciada pelas flutuações do Rio Amazonas. A área atua como um importante armazenador de sedimentos, com altas taxas de deposição.

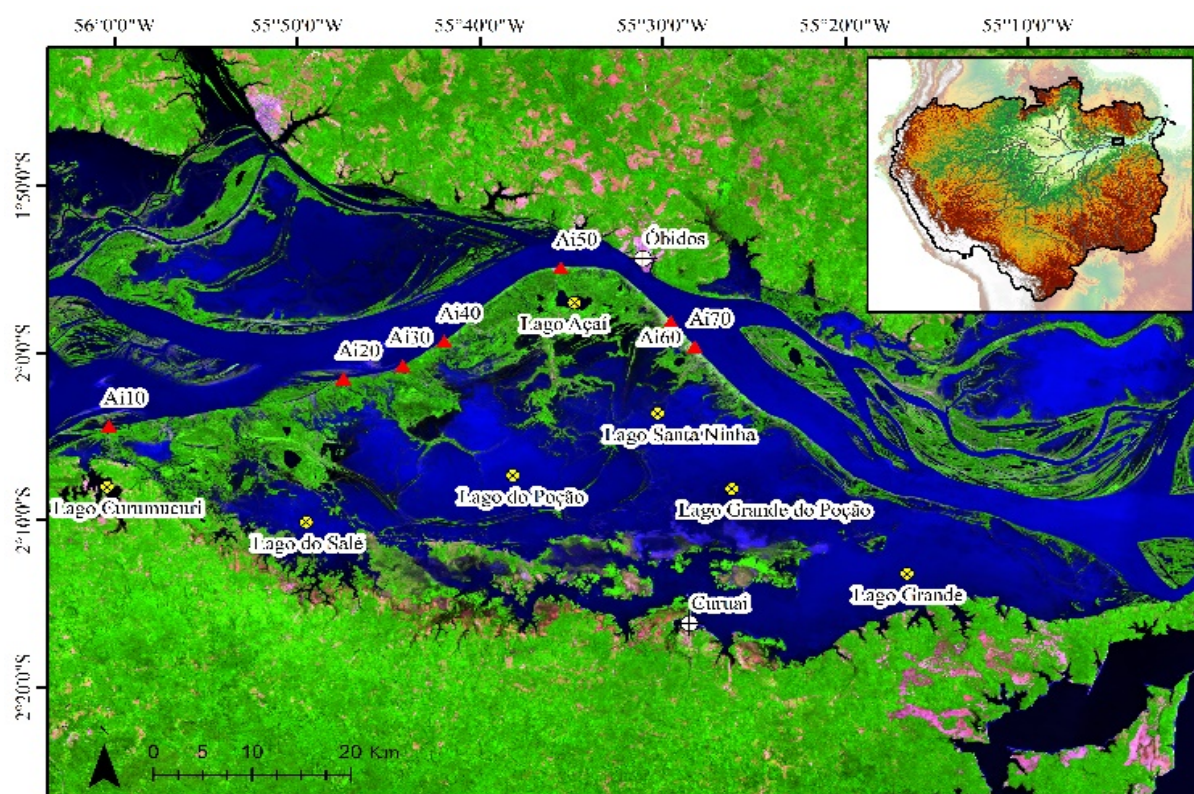


Figura 1 - Localização da área de Várzea do Lago Grande de Curuai.

2 TRABALHOS ANTERIORES

Ao longo dos anos centenas de trabalhos foram desenvolvidos englobando a temática de sedimentos na bacia amazônica. Os primeiros esforços começaram entre as décadas de 50 e 70 envolvendo estudos de análise de dados de campo e laboratoriais para compreensão da dinâmica de sedimentos do Rio Amazonas, seus principais tributários, suas planícies de inundação e na plataforma continental amazônica (e.g. SIOLI, 1951; GIBBS 1967).

A partir dos anos 90 os dados de sensoriamento remoto começaram a ser utilizados para auxiliar na compreensão da hidrodinâmica e do transporte dos sedimentos em suspensão no Rio Amazonas e suas planícies de inundação. O uso de imagens de sensoriamento remoto Landsat, associadas a medições pontuais de sedimentos ao longo da bacia amazônica permitiu uma melhor compreensão dessa dinâmica à medida que os dados de satélites se encontram em maior quantidade do que os dados medidos em campo e permitindo uma melhor espacialização dos dados, conferindo uma melhor compreensão entre a troca de sedimentos no sistema rio-planície (e.g. MERTES *et al.*, 1993; MELACK *et al.*, 1994).

Em Bourgoïn *et al.* (2005; 2007), a influência das várzeas sobre a hidrologia e a dinâmica de sedimentos no sistema de várzea do Lago Grande de Curuai foi investigada usando dados coletados por uma rede de monitoramento operada entre 1999 e 2003, incluindo sete campanhas de campo entre 2001 e 2003, imagens de sensoriamento remoto de diferentes períodos temporais e um modelo hidrodinâmico aplicado à planície de inundação do Lago Grande de Curuai. Os resultados destacaram que o acúmulo de sedimentos predomina durante os cinco meses de aumento das cheias, de dezembro a abril. Isso foi suportado por dados de nível de água, concentrações de sólidos em suspensão e padrões espaciais observados em imagens de satélite, fornecendo uma visão detalhada da dinâmica hidrológica e sedimentar na região. O estudo integrado desses dados, imagens de satélite e modelagem numérica permitiu uma compreensão profunda do comportamento da água e dos sedimentos na planície de inundação do Curuai.

Os autores destacaram várias considerações importantes para melhorar a análise dos dados. Além de desenvolver um modelo hidrodinâmico 2D ou 3D para simular o fluxo difuso de sedimentos neste sistema, eles enfatizaram a importância de prestar mais atenção à modelagem dos processos de ressuspensão, associados aos efeitos do vento que afetam os sedimentos de fundo nos canais de conexão durante o estágio de queda de água, quando os maiores fluxos de sedimentos são observados.

O modelo MGB-SED (BUARQUE, 2015; FÖEGER, 2019) é um modelo de produção e transporte de sedimentos acoplado ao modelo hidrodinâmico MGB AS (SIQUEIRA *et al.*, 2018). Em Fagundes *et al.* (2020), foi feita a aplicação do modelo na escala continental da América do Sul (MGB-SED AS), contando simulação, calibração e validação de dados diários da concentração de sedimentos em suspensão através de 595 estações sedimentométricas.

Em Fassoni-Andrade & Paiva (2020), Villar *et al.* (2013; 2018 e Yopez *et al.* (2018) há realizações de mapeamento dos principais rios da Amazônia a partir de dados de imagens de satélite MODIS com uma aproximação de regressão da Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) medidos ao longo da bacia Amazônica, com as bandas 1 e 2 das imagens de satélite e caracterizam-se como investigações interessantes para contornar a escassez de dados medidos de sedimentos na região, fornecendo aproximações de dados espaciais e temporais de sedimentos.

3 OBJETIVO E SÍNTESE METODOLÓGICA

Este trabalho objetiva compreender a dinâmica espaço-temporal dos sedimentos na região de várzea do Lago Grande de Curuai, na Amazônia central, através de simulações 2D, apoiadas por modelagem hidrodinâmica e de sedimentos em grande escala, dados medidos e diferentes produtos de sensoriamento remoto e reanálise climática.

Em linhas gerais, o método empregado, destina-se a realizar simulações hidrodinâmicas e do transporte e deposição de sedimentos nas áreas de várzea do Lago Grande de Curuai, na Amazônia central, através do modelo hidromorfodinâmico Delft3D (DELTA RES, 2021). Para isso foram utilizados dados medidos de vazão e nível, como condições de contorno do modelo hidrodinâmico (Delft3D-FLOW) e dados simulados do modelo continental de produção e transporte de sedimentos (MGB-SED AS), acoplado ao modelo hidrodinâmico da América do Sul MGB-IPH, como dados de entrada para o modelo de transporte e deposição de sedimentos (Delft3D-SED) além do uso de dados medidos em campo e produtos de sensoriamento remoto para auxílio da calibração e validação do modelo Delft3D. A Figura 2 apresenta um fluxograma geral da metodologia empregada no estudo.

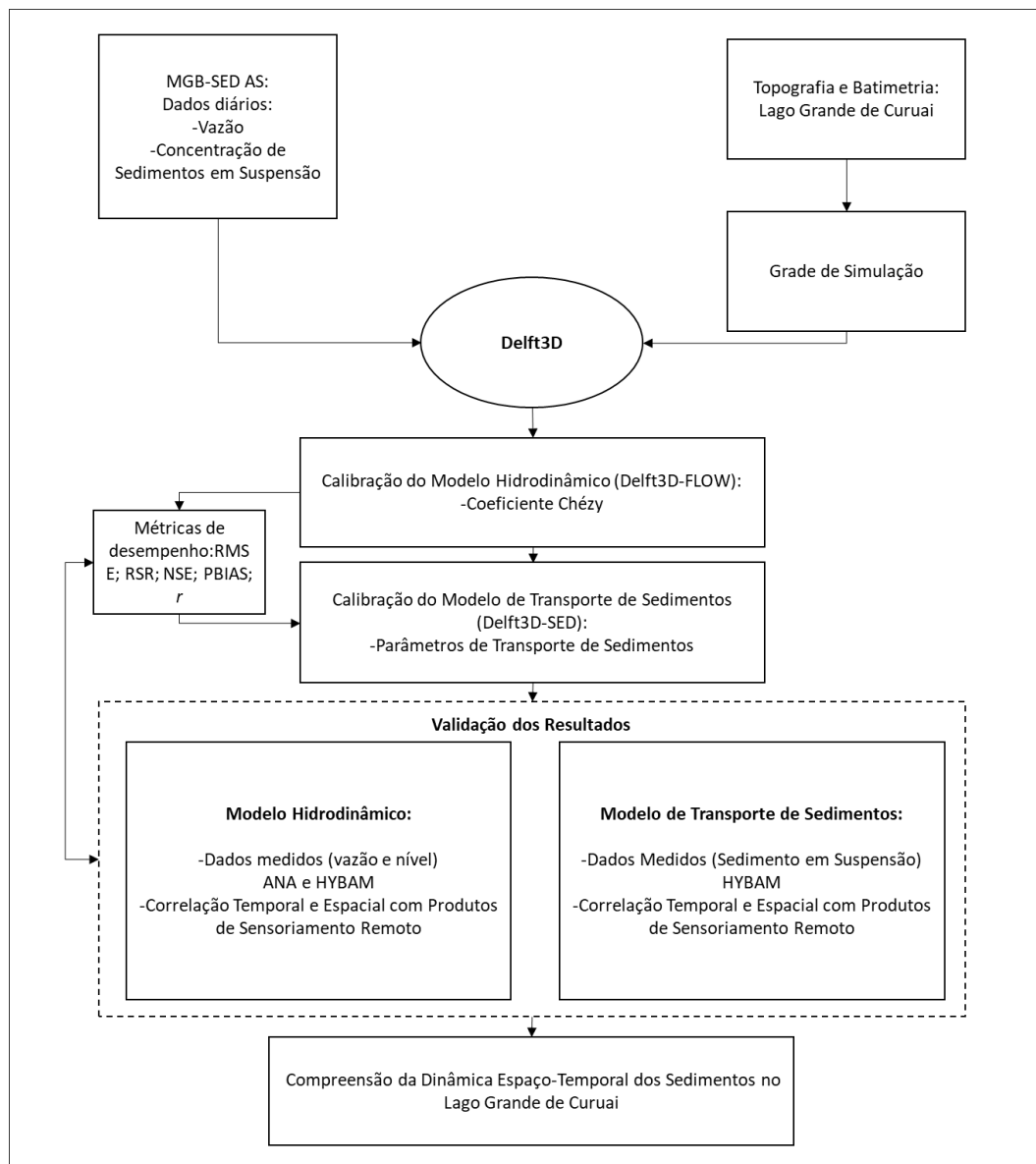


Figura 2 - Fluxograma geral da metodologia de estudo.

4 O MODELO DELFT3D

O modelo hidromorfodinâmico Delft3D é um modelo computacional amplamente utilizado para simular processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos em ambientes aquáticos. Ele integra

equações que descrevem o comportamento da água e do sedimento, permitindo a análise de fenômenos como ondas, correntes, transporte de sedimentos e mudanças no leito.

O modelo Delft3D é baseado em equações de conservação de massa e de quantidade de movimento para a água e o sedimento. Essas equações são resolvidas numericamente, considerando interações entre as diferentes variáveis e processos físicos.

O Delft3D é amplamente aplicado em estudos relacionados à engenharia costeira, gestão de recursos hídricos, planejamento portuário e estuário, modelagem de processos fluviais e estudos de impacto ambiental. Permite simular correntes, ondas e transporte de sedimentos em escala local ou regional, auxiliando na previsão de eventos extremos, avaliação de risco e tomada de decisões relacionadas a projetos e intervenções costeiras. Também possui de ampla aceitação para aplicações em ambientes ribeirinhos (e.g., DIJKSTRA *et al.*, 2019; WEI *et al.*, 2018; FLORES *et al.*, 2017; RAHBANI, 2014; DURÓ *et al.*, 2016; JAVERNICK *et al.*, 2018; KASPRAK *et al.*, 2015; PAARLBERG *et al.*, 2015; WILLIAMS *et al.*, 2013, 2016a; 2016b; YOSSEF, 2016).

Além disso, o Delft3D é usado para estudar a evolução do leito e a dinâmica dos sedimentos, auxiliando na gestão dos recursos hídricos, na prevenção da erosão costeira e na identificação de áreas de deposição de sedimentos. Além do módulo hidrodinâmico, o módulo Delft3D-FLOW integra o módulo de transporte de sedimentos (Delft3D-SED) e o módulo de morfologia (Delft3D-MOR). O módulo FLOW comunica-se alternadamente com os módulos de transporte e morfologia de sedimentos em cada etapa de tempo, contabilizando o transporte de sedimentos em suspensão. Devido às diferentes características associadas à dinâmica de sedimentos coesivos e não coesivos, várias formulações são necessárias para simular o fluxo de sedimentos na interface água-sedimento, incluindo erosão e deposição de leitos. A modelagem do transporte de sedimentos e a alteração morfológica são responsáveis pela carga de leito e sedimentos em suspensão, que podem ser coesos ou não coesos.

A implementação em Delft3D utiliza a formulação de Van Rijn (1993), que distingue entre carga de leito e transporte de sedimentos em suspensão (Ss). Este método também considera as taxas de erosão e deposição para implementar a troca de sedimentos com o leito e calcular tanto a entrada quanto a saída de partículas em suspensão no fluxo (DELTARES, 2021).

5 IMPLEMENTAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Para as simulações do módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW foram utilizados dados de estações fluviométricas do sistema Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>) mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA). Na região de estudo há uma estação com medições de níveis e vazões (17050001) próxima à cidade de Óbidos no período de 1968 a 2014 e uma estação com medições de níveis no Lago Grande de Curuai (17060000) no período de 1982 a 2021. Os dados de vazões utilizados nas simulações tiveram picos exagerados em 10%. De acordo com dados compatíveis com outros estudos que avaliaram o fluxo de água entre o Amazonas e suas várzeas (ALSDORF, 2010; RICHEY, 1989; FASSONI-ANDRADE; 2022).

Os dados de sedimentos, que se referem à concentração de sólidos em suspensão, utilizados como condições de contorno no modelo Delft3D-SED, foram obtidos a partir do modelo MGB-SED (BUARQUE, 2015; FÖEGER, 2019), aplicado à América do Sul (FAGUNDES *et al.*, 2020), com base no modelo hidrodinâmico MGB AS. A Figura 3 ilustra as condições de contorno inseridas

nas simulações. Para as etapas de calibração e validação da dinâmica espaço-temporal de sedimentos, foram utilizados dados de sedimentos em suspensão, do Observatório de Pesquisas Ambientais para Controle Geodinâmico, Hidrológico e Biogeoquímico, da erosão e alteração do transporte de matéria na Amazônia (ORE-HYBAM), disponíveis no mesmo local da estação fluviométrica da ANA, em Óbidos, com dados de sedimentos disponíveis de 1994 a 2017.

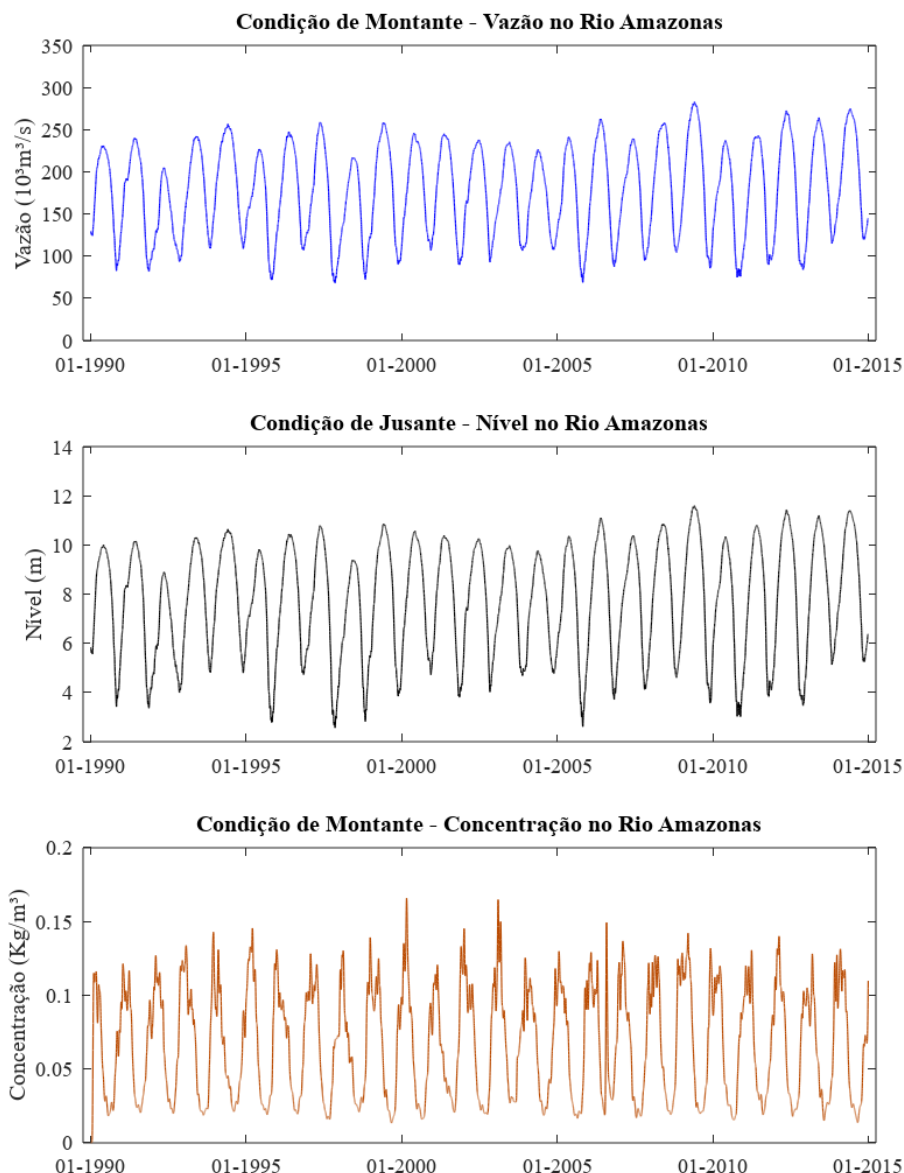


Figura 3 - Condições de contorno inseridas no modelo Delft3D.

Dados batimétricos para o trecho do rio Amazonas, que atravessa a planície de inundação do Lago Grande de Curuai foram obtidos de Rudorff *et al.* (2014). Os dados batimétricos fluviais foram gerados por meio de digitalização de cartas náuticas, publicadas pela Marinha do Brasil, enquanto os dados batimétricos lacustres foram obtidos por meio de ecossondagens realizadas durante a enchente de 2004, utilizando-se um Doppler Acústico Current Profiler (ADCP). Esse período está alinhado com o período de simulação utilizado neste estudo. Ambos os conjuntos de dados foram incorporados ao Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model (SRTM) (JARVIS *et al.*, 2008). Para a região do Lago Grande de Curuai foi confeccionada uma Malha Flexível (Flexible Mash) que fosse suficientemente refinada nos locais mais característicos da região (canais

de ingresso no Lago Grande de Curuai, ilhas e meandros do Rio Amazonas, Região permanentemente inundada do Lago Grande de Curuai etc.) e que levasse em conta o intervalo de tempo de cálculo, condicionado através do número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que é uma indicação de estabilidade e precisão numérica. As diretrizes para o número Courant são baseadas na experiência. Para locais com grandes diferenças na geometria do fundo ou linha costeira, o número de Courant não deve exceder o valor de 10 (LUIJENDIJK, 2001). A Figura 4 apresenta a batimetria e a grade flexível, utilizadas nas simulações.

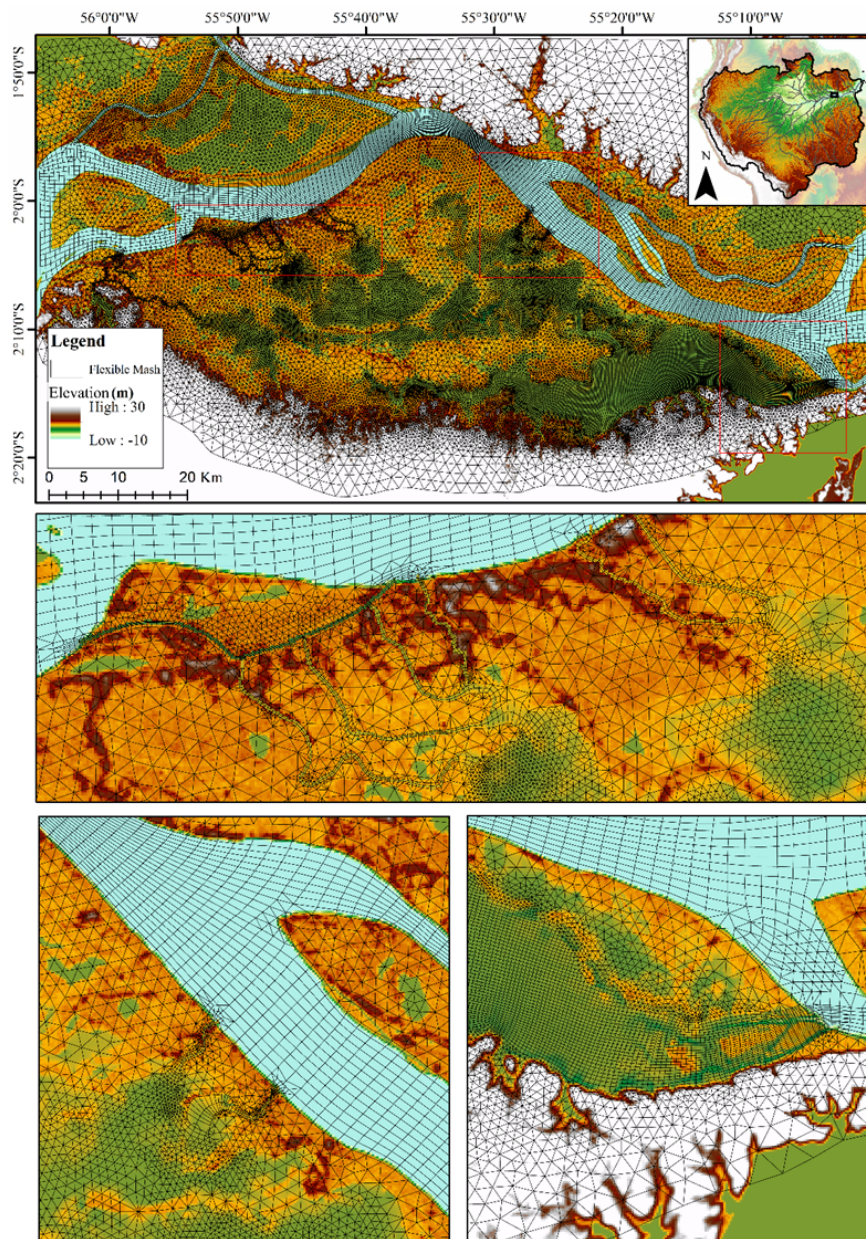


Figura 3 - Batimetria e grade flexível do domínio de simulação.

O Delft3D permite a espacialização do Coeficiente de Chézy, que integra as formulações de rugosidade de leito nas condições de contorno, sendo descrito através da formulação de Manning. Essa espacialização foi realizada através de valores de Manning definidos e mapeados no trabalho de Rudorff et al. (2014) e estabelecidos de acordo informações presentes na literatura para tipos de canais naturais e planícies de inundação (ARCEMENT & SCHNEIDER, 1989).

Para calibração do módulo de sedimentos Delft3D-SED, foram previstas modificações nos em alguns dos parâmetros das formulações de erosão e deposição de sedimentos que interferem a equação de transporte de sedimentos modificando o termo representativo das fontes e sumidouros entre trocas no leito de ressuspensão e deposição de sedimentos.

Os parâmetros modificados são: a tensão crítica de cisalhamento de deposição ($\tau_{cr,d}$); a tensão crítica de cisalhamento de erosão ($\tau_{cr,e}$) e o parâmetro M de definição da erosão. Foram realizadas simulações com conjuntos de parâmetros distintos de acordo com faixas de valores indicadas por diversos autores (de acordo com a Tabela 1). Os resultados foram comparados com os dados medidos na estação sedimentométrica de Óbidos do Hybam (17050001), através de métricas de desempenho a fim de encontrar o conjunto de parâmetros que melhor represente a dinâmica dos sedimentos do Lago Grande de Curuai. As comparações entre séries medidas e simuladas pelos modelos foram verificadas através do cálculo dos seguintes parâmetros estatísticos: raiz do erro médio quadrático (RMSE); raiz do erro médio quadrático aplicada ao desvio padrão dos dados observados (RSR); coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE); porcentagem de erro de volume (PBIAS) e índice de correlação de Pearson (r).

Tabela 1 - Faixas de valores dos parâmetros de calibração do módulo de transporte de sedimentos.

Parâmetro	Descrição	Faixa de Valores
$\tau_{cr,d}$	Tensão crítica de deposição	0,01 a 0,5 N/m ²
$\tau_{cr,e}$	Tensão crítica de erosão	0,01 a 0,6 N/m ²
M	Definição da erosão	1×10^{-6} a 5×10^{-4} kg/m ² .s

Fontes : Widdows *et al.* (2007); Hu *et al.* (2009); Van Maren *et al.* (2015) and Van Rijn (1993).

6 RESULTADOS

6.1 Modelo Hidrodinâmico

Foi realizada a última simulação de longo período, a partir da qual, originaram-se os dados relativos à compreensão do padrão geral da hidrodinâmica do sistema rio-planície do Lago Grande de Curuai. A simulação de longo período apresentou métricas de desempenho consideradas de acordo com Moriasi *et al.* (2007), tanto para as vazões e níveis simulados e observados na estação de Óbidos (17050001), quanto para os níveis da estação Vila Curuai (17060000). Estes resultados se encontram expressos na Figura 5.

A partir das simulações, foi possível inferir a magnitude das vazões do rio Amazonas, que passam pelo Lago Grande de Curuai de fevereiro a setembro, quando o rio Amazonas apresenta níveis suficientes para a entrada de água na planície de inundação do Lago Grande de Curuai. Os resultados indicam uma vazão média de aproximadamente 5.000 m³/s, com valor máximo de 27.456 m³/s em 2009. De 2000 a 2014, a vazão simulada no modelo Delf3D demonstrou uma média de 185.724 m³/s, com um pico de 288.561 m³/s, ambos os valores superaram as vazões média e máxima simuladas no trecho, correspondentes à estação de Óbidos (4.447 e 22.934 m³/s, respectivamente). Além disso, a saída da simulação apresentou um erro de percentual de volume (PBIAS) 2,39% maior, ao longo de todo o período, do que as vazões simuladas no trecho de Óbidos, local mais distante das cabeceiras da bacia amazônica, com medições fluviais. Tendo considerado as métricas de desempenho acima mencionadas como ideais, esses resultados indicam que a vazão

real do rio Amazonas que passa pela planície de inundação do Lago Grande de Curuai é mais de 2% maior, em média, do que a vazão observada, podendo atingir picos acima de 20.000 m³/s. A Figura 6 ilustra os resultados gráficos para a simulação de longo prazo, destacando as diferenças entre a vazão simulada na estação de Óbidos, a vazão simulada na saída do módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW e as magnitudes das vazões que atravessam o Lago Grande de Curuai, de acordo com os resultados obtidos.

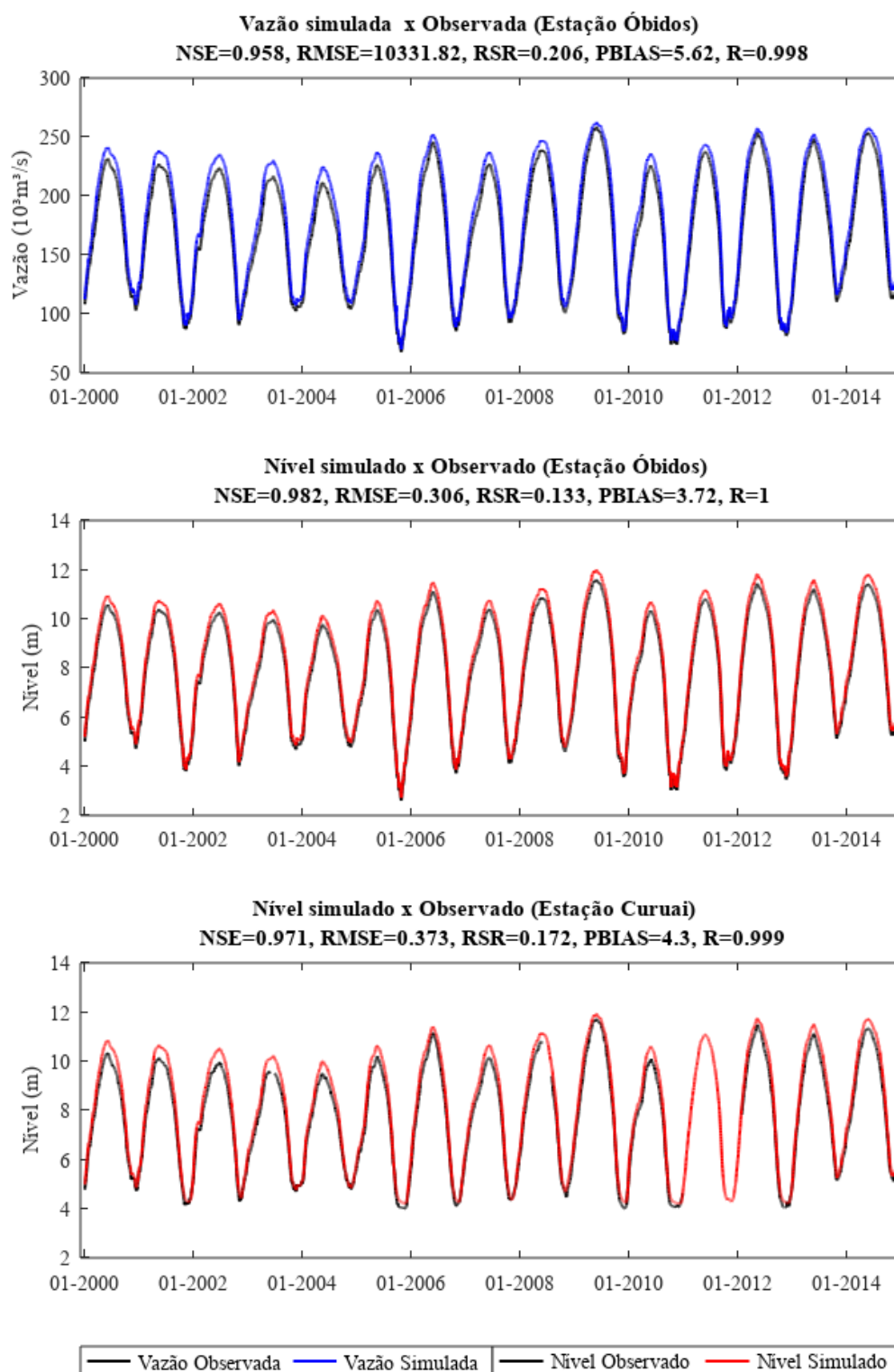


Figura 4 - Métricas de desempenho obtidas para o modelo hidrodinâmico nas simulações de longo período referentes aos níveis e vazões observados na estação de Óbidos (17050001) e aos níveis observados na estação Vila Curuai (17060000).

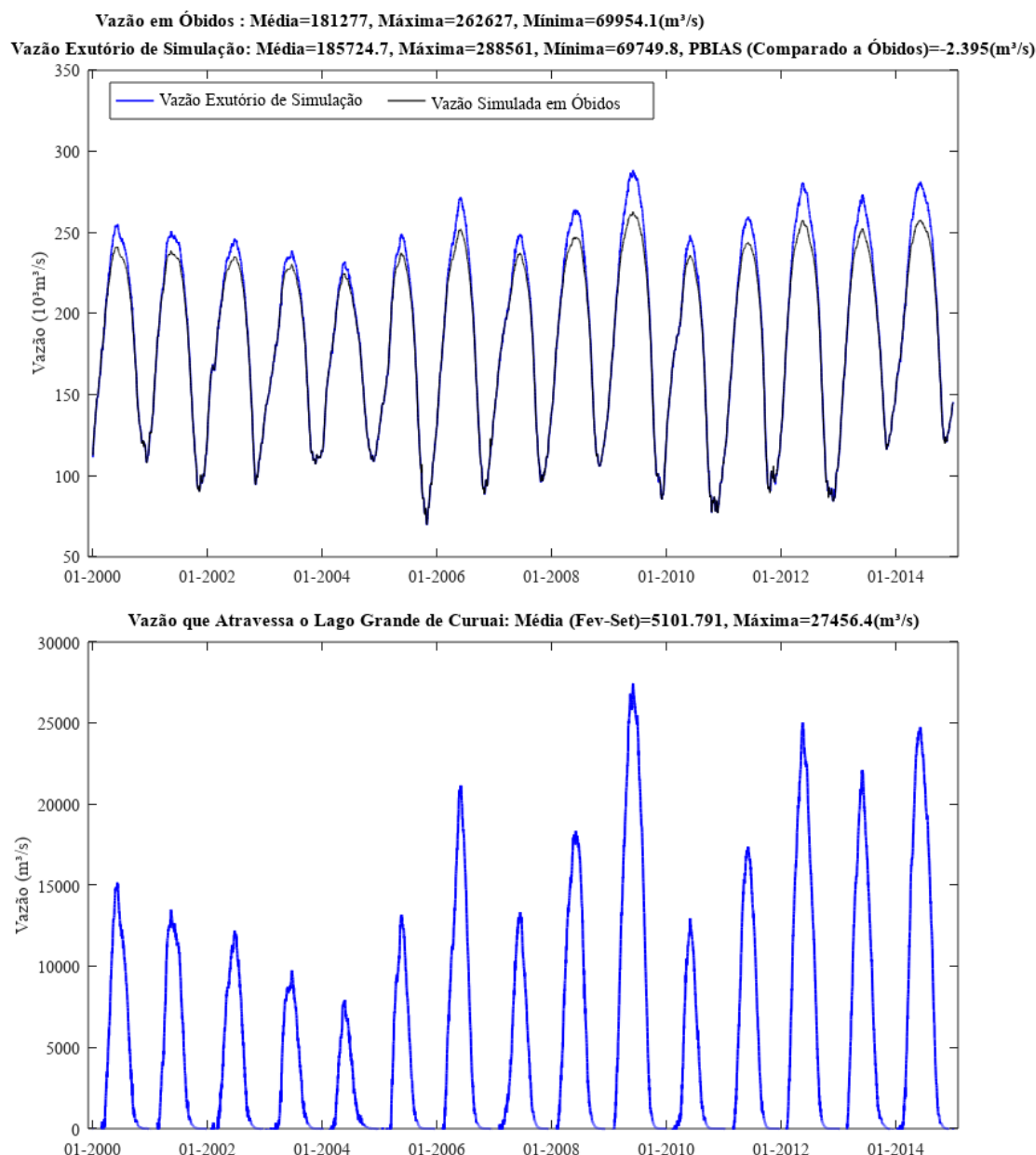


Figura 5 - Vazões obtidas através do modelo hidrodinâmico de longo período: Exutório de simulação, Estação de Óbidos (17050001) e Vazão que atravessa o Lago Grande de Curuai.

A fim de compreender se a extensão espacial das manchas de inundações geradas pelas simulações 2D do módulo Delft3d-FLOW representaram com coerências as extensões de água observadas na várzea, fez-se o uso de imagens de satélite Lansat 5. Manipuladas, em ambiente de computação em nuvem (Google Earth Engine), através do índice de respostas espectral de água por Diferença Normalizada Aumentada (Augmented Normalized Difference Water Index – ANDWI), proposto por Rad et al. (2021) e apresentado com o intuito de maximizar a diferença expressada por pixels de água e não-água em imagens de satélite.

Para o caso da área de várzea do Lago Grande este índice apresentou uma boa correlação visual com as extensões de água observadas nas imagens sendo definidas máscaras de extensões de resposta espectrais de água a partir de valores de ANDWI acima de zero. Para realizar

comparações com os dados simulados, foram selecionadas imagens com baixas coberturas de nuvens na região de estudo e que representassem diferentes períodos e vazões do Rio Amazonas.

A Figura 7 compara extensões de inundação simuladas descritas, com base na lâmina d'água simulada, com máscaras de água vetorizadas de duas imagens de satélite selecionadas. Ao analisar a figura, pode-se inferir que as simulações correspondem espacialmente às extensões de água observadas nas imagens de satélite. Isso demonstra que as profundidades de água simuladas se alinham estreitamente com os contornos das máscaras espectrais de resposta à água obtidas a partir das imagens de satélite.

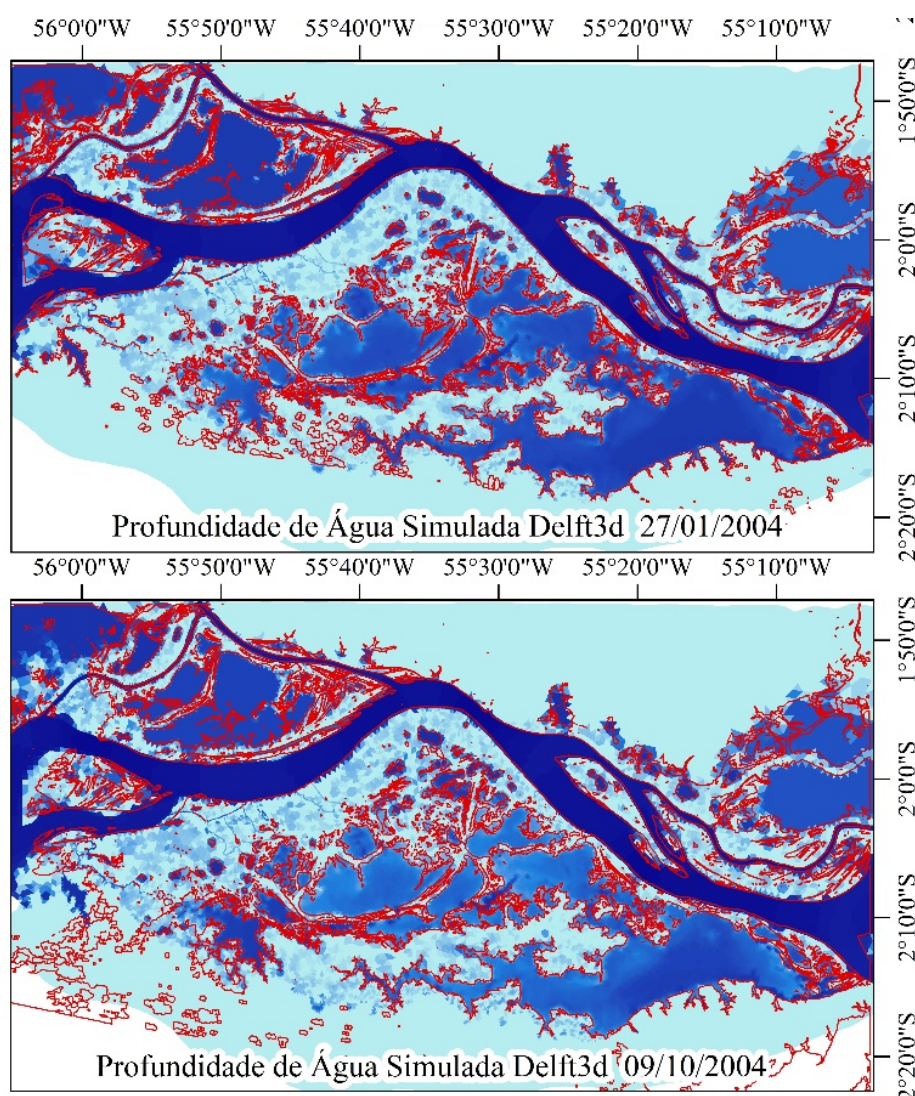


Figura 6 - Comparação da profundidade de água simulada pelo modelo hidrodinâmico Delft3D e máscaras de resposta espectrais de água obtidas através do processamento de imagens de satélite Landsat 5.

6.2 Modelo de Sedimentos

A partir de diferentes testes de calibração realizados para o modelo de transporte e deposição de sedimentos Delft3D-SED, foi realizada a última simulação de sedimentos, compreendendo o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2002, englobando um total de três anos hidrossedimentológicos do Rio Amazonas. A partir dessa simulação originaram-se os dados

relativos à compreensão do padrão geral de transporte e deposição de sedimentos no Lago Grande de Curuai.

A simulação final, em termos de métricas de desempenho comparadas aos dados de concentração de sedimentos em suspensão observados na estação de Óbidos do Hybam (17050001), apresentou valores considerados satisfatórios em termos de Nash-Sutcliffe (NSE = 0,51), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE = 0,039 kg/m³) e Raiz do Erro Médio Quadrático aplicada ao Desvio Padrão dos dados observados (RSR = 0,7) e considerados muito satisfatórios em termos de Erros de Volume (PBIAS = 3.4%), de acordo com Moriasi et al. (2007).

A Figura 8 apresenta uma comparação entre a concentração de sedimentos em suspensão simulada e observada na estação de Óbidos do Hybam (17050001), sendo possível reconhecer uma grande concordância, entre os valores simulados e observados, no primeiro ano de simulação, em virtude de que os picos observados na estação de Óbidos, no ano de 2000 apresentaram valores menos expressivos do que nos outros anos de simulação, onde a simulação não foi capaz de representar picos de concentração de sedimentos observados na casa de mais de 0,2 kg/m³.

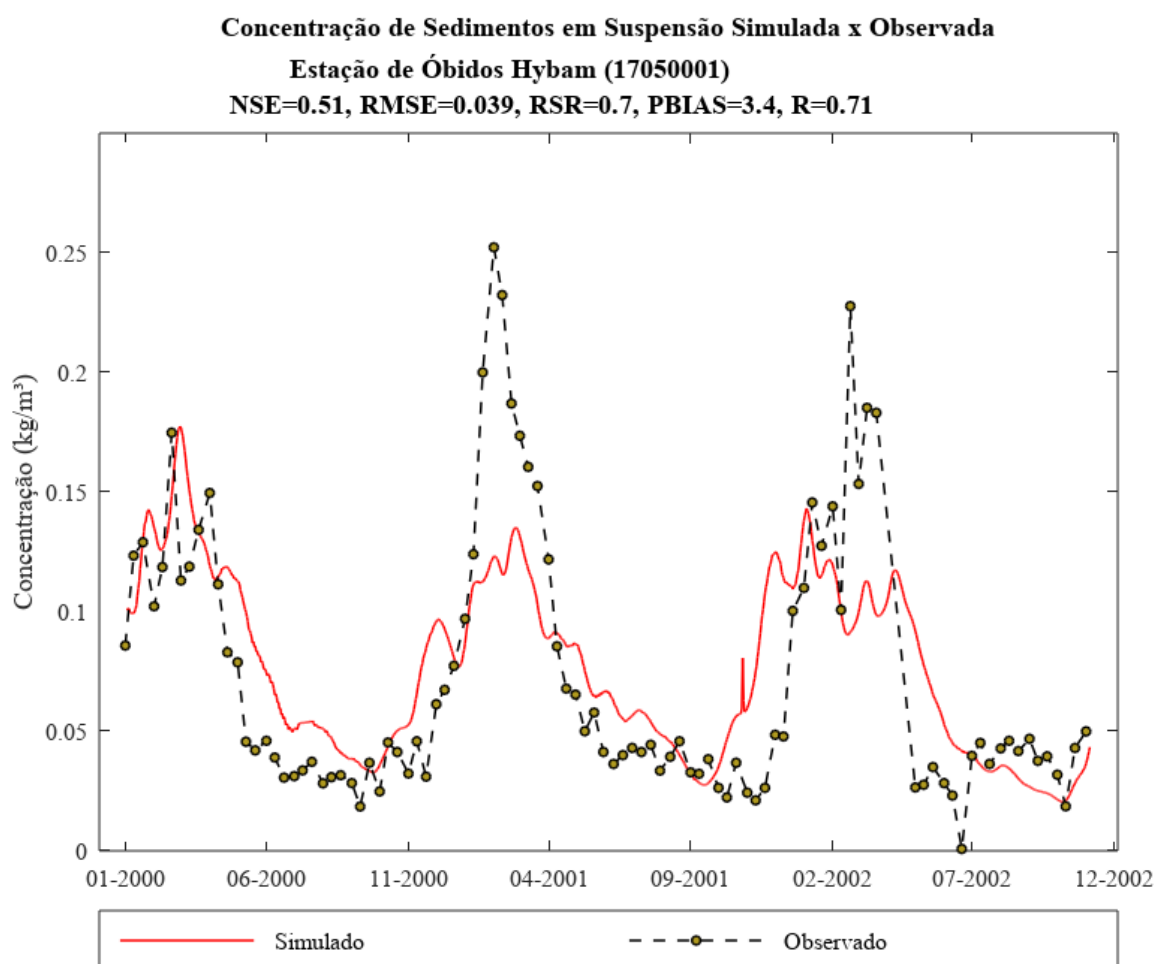


Figura 7 - Comparação entre a concentração de sedimentos em suspensão simulada e observada na estação de Óbidos (HYBAM -17050001).

A Figura 9 apresenta uma comparação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a vazão sólida simulada para o trecho de Óbidos, o trecho de entrada do Lago Grande de Curuai, o trecho de saída do Lago Grande de Curuai, o trecho de drenagem simulado e o trecho de entrada simulado do modelo de sedimentos Delft3D-SED. A partir dessas análises, foi possível

compreender melhor a dinâmica de erosão e propagação de sedimentos em suspensão na área de estudo. Os resultados indicam descargas de sedimentos sólidos entrando no Lago Grande de Curuai com valores médios e máximos de aproximadamente $9,11 \times 10^4$ e $3,10 \times 10^5$ toneladas por dia, resultando em um valor médio anual de $3,33 \times 10^7$ toneladas por ano. Na área de drenagem do lago, os resultados mostram valores médios e máximos de aproximadamente $1,26 \times 10^5$ e $4,11 \times 10^5$ toneladas por dia, resultando em um valor médio anual de $4,6 \times 10^7$ toneladas por ano. Os resultados indicaram diferenças em torno de $3,5 \times 10^4$ toneladas por dia entre o dreno e a entrada, com uma descarga sólida anual, deixando o lago 69% maior que a entrada do Lago Grande de Curuai.

Quanto ao rio Amazonas, as simulações indicaram descargas de sedimentos sólidos no dreno de simulação, com valores médios e máximos de aproximadamente $1,63 \times 10^6$ e $3,21 \times 10^6$ toneladas por dia, respectivamente. Esses valores foram superiores, em média, aos dados de entrada da simulação, em aproximadamente 7×10^5 toneladas por dia, diferença ainda maior do que a média das descargas sólidas que cruzaram o Lago Grande de Curuai, sugerindo uma parcela considerável de sedimentos sendo transportados devido à erosão contínua do rio Amazonas, apresentada nas simulações. Considerando os valores totais, as simulações apresentaram um valor de $5,96 \times 10^8$ toneladas por ano transportadas pelo rio Amazonas.

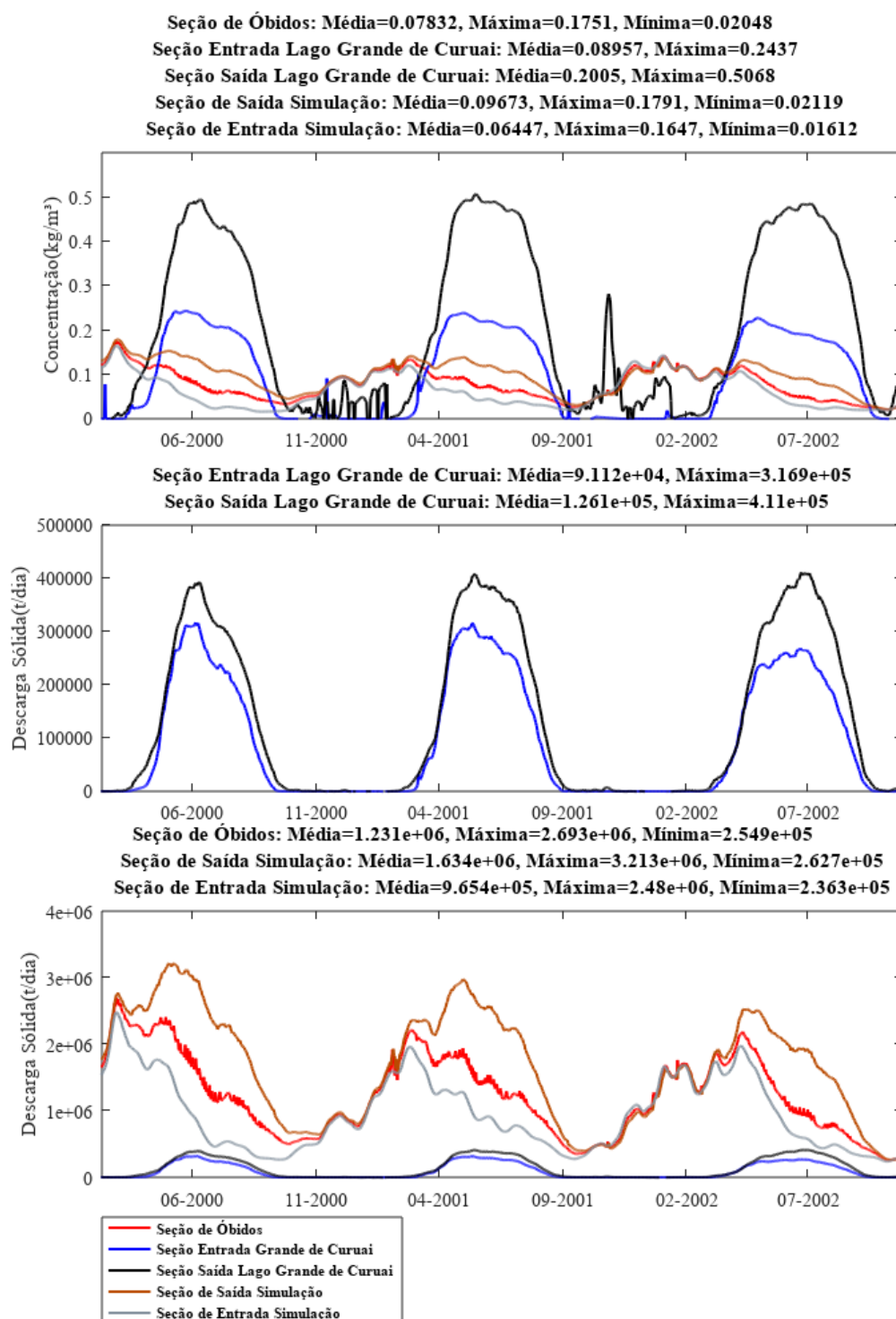


Figura 8 - Comparação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a descarga sólida simuladas para a seção de Óbidos, seção de entrada no Lago Grande de Curuai, seção de saída do Lago Grande de Curuai, seção de saída da simulação e seção de entrada da simulação do modelo de sedimentos Delft3D-SED.

A Figura 10 mostra a evolução espacial da concentração de sedimentos em suspensão ao longo do Lago Grande de Curuai durante um ano hidrossedimentológico. Tomou-se como exemplo o ano 2000, pois correspondeu ao período de aquisição do modelo de elevação digital SRTM. A partir das simulações, observou-se que por volta do final de março (quando a vazão média do rio Amazonas começa a se tornar significativa, iniciando o processo de transporte de sedimentos ao longo do lago), foram atingidos picos de concentração próximos ao início de julho, com

concentrações superiores a $0,5 \text{ kg/m}^3$, cruzando o lago de acordo com o padrão evidenciado anteriormente. De acordo com as simulações em épocas próximas ao início de setembro a concentração no Lago Grande de Curuai começa a se reduzir até atingir baixos valores nas épocas de vazões mínima do rio Amazonas

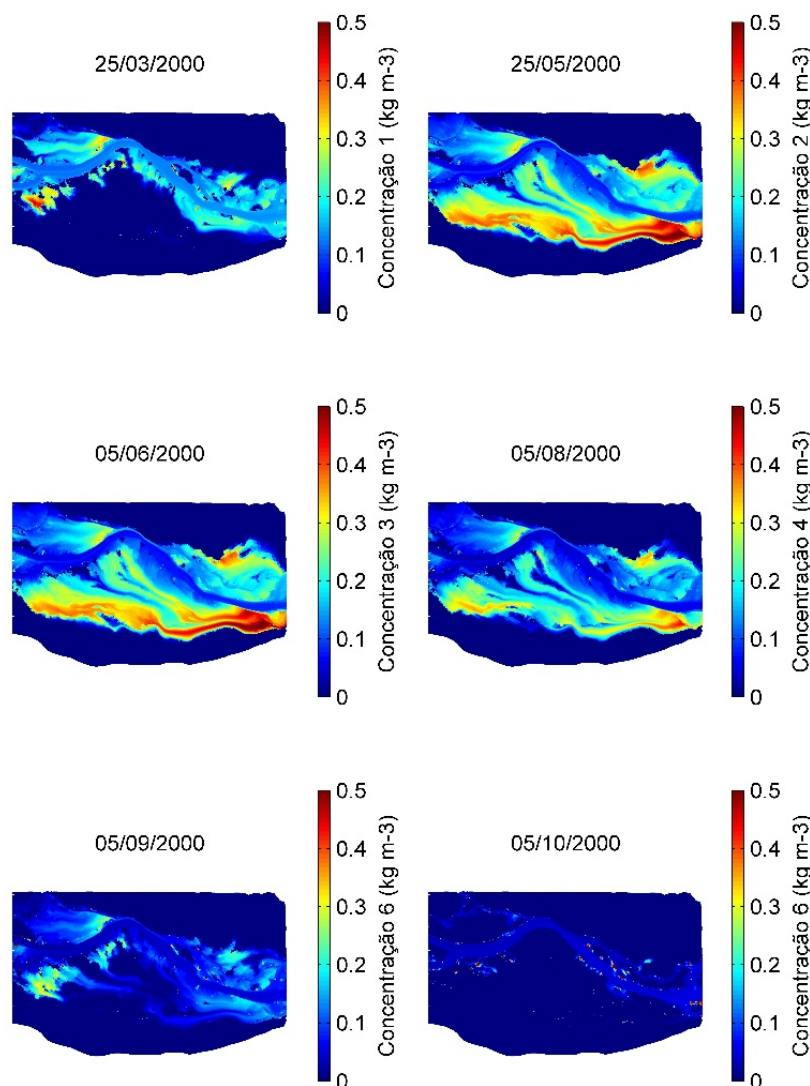


Figura 9 - Diferenças espaciais da concentração de sedimentos em suspensão simulados, em diferentes datas do ano de 2000.

A Figura 11 apresenta a espacialização da concentração de sedimentos em suspensão máxima simulada (no dia 05/06/2000), com detalhamento nas regiões de canais de ingresso e na saída do Lago Grande de Curuai, contando com a presença dos vetores de velocidades da água simuladas para o mesmo dia.

Referente à análise espacial da concentração de sedimentos em suspensão, passando pelo Lago Grande de Curuai, foi realizada uma comparação visual através de uma imagem do satélite Landsat 8, para um dia de alta vazão observada no Rio Amazonas (18/06/2015 – vazão de $262.673 \text{ m}^3/\text{s}$). Esta data não engloba o período de simulação, porém em virtude da resolução temporal do satélite (de 16 dias) e da grande presença de nuvens durante os períodos de cheia do Rio Amazonas, não foi possível encontrar uma imagem suficientemente representativa de um período de cheias do satélite Landsat 5, que apresenta imagens para o período de simulação

estudado. A imagem do Landsat 8 foi então comparada (Figura 12) com a concentração observada na simulação de data de maior vazão simulada (24/05/2000 – vazão simulada de 239.800 m³/s). A partir da comparação é possível perceber uma grande semelhança no padrão da pluma de sedimentos em suspensão, propagada através do Lago Grande de Curuai, observada na imagem e simulada a partir do modelo Delft3D.

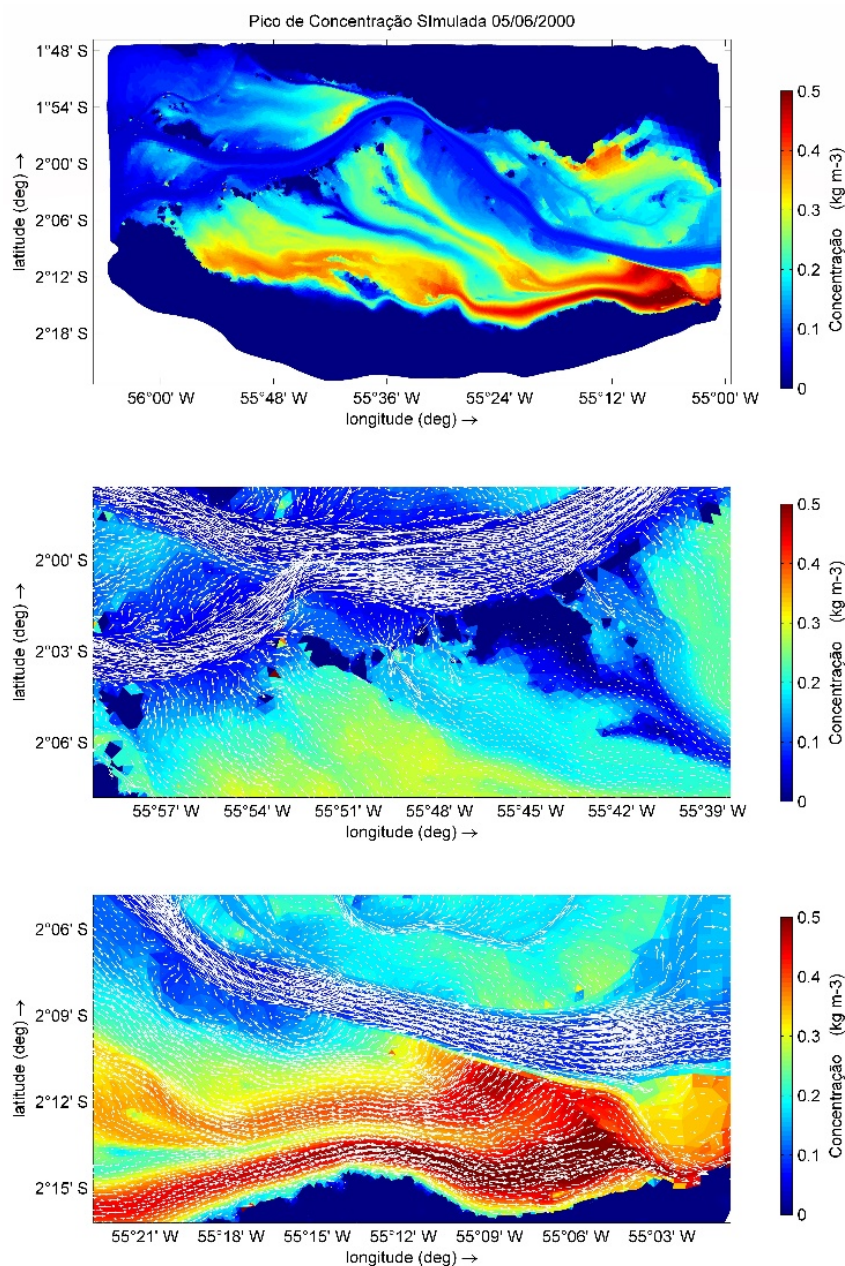


Figura 10 - Espacialização da concentração de sedimentos em suspensão simulada, no dia de maior concentração simulada (vetores de velocidades em branco).

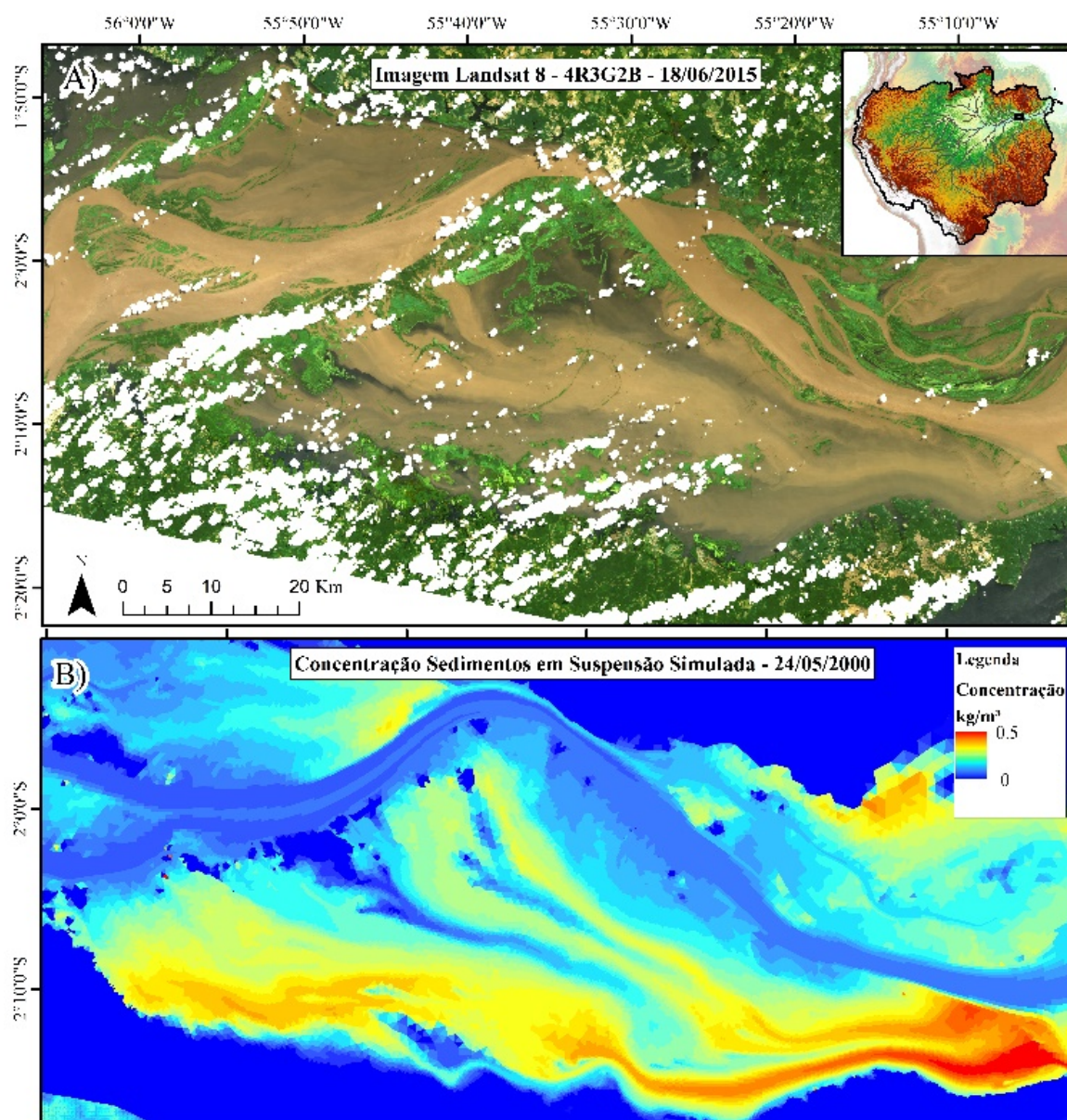


Figura 11 - Comparação entre concentração de sedimentos em suspensão, simulada no dia de maior vazão simulada ($239.800\text{m}^3/\text{s}$) com uma imagem do satélite Landsat 8 em um dia de alta vazão ($262.673\text{m}^3/\text{s}$) observada na estação de Óbidos.

A Figura 13 apresenta comparações entre as simulações realizadas e aproximações de sedimentos, com base nos trabalhos de Fassoni *et al.* (2019), Villar *et al.* (2018; 2013), e Yopez *et al.* (2018), visando compreender melhor a dinâmica sedimentar em duas regiões específicas: Lago Grande de Curuai e o trecho de Óbidos, na Amazônia. Imagens MODIS foram utilizadas para analisar pontos específicos nessas áreas. Para melhorar a qualidade dos dados, foi aplicado o processamento de computação em nuvem. Esse processo incluiu suavização temporal e espacial das imagens, bem como a remoção de pixels espúrios que pudessem comprometer a análise.

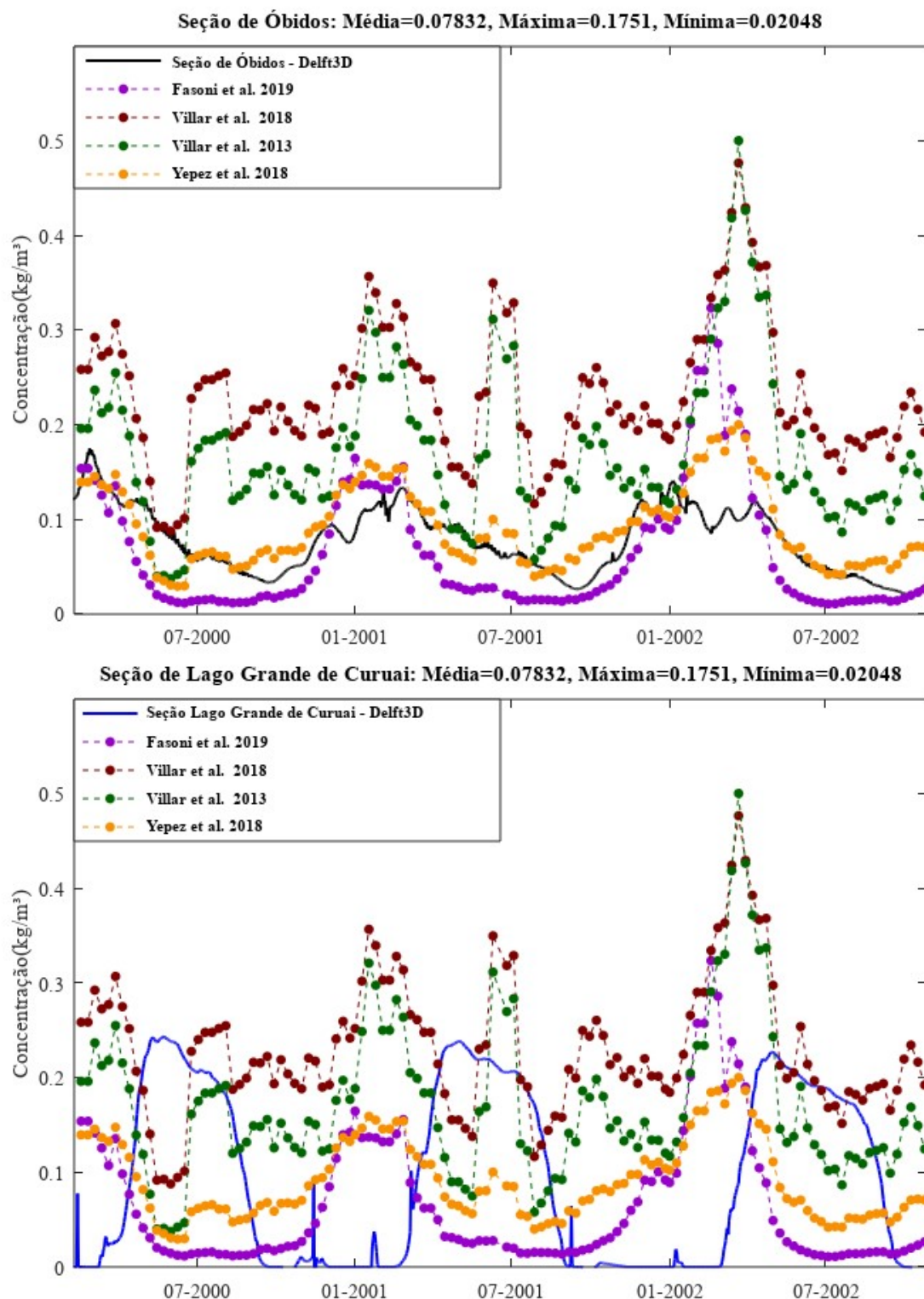


Figura 12 - Comparativo entre a concentração de sedimentos em suspensão simulada para a seção de Óbidos e do Lago Grande de Curuai com 4 trabalhos de aproximação por bandas de imagens de satélite MODIS.

Ao analisar os dados, observou-se semelhança significativa entre os trabalhos de Fasoni *et al.* (2019) e Yepez *et al.* (2018) para a secção de Óbidos. Isso sugere que essas abordagens são eficazes na representação da dinâmica de sedimentos nessa região. No entanto, para o trecho Lago Grande de Curuai, notou-se uma defasagem nos picos em relação aos dados de sensoriamento

remoto. Isso destaca os desafios de representar os processos de transporte e deposição de sedimentos em extensas áreas de várzea, como é o caso do Lago Grande de Curuai.

Os dados também indicam que sedimentos em suspensão não se acumulam no lago durante os períodos de baixa vazão do rio Amazonas. Esse fenômeno pode ser atribuído às representações inadequadas dos canais de saída do lago, aos valores de Manning adotados, favorecendo maiores velocidades de escoamento na saída do Lago Grande de Curuai, e até mesmo aos parâmetros de sedimento utilizados nas simulações, apesar de consistentes com a literatura.

7 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo investigar a interação de sedimentos no sistema baixo rio Amazonas-planície de inundação através de simulações numéricas utilizando o modelo Delf3D. Essas simulações permitiram inferir a magnitude das vazões do rio Amazonas que passam pelo Lago Grande de Curuai. Os resultados indicam uma vazão média, passando pelo lago de aproximadamente 5.000 m³/s, com valores máximos de 27.456 m³/s. Isso sugere que a vazão real do Rio Amazonas, que passa pela planície de inundação do Lago Grande de Curuai, é mais de 2% maior, em média, do que a vazão observada, com possíveis valores de pico superiores a 20.000 m³/s.

Uma compreensão espaço-temporal do fluxo de sedimentos na região da planície de inundação do Lago Grande de Curuai foi obtida, revelando um padrão de concentração sazonal apenas de fevereiro a setembro. Os resultados indicaram concentrações médias e máximas de sedimentos em suspensão, atravessando o lago a aproximadamente 0,088 e 0,24 kg/m³, respectivamente, com valores de pico de sedimentos atingindo aproximadamente 0,07 kg/m³ quando comparados ao trecho de Óbidos.

As simulações de sedimentos conduzidas neste estudo fornecem informações valiosas sobre a dinâmica de transporte e deposição de sedimentos na região amazônica. Embora apresentem defasagem em relação aos picos observados, permitiram identificar o padrão geral de dispersão de sedimentos na área da planície de inundação do Lago Grande de Curuai. Esses resultados ressaltam a necessidade de mais pesquisas para investigar a causa dos picos de defasagem de sedimentos e melhorar a compreensão da dinâmica de transporte e deposição de sedimentos em grandes planícies de inundação. Além disso, a realização de novas simulações e estudos é crucial para melhorar a precisão dos modelos e aprofundar nossa compreensão dos processos sedimentares na região amazônica.

O entendimento e o monitoramento da dinâmica dos sedimentos no rio Amazonas são essenciais para o manejo adequado dos recursos naturais e a conservação desse valioso ecossistema. Essas informações são vitais para a tomada de decisões informadas e implementação de medidas para a proteção e mitigação dos impactos ambientais na região amazônica.

8 REFERÊNCIAS

ALSDORF, D., HAN, S.-C., BATES, P., & MELACK, J. (2010). Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2448–2456. doi:10.1016/j.rse.2010.05.020

- BONNET, M. P., BARROUX, G., MARTINEZ, J. M., SEYLER, F., MOREIRA-TURCQ, P., COCHONNEAU, G., ... SEYLER, P. (2008). Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). *Journal of Hydrology*, 349(1-2), 18–30. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.10.055
- BOURGOIN, L. M., BONNET, M.-P., MARTINEZ, J.-M., KOSUTH, P., COCHONNEAU, G., MOREIRA-TURCQ, P., ... SEYLER, P. (2007). Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, 335(1-2), 140–156. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.11.023
- BOURGOIN, L. M., MARTINEZ, J. M., GRELAUD, J., FILIZOLA, N., & BOAVENTURA G. R. (2005). The role of flood plains in the hydrology and sediment dynamics of the Amazon River, Brazil. *IAHS Publication* 291: 1–10.
- BUARQUE, D., C., (2015). Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do rio Madeira. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental).
- CAVALCANTI NT, M. T., FARIAS, M. S. S. DE, & CAVALCANTI, J. M. M. (2012). Qualidade de sedimentos – Um estudo de caso na região de confluência dos rios piranhas e seridó no Rio Grande do Norte. *HOLOS*, 5, 151–166. doi:10.15628/holos.2012.1074
- CRISPIM, D. L., ISMAEL, L. L., SOUSA, T. M. I. DE, GARRIDO, J. W. A., & QUEIROZ, M. M. F. DE. (2015). Transporte e caracterização de sedimentos de fundo no Rio Piranhas em uma seção de controle próximo à sede do município de Pombal-PB. *HOLOS*, 3, 93–101. Doi:10.15628/holos.2015.2518
- DELTARES. (2021). Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics. Version 3.15.
- DIJKSTRA, Y. M., SCHUTTELAARS, H. M., SCHRAMKOWSKI, G., & BROUWER, R. L. (2019). Modelling the transition to high sediment concentrations as a response to channel deepening in the Ems River Estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. doi:10.1029/2018jc014367
- DUNNE, T., MERTES, L. A. K., MEADE, R. H., RICHEY, J. E., & FORSBURG, B. R. (1998). *Geological Society of America Bulletin*, 110(4), 0450. doi:10.1130/0016-7606(1998)110<0450:eosbtf>2.3.co;2
- DURÓ, G., CROSATO, A., & TASSI, P. (2016). Numerical study on river bar response to spatial variations of channel width. *Advances in Water Resources*, 93, 21–38. doi:10.1016/j.advwatres.2015.10.003
- FAGUNDES, H. DE O., FAN, F. M., DIAS DE PAIVA, R. C., SIQUEIRA, V. A., BUARQUE, D. C., KORNOWSKI, L. W., ... COLLISCHONN, W. (2020). Sediment flows in South America supported by daily hydrologic-hydrodynamic modeling. doi:10.1002/essoar.10503046.2
- FASSONI-ANDRADE, A. C., & PAIVA, R. C. D. DE. (2019). Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 221, 94–107. doi:10.1016/j.rse.2018.10.038
- Fassoni-Andrade, A. C., Paiva, R., Wongchuig, S., Barbosa, C., and Durand, F.: Expressive fluxes over Amazon floodplain units revealed by high resolution 2D modelling, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-439, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-439>, 2023
- FLORES, R. P., RIJNSBURGER, S., HORNER-DEVINE, A. R., SOUZA, A. J., & PIETRZAK, J. D. (2017). The impact of storms and stratification on sediment transport in the Rhine region of freshwater influence. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(5), 4456–4477. doi:10.1002/2016jc012362
- FÖEGER, L., B., (2019). Modelagem Hidrossedimentológica de Grandes Bacias com Propagação Inercial de Vazão: estudo de caso da baía do rio Madeira. Federal University of Espirito Santo.

- GIBBS, R. J. (1967). Amazon River: Environmental Factors That Control Its Dissolved and Suspended Load. *Science*, 156(3783), 1734–1737. doi:10.1126/science.156.3783.1734
- HU, K., DING, P., WANG, Z., & YANG, S. (2009). A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China. *Journal of Marine Systems*, 77(1-2), 114–136. doi:10.1016/j.jmarsys.2008.11.014
- IRION, G., DUNNE, W. J., & DE MELLO, J. A. S. N. (1997). The Large Central Amazonian River Floodplains Near Manaus: Geological, Climatological, Hydrological and Geomorphological Aspects. *The Central Amazon Floodplain*, 23–46. doi:10.1007/978-3-662-03416-3_2
- JAVERNICK, L., REDOLFI, M., & BERTOLDI, W. (2018). Evaluation of a numerical model's ability to predict bed load transport observed in braided river experiments. *Advances in Water Resources*, 115, 207–218. doi:10.1016/j.advwatres.2018.03.012
- 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(4), 623–640. doi:10.1007/s13157-011-0190-7
- JUNK, W.J., ED. (1997) *The Central Amazon Floodplain*. Berlin, Germany: Springer.
- KASPRAK, A., WHEATON, J., M., & HAFEN, K. (2015) A simplified morphodynamic model for gravel-bed rivers. *Proceedings of SEDHYD 2015 (3rd JFIC)*. April 2015, 2015.
- LUIJENDIJK, A.P. (2001). Validation, calibration and evaluation of Delft3D-FLOW model with ferry measurements. *Civil Engineering and Geosciences*. Student theses.
- MELACK, J. M., HESS, L. L., & SIPPEL, S. (1994). Remote sensing of lakes and floodplains in the Amazon basin. *Remote Sensing Reviews*, 10(1-3), 127–142. doi:10.1080/02757259409532240
- MERTES, L., SMITH, M., & ADAMS, J. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 43(3), 281–301. doi:10.1016/0034-4257(93)90071-5
- MOLINIER, M., GUYOT, J., CALLÈDE, J., GUIMARAES, V., & OLIVEIRA, E., FILIZOLA N., JR. (1997). *Hydrologie du bassin amazonien*.
- MOLINIER, M., GUYOT, J., OLIVEIRA, E., GUIMARAES, V. (1996). *Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents*.
- MOREIRA-TURCQ, P., BONNET, M.-P., AMORIM, M., BERNARDES, M., LAGANE, C., MAURICE, L., ... SEYLER, P. (2013). Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(1), 119–130. doi:10.1002/gbc.20022
- MOREIRA-TURCQ, P., BONNET, M.-P., AMORIM, M., BERNARDES, M., LAGANE, C., MAURICE, L., ... SEYLER, P. (2013). Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(1), 119–130. doi:10.1002/gbc.20022
- MOREIRA-TURCQ, P., SEYLER, P., GUYOT, J. L., & ETCHEBER, H. (2003). Exportation of organic carbon from the Amazon River and its main tributaries. *Hydrological Processes*, 17(7), 1329–1344. doi:10.1002/hyp.1287
- MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., & VEITH, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. doi:10.13031/2013.23153



- NEILL, C., ELSENBEEER, H., KRUSCHE, A. V., LEHMANN, J., MARKEWITZ, D., & DE O. FIGUEIREDO, R. (2006). Hydrological and biogeochemical processes in a changing Amazon: results from small watershed studies and the large-scale biosphere-atmosphere experiment. *Hydrological Processes*, 20(12), 2467–2476. doi:10.1002/hyp.6210
- PAARLBERG, A., GUERRERO, M., HUTHOFF, F., & RE, M. (2015). Optimizing Dredge-and-Dump Activities for River Navigability Using a Hydro-Morphodynamic Model. *Water*, 7(12), 3943–3962. doi:10.3390/w7073943
- RAHBANI, M. (2015). A comparison between the suspended sediment concentrations derived from DELFT3D model and collected using transmissometer – a case study in tidally dominated area of Dithmarschen Bight. *Oceanologia*, 57(1), 44–49. doi:10.1016/j.oceano.2014.06.002
- Richey, J. E., Mertes, L. A. K., Dunne, T., Victoria, R. L., Forsberg, B. R., Tancredi, A. C. N. S., & Oliveira, E. (1989). Sources and routing of the Amazon River Flood Wave. *Global Biogeochemical Cycles*, 3(3), 191–204. doi:10.1029/gb003i003p00191
- RUDORFF, C. M., MELACK, J. M., & BATES, P. D. (2014a). Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 1. Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge. *Water Resources Research*, 50(1), 619–634. doi:10.1002/2013wr014091
- SIOLI, H. (1951). Sobre a sedimentação na várzea do Baixo Amazonas. EMBRAPA, Repositório Institucional. Boletim Técnico. IAN, Belém, PA, n. 24, p. 45-65
- SIQUEIRA, V. A., PAIVA, R. C. D., FLEISCHMANN, A. S., FAN, F. M., RUHOFF, A. L., PONTES, P. R. M., ... COLLISCHONN, W. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815–4842. doi:10.5194/hess-22-4815-2018
- VAN MAREN, D. S., VAN KESSEL, T., CRONIN, K., & SITTONI, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95, 1–14. doi:10.1016/j.csr.2014.12.010
- VAN RIJN, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, The Netherlands.
- VILLAR, E. R., MARTINEZ, J.-M., LE TEXIER, M., GUYOT, J.-L., FRAIZY, P., MENESES, P. R., & OLIVEIRA, E. de. (2013). A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 45–54. doi:10.1016/j.jsames.2012.11.006
- VILLAR, E. R., MARTINEZ, J.-M., LE TEXIER, M., GUYOT, J.-L., FRAIZY, P., MENESES, P. R., & OLIVEIRA, E. DE. (2013). A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 45–54. doi:10.1016/j.jsames.2012.11.006
- WEI, X., KUMAR, M., & SCHUTTELAARS, H. M. (2018). Three-Dimensional Sediment Dynamics in Well-Mixed Estuaries: Importance of the Internally Generated Overtide, Spatial Settling Lag, and Gravitational Circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2), 1062–1090. doi:10.1002/2017jc012857
- WIDDOWS, J., FRIEND, P. L., BALE, A. J., BRINSLEY, M. D., POPE, N. D., & THOMPSON, C. E. L. (2007). Inter-comparison between five devices for determining erodability of intertidal sediments. *Continental Shelf Research*, 27(8), 1174–1189. doi:10.1016/j.csr.2005.10.006
- WILLIAMS, R. D., BRASINGTON, J., & HICKS, D. M. (2016a). Numerical Modelling of Braided River Morphodynamics: Review and Future Challenges. *Geography Compass*, 10(3), 102–127. doi:10.1111/gec3.12260

- WILLIAMS, R. D., BRASINGTON, J., HICKS, M., MEASURES, R., RENNIE, C. D., & VERICAT, D. (2013). Hydraulic validation of two-dimensional simulations of braided river flow with spatially continuous aDcp data. *Water Resources Research*, 49(9), 5183–5205. doi:10.1002/wrcr.20391
- WILLIAMS, R. D., MEASURES, R., HICKS, D. M., & BRASINGTON, J. (2016b). Assessment of a numerical model to reproduce event-scale erosion and deposition distributions in a braided river. *Water Resources Research*, 52(8), 6621–6642. doi:10.1002/2015wr018491
- YEPEZ, S., LARAQUE, A., MARTINEZ, J.-M., DE SA, J., CARRERA, J. M., CASTELLANOS, B., ... LOPEZ, J. L. (2018). Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela). *Comptes Rendus Geoscience*, 350(1-2), 20–30. doi:10.1016/j.crte.2017.08.004
- YOSSEF., M. (2016). Morphological model of the River Rhine branches in The Netherlands - From the concept to the operational model.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Nascimento Manara, E., Mainardi Fan, F., & Alvarez Scapin, B. . (2023). Challenges in Understanding Sediment Flow in Lago Grande de Curuai in Central Amazon: A 2D Numerical Modeling Approach. *HOLOS*, 3(39). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16372>

ABOUT THE AUTHORS:

E. N. MANARA

Engenheiro Hídrico formado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS).

E-mail: eduardonmanara@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-6683>

F. M. FAN

Professor Adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

E-mail: fernando.fan@ufrgs.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0371-7851>

B. A. SCAPIN

Engenheiro Hídrico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Especialista na área de recursos hídricos, com experiência em hidrologia, sistemas de informações geográficas (SIG) e modelagem hidráulica (física e numérica).

E-mail: brunoscapin11@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8013-468X>

Editor: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Ad Hoc Reviewer: Felipe Fernandes e Cristiano Poletto



Submitted October 19, 2023

Accepted December 1, 2023

Published: December 14, 2023