

Modelos hidrológicos-hidráulicos de grandes bacias: comparação entre modelos 1D e 2D na bacia do Rio Negro, Amazônia

Ayan Fleischmann¹ & Rodrigo Paiva² & Walter Collischonn³

Resumo – Modelos hidrológicos-hidrodinâmicos de grande escala são importantes ferramentas na gestão de recursos hídricos, e têm sido aplicados principalmente para simulação de sistemas rio-planície de inundação, com modelos hidráulicos 2D utilizando como condição de contorno estimativas de modelo 1D. Uma importante discussão neste sentido está relacionada ao custo-benefício de se utilizar modelos 1D ou 2D em distintas regiões, e, mais especificamente, sobre a relevância de se utilizar modelos 2D para representar processos na escala de uma bacia inteira. Este estudo apresenta uma adaptação do modelo MGB-IPH hidrodinâmico para representar fluxos 2D, computando tanto fluxos em canais quanto em planícies. A nova implementação é comparada com aplicações padrão 1D do modelo, considerando diferentes densidades de redes de drenagem em estudo de caso na bacia do Rio Negro, Amazônia (~700 mil km²). Os resultados indicaram que o modelo 2D tende a representar melhor os padrões de inundação da região, enquanto os modelos 1D representam melhor variação de níveis nas regiões de montante. A necessidade de definição de direções de fluxos para modelos 1D complica o seu uso em regiões muito planas. Próximas etapas envolverão uma maior validação do modelo com estimativas de áreas inundáveis e volumes armazenados em planícies.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológica; Hidrodinâmica; Rio Negro

Large scale hydrologic-hydraulic models: comparison between 1D and 2D models in the Negro River Basin, Amazon

Abstract – Large scale hydrologic-hydrodynamic models are important tools in water resources management, and have been mainly applied for simulation of complex river-floodplain systems, with 2D hydraulic models using 1D model estimates as boundary conditions. One important discussion in this context is related to the cost-benefit of using 1D or 2D models to represent process at a whole basin scale. This study presents then an adaptation of MGB-IPH hydrodynamic model to represent 2D fluxes, computing both channel and floodplain fluxes. The new implementation is compared to default 1D model applications, considering different drainage network densities with a case study in Negro River Basin, Amazon (~700.000 km²). Results indicated that the 2D model tends to better represent inundation patterns along the area, while 1D models are better in representing water level variation in upstream regions. The necessity of defining upstream-downstream relationships for 1D models complicates the usage of 1D models in very flat areas. Next steps of the study will evolve a thorough model validation with remote sensed flooded areas and floodplain storage volumes.

Keywords – Hydrological Modelling; Hydrodynamics; Negro River Basin

INTRODUÇÃO

Recentes avanços em modelagem hidrológica-hidrodinâmica de grande escala têm permitido o desenvolvimento de ferramentas que representem processos hidrológicos com relativo grau de complexidade, fundamentais para estudos relacionados, por exemplo, a previsão de cheias (Paiva *et al.*, 2012) e mudanças climáticas (Sorribas *et al.*, 2016). No contexto de grandes sistemas hídricos

¹ Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Email: ayan.fleischmann@gmail.com

² Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Email: waltercollischonn@gmail.com

³ Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Email: rodrigocdpaiava@gmail.com

(áreas superiores a $O(10^3)$ km²), extensas planícies de inundação existem nas mais diversas regiões hidro-climáticas, onde complexos sistemas hidráulicos rio-planície existem, para os quais muitos dos modelos que acoplam (de forma *offline* ou *online*) hidrologia e hidrodinâmica têm sido desenvolvidos (e.g., Paz *et al.*, 2011; Neal *et al.*, 2012; Paiva *et al.*, 2013; Pontes *et al.*, 2017). Exemplos de aplicações envolvem tanto modelos unidimensionais (1D) para escala de bacia (e.g., Amazônia, Paiva *et al.*, 2013), como modelos 1D utilizados como condição de contorno de modelos bidimensionais (2D) (e.g., Biancamaria *et al.*, 2009; Paz *et al.*, 2011) e modelos 2D aplicados para toda a bacia (e.g., Schumann *et al.*, 2016).

Há uma importante discussão na literatura relacionada a como melhor simular a hidrodinâmica de bacias hidrográficas em escala continental (ver discussão sobre “Continental River Dynamics”, Hodges, 2015), com que escala de detalhes, com que dimensão de processos hidrodinâmicos (1D, 2D, 3D) e com que ferramentas de análise e validação. Neste contexto, surgem questões como: quão necessário e relevante é um modelo 2D de escala de bacia, tanto para regiões planas e inundáveis, para as quais a maioria dos modelos 2D têm sido aplicados, como para regiões com rede de drenagem típica onde fluxos 1D com única conectividade montante-jusante existente (*sensu* Mateo *et al.*, 2017)? Qual o custo-benefício de simular uma bacia de forma 2D em relação a aplicações típicas 1D? O presente trabalho colabora a esta discussão através de comparações entre a versão 1D do modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-IPH e uma versão modificada capaz representar fluxos 2D ao longo da bacia, com uma aplicação no Rio Negro, Amazônia.

METODOLOGIA

Modelo MGB-IPH

MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007; Pontes *et al.*, 2017) é um modelo tipo chuva-vazão semi-distribuído, desenvolvimento para aplicação em grandes escalas (tipicamente maiores que 10.000 km²). De modo geral, a bacia hidrográfica é discretizada em minibacias, e em cada uma é calculado um balanço vertical de água no solo (interceptação vegetal, evapotranspiração, precipitação, infiltração no solo e geração de escoamento), de onde os volumes gerados são transferidos para reservatórios lineares dentro de cada minibacia e então para a rede de drenagem. Na versão 1D descrita por Pontes *et al.*, (2017), as vazões no rio são propagadas com o método inercial (equivalente a hidrodinâmico) proposto por Bates *et al.* (2010). Detalhes do modelo estão em Pontes *et al.* (2017).

Modelos de propagação 1D e 2D

O esquema 1D inercial (Bates *et al.*, 2010) de propagação de vazões do MGB-IPH é baseado na equação de Saint-Venant, onde o termo de aceleração advectiva da equação dinâmica é desprezado, de modo a obter a seguinte forma explícita da equação dinâmica para a face entre dois volumes de controle:

$$Q_i^{t+\Delta t} = \left(\frac{((Q_i^t) - g \cdot B \cdot \Delta t \cdot (h_{flow_i} \cdot s_{flow_i}))}{\left(1 + \frac{g \cdot \Delta t \cdot h_{flow_i} \cdot (|Q_i^t|) \cdot n^2}{B \cdot (h_{flow_i})^{10/3}} \right)} \right) \quad (1)$$

Em que Q_i é a vazão da face i nos tempos t e $t+\Delta t$, g a aceleração da gravidade, B a largura do canal, h_{flow} a profundidade de fluxo, s_{flow} a declividade da linha d'água entre as duas células que

definem a face i , e n o número de Manning. A equação da continuidade é definida no centro de cada volume de controle e está dada por:

$$\frac{V_i^{t+\Delta t} - V_i^t}{\Delta t} = \sum Q_{in}^{t+\Delta t} - \sum Q_{out}^{t+\Delta t} - E \quad (2)$$

Onde V_i é o volume armazenado no sistema canal+planície i , Q_{in} e Q_{out} as vazões que entram e saem do sistema, respectivamente, e E a evaporação de água aberta do sistema.

O modelo 1D considera a planície como zona de armazenamento (fluxo zero, com rugosidade infinita), onde há apenas fluxo efetivo no canal de calha retangular. Fluxos são calculados entre pares de minibacias conectados por uma relação de montante e jusante. Por sua vez, o esquema 2D é baseado na proposta de Neal *et al.* (2012) para o modelo LISFLOOD-FP ‘*subgrid*’, desenvolvido para simulação de grandes regiões planas. O domínio é discretizado em células com resolução espacial de $O(10^0)$ km, onde para cada célula são derivadas estimativas ‘*subgrid*’ da rede de drenagem existente. No esquema adotado no MGB-IPH 2D, dois fluxos são calculados entre duas células adjacentes, um para o fluxo canalizado (‘*channel flow*’) e outro para o fluxo em planície, quando o nível d’água na célula está acima do nível de extravasamento do canal ou quando não há canal na célula. Fluxos de canal são trocados entre todos os vizinhos de uma dada célula que possuam canal definido (D8), e fluxos de planície entre os quatro vizinhos ortogonais. Uma adaptação importante adotada aqui é relacionada à estimativa do fluxo de planície: enquanto no modelo LISFLOOD a calha de fluxo ativo dentro de uma célula é adotada como composta por dois patamares (‘*two-stage channel*’), no MGB-IPH adota-se uma calha retangular para o canal, mas uma calha da planície variável com o nível de água, obtido por relação nível-área inundada da topografia local de cada célula (ver Pontes *et al.*, 2017 para derivação desta relação para uma dada célula ou ‘*unit-catchment*’, na definição deste último). A largura do fluxo de planície é definida como a relação entre a área inundada e o comprimento de célula em um dado intervalo de tempo. A profundidade de fluxo é adotada como a profundidade média (volume inundado / área inundada), computada durante pré-processamento para cada nível d’água (curva nível-profundidade média).

Área de estudo e testes realizados

As versões 1D e 2D do modelo foram avaliadas e comparadas na bacia do Rio Negro, na Amazônia (Figura 1a), com cerca de 700.000 km². A bacia possui complexos sistemas de planície de inundação associados ao trecho principal do Rio Negro, com arquipélagos como os de Mariuá e Anavilhanas, e planícies interfluviais associadas a campinas e campinaranas com solo arenoso que inundam sazonalmente devido a acúmulo de chuva local, especialmente na região da confluência entre rios Negro e Branco e no médio Branco (Figura 1b para estimativa de máxima área inundável de Melack e Hess (2010)). Por sua vez, as regiões de montante apresentam trechos de grande declividade, incluindo montanhas *tepui*s como o Monte Roraima, configurando um interessante estudo de caso para comparação de modelos 1D e 2D, sendo que em regiões montanhosas com declividade os primeiros são tipicamente julgados como satisfatórios.

O modelo MGB-IPH 1D foi aplicado utilizando o método padrão de aplicação deste, conforme descrição em Pontes *et al.* (2017), onde a bacia é discretizada em minibacias baseadas em trechos de igual comprimento da rede de drenagem (10 km). A aplicação 2D apresentada aqui foi estruturada considerando uma bacia dividida em células quadradas de 4 x 4 km. O processo chuva-vazão foi calibrado utilizando valores de parâmetros regionais de Paiva *et al.* (2013) e considerando um único conjunto de parâmetros para toda a bacia do Rio Negro, de modo a diminuir questões

relacionadas a “*overparameterization*” para o exercício de comparação de modelos. As forçantes do modelo chuva-vazão foram normais climatológicas do CRU e precipitação do MERGE (Rozante et al., 2010), e a simulação realizada para o período 1999-2014. O resultado dos modelos foram comparados com níveis in-situ de estações da Agência Nacional de Águas (ANA) apresentados na Figura 1.

Um importante aspecto é a rede de drenagem utilizada para definição dos canais a serem simulados: quanto mais canais definidos, mais rapidamente a água tenderá a ser drenada para jusante. Assim, neste estudo, foram realizados os seguintes três testes, de modo a comparar as alternativas de modelagem 1D com rede de drenagem pouco e muito densa com o modelo 2D:

- (i) Modelo 1D com densa rede de drenagem (1D-HD) (Figura 2);
- (ii) Modelo 1D com esparsa rede de drenagem (1D-LD) (Figura 2);
- (iii) Modelo 2D com densa rede de drenagem.

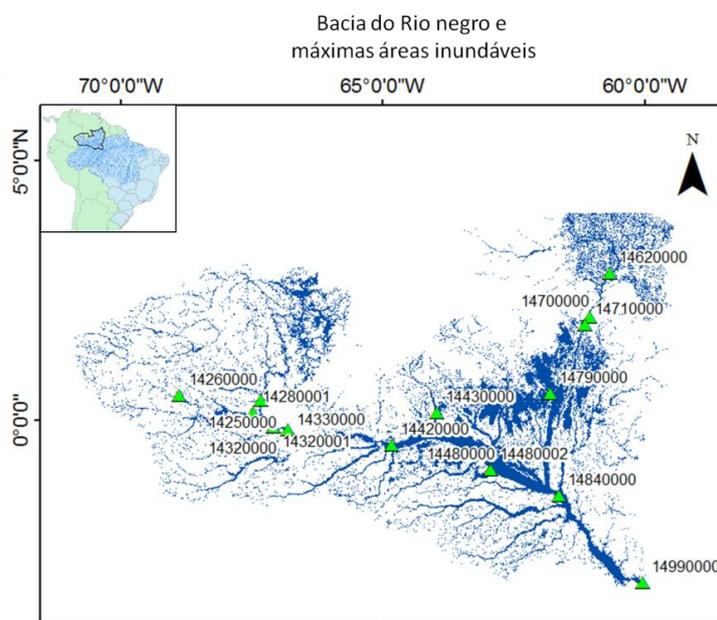


Figura 1. Localização da bacia do Rio Negro e máscara de água de áreas inundáveis baseada em Melack e Hess (2010).

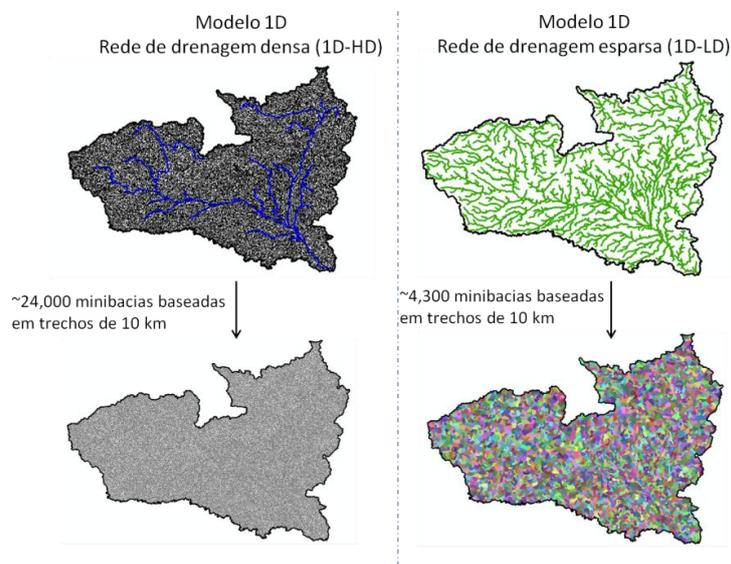


Figura 2. Redes de drenagem utilizadas para definição das minibacias e simulação 1D.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados de anomalia de nível ($Anomalia = x - \bar{X}$; utilizada para evitar diferenças nas referências dos níveis) estimados pelos modelos 2D, 1D-HD e 1D-LD para postos do trecho principal do Rio negro estão apresentados na Figura 3. De modo geral, postos mais a montante (São Felipe, São Gabriel da Cachoeira e Curicuriari) apresentaram um comportamento parecido para os três modelos, enquanto que os três de jusante (Serrinha, Barcelos e Moura) geraram estimativas distintas. O modelo 2D apresentou resultados superiores de nível em Serrinha e Barcelos, enquanto tanto 1D-HD quanto 1D-LE apresentaram uma melhor representação do processo de subida e descida dos níveis em Moura.

A Figura 4 apresenta eficiência de Nash-Sutcliffe para todos os postos com nível in-situ disponíveis, onde se observa que os modelos apresentaram performance similar em três estações, e que o modelo 2D (1D) foi superior em 5 (3) locais. Estas informações espacializadas indicam que o modelo 2D teve melhor performance nos trechos de jusante ao longo das principais áreas inundáveis da bacia. Isto está relacionado com a maior capacidade deste em representar a condutividade hidráulica do rio principal, independente dos valores de geometria hidráulica de largura e profundidade da calha fluvial utilizados (baseados em relação geomorfológica com área de drenagem de Paiva et al., 2013). Os modelos 1D não têm a capacidade de representar trocas de fluxos entre trechos de rios adjacentes que não estejam conectados pela relação pré-estabelecida de montante-jusante, de modo que passam a ser bastante sensíveis aos valores de largura e profundidade da calha fluvial adotados. Por outro lado, modelo 1D foram superiores nos trechos de montante, possivelmente associados a errôneos padrões de fluxos em planícies no 2D que não representam a realidade destas áreas bastante declivosas.

A dificuldade dos modelos 1D reflete-se mais claramente na estimativa de áreas inundáveis. A Figura 5a apresenta a máxima área inundável simulada pelos três cenários, e mostra que o modelo 2D, por não necessitar a pré-definição de direções de fluxo montante-jusante, consegue representar o fluxo que ocorre na região em destaque (afluente do Rio Branco que flui na direção sul) no sentido norte-sul, enquanto os demais cenários, por possuírem uma errônea direção de fluxo, têm um errado padrão de fluxos em que parte do rio flui para norte, e parte para sul. Além disso, é evidente a diferença entre 1D-HD e 1D-LD nos mapas de inundação, onde a rede de drenagem pouco densa (1D-LD) gera bem menos inundação que no outro caso. Isto reflete a forte dependência que o modelo tem à densidade de rede de drenagem adotada, o que é corroborado pela avaliação de série temporal de áreas inundadas (Figura 5b), salientando a diferença existente entre os diversos modelos.

Outro aspecto relevante para a comparação entre modelos é o tempo de processamento entre eles. O modelo 1D calcula fluxo apenas nos canais, enquanto o 2D computa fluxos tanto de canal quanto planície. Além disso, o número de elementos (minibacias para 1D e células para 2D) está diretamente relacionado ao tempo de processamento, sendo que neste estudo os modelos 1D-HD, 1D-LD e 2D tiveram, respectivamente, 4327, 24115 e 39882 elementos. De modo geral, para o CPU utilizado (Intel Core i5-2450M 8GB RAM), os modelos 1D-LD, 1D-HD e 2D levaram, respectivamente, 10 min (sem paralelização), 2h30 (sem paralelização) e 8h (com paralelização OpenMP) para simular um período de 10 anos, de modo que o modelo bidimensional é bastante mais custoso que os demais.

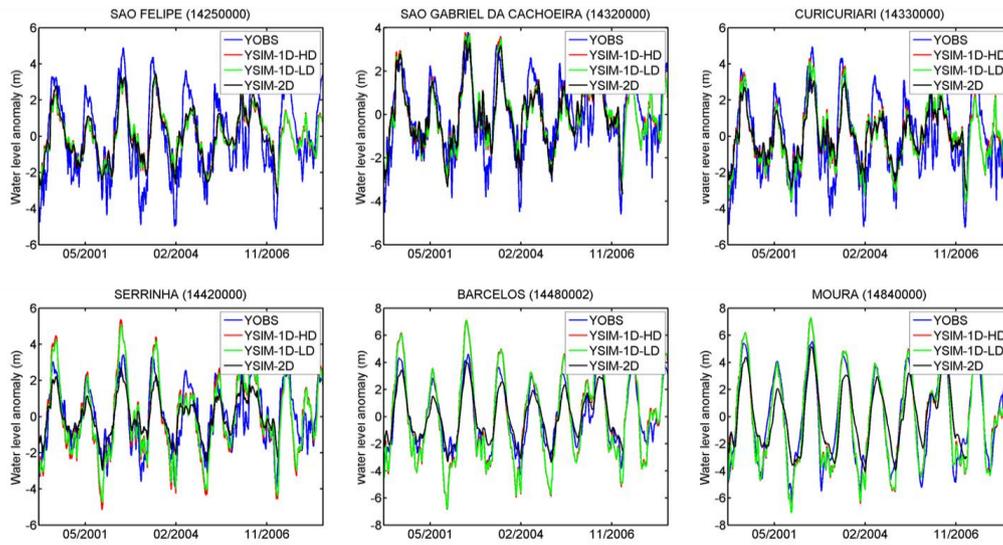


Figura 3 – Comparação entre simulações dos cenários 1D-HD, 1D-LD e 2D e níveis observados in-situ.

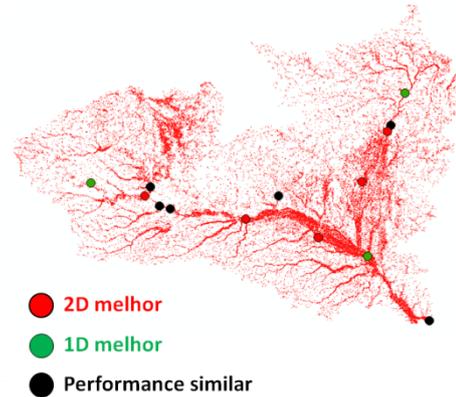
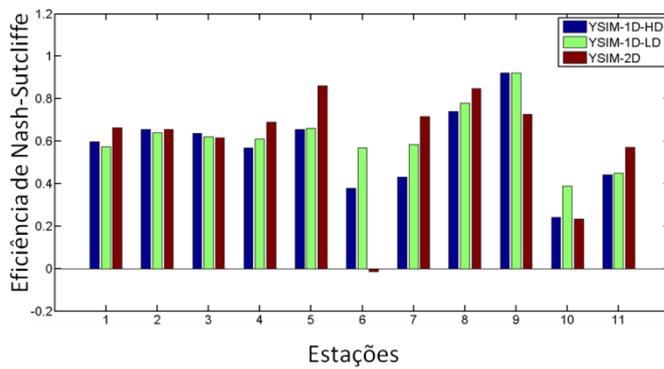


Figura 4 – Performance dos diferentes modelos quanto a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) entre modelo e nível observado in-situ, e espacialização dos valores de NSE na bacia, indicando qual modelo teve melhor performance em cada estação. Em vermelho está plotado o mapa de máximas áreas inundadas simulado pelo modelo 2D.

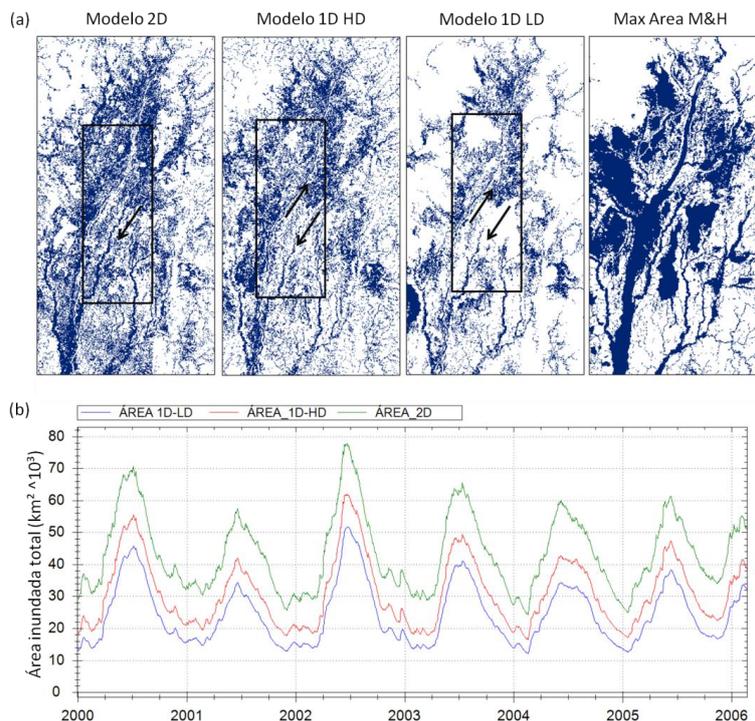


Figura 5 – (a) Estimativa de máxima área inundada via modelos 2D, 1D-HD e 1D-LD e via classificação de imagens de radar da missão JERS-1 (Melack e Hess, 2010 – M&H). As setas indicam a direção dos fluxos nos distintos modelos; ver texto para discussão. (b) Série temporal de área inundada para os três modelos.

CONCLUSÃO

O presente estudo aborda uma comparação entre modelos 2D e 1D de escala de bacia, com aplicação para a bacia do Rio Negro na Amazônia. Resultados indicaram que o modelo 2D tende a representar melhor os processos de inundação e padrões de áreas inundadas. Níveis foram melhor estimados pelos modelos 1D nas regiões declivosas de montante, enquanto nas áreas planas de jusante, o 2D foi superior. Este último também apresentou um elevado tempo de processamento (>8h para 10 anos de simulação), enquanto o modelo 1D-LD foi processado em 10 min, o que corrobora tendências atuais de modelos de utilizar modelos 1D como condição de contorno de modelos 2D, aplicados em regiões planas, desde que haja um satisfatório mapa de direção de fluxos para estimativa das conexões montante-jusante necessárias para 1D.

Desenvolvimentos futuros desta pesquisa envolverão (i) comparação com modelo 2D com diferentes resoluções espaciais e outras densidades de rede de drenagem, (ii) validação com estimativas de séries temporais de áreas inundáveis via sensoriamento remoto e (ii) estimativas de volume de água armazenado nas planícies.

REFERÊNCIAS

BATES, P.; HORRITT, M.; FEWTRELL, T.J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology* 387(1-2), pp. 33-45.

BIANCAMARIA, S.; BATES, P.D.; BOONE, A., MOGNARD, N.M. (2009). Large-scale coupled hydrologic and hydraulic modelling of Ob River. *J. Hydrol.* 379, PP. 136-150.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C.E.M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences* 52(5), pp. 878-895.

HODGES, B. (2013). Challenges in continental river dynamics. *Environmental Modelling & Software* 50, pp.16-20.

MATEO, C.M.R.; YAMAZAKI, D.; KIM, H.; CHAMPATHONG, A.; VAZE, J.; OKI, T., (2017). Impacts of spatial resolution and representation of flow connectivity on large-scale simulation of floods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* doi:10.5194/hess-2016-620.

MELACK, J.M.; L. HESS. (2010). Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin. In W.J. Junk and M. Piedade (org.). *Amazonian floodplain forests: Ecophysiology, ecology, biodiversity and sustainable management*. Ecological Studies, Springer.

NEAL, J.; SCHUMANN, G.; BATES, P.D. (2012). A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resour. Res.* 48, W11506. <http://dx.doi.org/10.1029/2012WR012514>.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. (2002). A high-resolution data set of surface 1093 climate over global land areas. *Climate Research* 21, 1-25.

PAIVA, R.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.P.; GONÇALVES, L.G. (2012). On the sources of hydrological predictions uncertainty in Amazon. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, pp. 3127-3137.

PAIVA, R.; BUARQUE, D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.P. FRAPPART, F.; CALMANT, S.; Mendes, C.A.B. (2013). Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, 49, pp. 1-18.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; C. E. M. TUCCI; PADOVANI, C. (2011). Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). *Hydrol. Processes* 25(9), pp. 1498–1516.

PONTES, P.; FAN, F.; FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; BUARQUE, D.; SIQUEIRA, V.; JARDIM, P.; SORRIBAS, M.; COLLISCHONN, W. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling & Software* 94, pp. 1-20.

ROZANTE, J.; MOREIRA, D.; GONÇALVES, L.; VILA, D. (2010). Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and validation over South America. *Weather and Forecasting* 25, pp. 885-894.

SCHUMANN, G.; STAMPOULIS, D.; SMITH, A.; SAMPSON, C.; ANDREADIS, K.; NEAL, J.; BATES, P. (2016). Rethinking flood hazard at the global scale. *Geophysical Research Letters* 43, pp. 10249-10256.

SORRIBAS, M.; PAIVA, R.; MELACK, J.; BRAVO, J.M.; JONES, C.; CARVALHO, L.; BEIGHLEY, E.; FORSBERG, B.; COSTA, M. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon Basin. *Climatic Change* 136(3), pp. 555-570.