

INTEGRANDO RESERVATÓRIOS E PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE CHEIAS EM GRANDES BACIAS: APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO ITAJAÍ-AÇU

Ayan Fleischmann¹; Walter Collischonn²; Rodrigo Paiva³

ABSTRACT – Recent advances in hydrological modeling have allowed the development of coupling approaches that simulate hydrodynamic processes related to floodplains, flood wave diffusion, backwater effects, as well as reservoirs for flood attenuation. This study presents an application of the MGB model for the Itajaí-Açu river basin in Santa Catarina state in Brazil, with an integrated approach that simulates reservoir routing in the three existing flood control dams in the basin. Results indicate a satisfactory model Modelagem hidrológico-hidrodinâmica, Controle de cheias, Reservatórios calibration with both floodplain and reservoir effects. Nash-Sutcliffe metric values ranged between 0,54 and 0,84. Analysis of flood frequency curves in different simulation scenarios indicates a major role of floodplains on flood attenuation in Itajaí do Oeste and Itajaí-Açu mainstem rivers, while reservoirs in Itajaí do Norte and Itajaí do Sul present a major relevance. The developed model allows the generation of flooded areas maps at different simulation scenarios (e.g., construction of new dams or levees), representing an interesting tool for flood management at the basin scale.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológico-hidrodinâmica, Controle de cheias, Reservatórios

1 - INTRODUÇÃO

Inundações estão entre os desastres naturais que mais afetam a população humana. O aceleramento da urbanização e a construção de cidades às margens de rios, bem como a perspectiva de mudanças climáticas e alterações de uso do solo, agregam muitas incertezas à gestão de risco de inundações (Di Baldassarre et al., 2013; Hirabayashi et al., 2013; Winsemius et al. 2013; Bloschl et al., 2015). Por outro lado, apesar de serem cada vez mais preteridas em relação a medidas não-estruturais como zoneamento e previsão de vazões (Barraqué et al., 2014), medidas estruturais (reservatórios, diques, etc.) são ainda bastante utilizadas ou propostas para o controle de cheias no Brasil.

Neste contexto, torna-se relevante o desenvolvimento de ferramentas de simulação que permitam integrar processos hidrológicos (transformação chuva-vazão) e hidrodinâmicos

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, ayan.fleischmann@gmail.com, (51)3308-7511

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, waltercollischonn@gmail.com, (51)3308-7511

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, rodrigocdpaiva@gmail.com, (51)3308-7511

(planícies de inundação, remanso, etc.) com efeitos de medidas estruturais em escala de bacia (Paz et al., 2011; Neal et al., 2012; Paiva et al., 2013; Seibert et al., 2014; Tanaka et al., 2017), a fim de compreender a dinâmica de inundação e avaliar alternativas de cenários de intervenção de forma integrada. Além disso, planícies de inundação exercem um papel fundamental na atenuação de cheias, enquanto em muitas bacias cidades e atividades econômicas (e.g., áreas agrícolas, polos industriais) estão presentes diretamente dentro destas planícies.

A bacia do rio Itajaí-Açu é um típico caso deste tipo, para a qual o emprego de modelagem hidrológica-hidrodinâmica pode trazer muitos benefícios para a gestão de desastres naturais, permitindo o desenvolvimento de sistemas de previsão, avaliação integrada de riscos a inundação, etc. Neste contexto, o presente estudo apresenta uma metodologia integrada de simulação de reservatórios e modelagem hidrológica-hidrodinâmica com o modelo MGB para esta bacia.

2 - MÉTODOS

2.1 - Área de estudo: bacia do rio Itajaí-Açu

A bacia do rio Itajaí-Açu possui 15.000 km², e apresenta um longo histórico de danos relacionados a cheias. Estima-se, por exemplo, que a histórica cheia de 1983 tenha gerado prejuízos da ordem de 1 bilhão de reais (Frank, 2003). Igarapé (2018) estimou que das 10 cidades brasileiras com maior número de pessoas deslocadas devido a desastres naturais, três estão na bacia, sendo que Blumenau apresenta o maior valor do país (140.000 pessoas deslocadas entre 2000-2017). As principais cidades da bacia estão localizadas ao longo do rio Itajaí ou importantes tributários, como Rio do Sul, Blumenau e Brusque. Cerca de 1.5 milhão de pessoas vivem na bacia.

Existem três grandes barragens de controle de cheias na bacia do Itajaí-Açu, nos rios Itajaí do Sul, Itajaí do Oeste e Itajaí do Norte (Pinheiro & Frank, 2003), e eventos recentes (e.g., cheia de 2011) têm promovido novamente o debate sobre a construção de novas medidas estruturais na bacia, como diques, novas barragens, derrocamento, entre outros projetos (JICA, 2011). Estes fatos tornam a bacia um importante caso de estudo para avaliação integrada de atenuação de cheias. A Figura 1 apresenta a bacia, os postos fluviométricos e pluviométricos utilizados neste estudo, bem como as barragens de controle de cheia mencionadas.

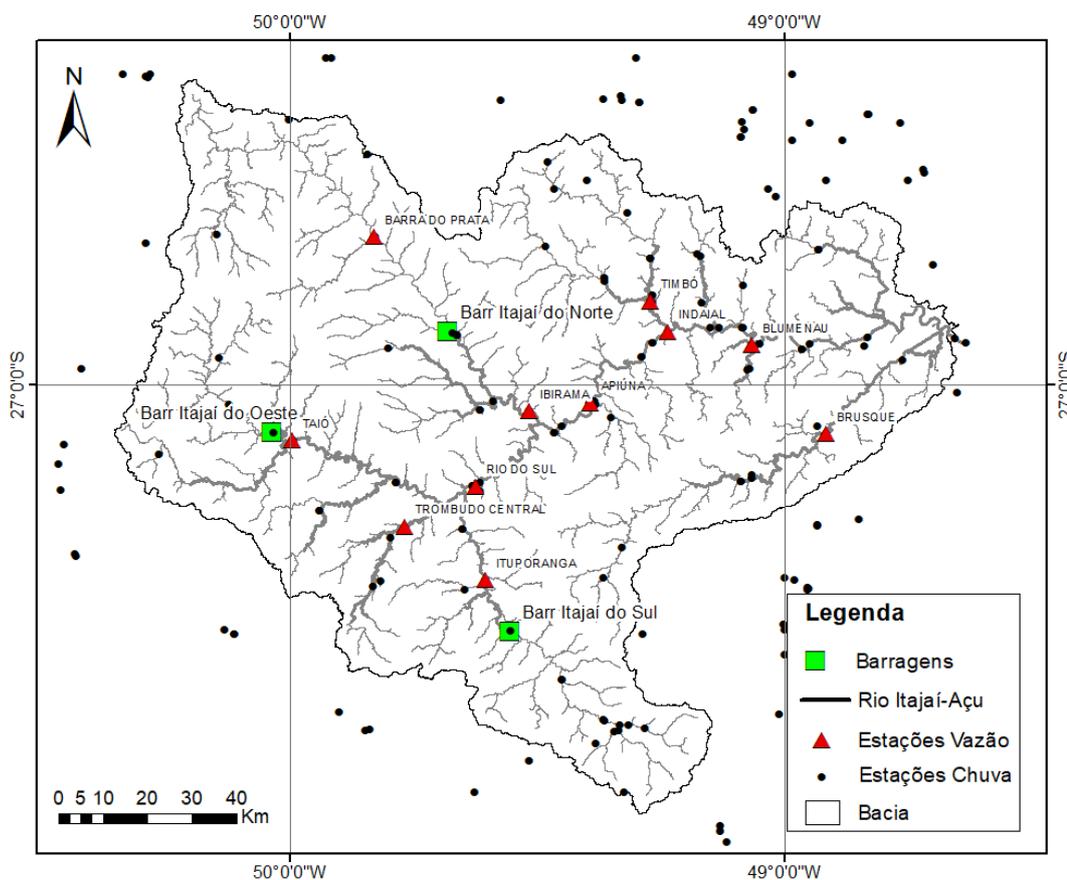


Figura 1 – Bacia do rio Itajaí-Açu, postos fluviométricos e pluviométricos utilizados e barragens de controle de cheia.

2.2 - Modelo MGB e aplicação na bacia do Itajaí-Açu

O modelo MGB (Collischonn et al., 2007; Pontes et al., 2017) foi aplicado à bacia do rio Itajaí-Açu. É um modelo semi-distribuído que representa processos hidrológicos verticais (interceptação vegetal, infiltração de água no solo, geração de escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo) e processos hidrodinâmicos (armazenamento em planícies de inundação, efeitos de remanso, difusão de ondas de cheia). Detalhes do modelo podem ser encontrados em Pontes et al. (2017).

A bacia foi discretizada em 1118 minibacias, oito sub-bacias e 11 unidades de respostas hidrológicas (de acordo com mapas de uso e tipo de solo do EPAGRI/CIRAM, disponível em < <http://ciram.epagri.sc.gov.br/>>), seguindo uma aplicação padrão do MGB de acordo com Pontes et al. (2017). A topografia da planície de inundação foi extraída do modelo digital de elevação disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (disponível em < <http://sigsc.sds.sc.gov.br/>>), que foi degradado para uma resolução espacial de 30 m para permitir o processamento dos dados. O modelo MGB foi simulado no período 1950-2016, forçado com precipitação diária observada da ANA (Figura 1) e dados de clima de normais climatológicas

da estação Indaial do INMET. Largura e profundidade de calha cheia dos trechos de rio foram obtidas com relações geomorfológicas que relacionam estas variáveis à área de drenagem: $W = 0.95 * A_d^{0.5}$ e $H = 0.3 * A_d^{0.3}$, onde W é a largura de calha cheia, H a profundidade de calha cheia e A_d a área de drenagem. O coeficiente de Manning foi adotado como 0.03 para toda a bacia. A condição de contorno de jusante foi definida como uma profundidade normal com declividade de 10 cm/km. Por simplicidade os efeitos de maré não foram considerados na condição de jusante.

Os três reservatórios existentes foram simulados através da substituição da equação de propagação inercial em rios (Pontes et al., 2017) pela equação de defluência de cada barragem, isto é, pelas equações de orifícios de fundo e vertedores de cada barragem. As informações de cada reservatório foram obtidas em Pinheiro & Frank (2003). Os reservatórios foram considerados como se as comportas dos orifícios de fundo estivessem sempre abertas.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de solo do modelo foram ajustados para o período de 1950-2016 para os 11 postos fluviométricos apresentados na Figura 1. A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores de Nash-Sutcliffe (NSE) obtidos, que variam entre 0,54 e 0,84, de forma que o modelo pode ser considerado satisfatório. A Figura 2 apresenta hidrogramas simulados (com e sem reservatório) e observados na cidade de Ituporanga, localizada no rio Itajaí do Sul e a jusante da barragem Sul. Nota-se claramente o efeito da barragem em liberar volumes na recessão do hidrograma, se aproximando bastante da vazão simulada. A subestimativa no pico no cenário com reservatório (em vermelho) pode ter ocorrido devido a uma errônea operação da barragem adotada (i.e. comportas sempre abertas). É interessante também notar que a calibração foi realizada levando em conta efeitos de planícies e reservatórios. De outra forma, poderia-se ajustar o modelo com uma propagação não hidrodinâmica e sem reservatórios (e.g., apenas com o método Muskingum-Cunge), de forma a obter bons valores de NSE, porém com uma ruim representação da recessão, por exemplo.

Para avaliar o efeito de reservatórios e planícies de inundação na estimativa de vazões máximas, a Figura 3 apresenta as curvas de frequência para as localidades de Taió, Ituporanga, Ibirama e Blumenau (Figura 1). A figura apresenta as vazões máximas anuais obtidas em diferentes cenários de simulação (com e sem planícies de inundação e barragens) e a respectiva frequência, sendo a posição de plotagem baseada na fórmula de Weibull. De forma geral, a diferença entre a curva vermelha e a preta pode ser interpretada como indicativa do efeito dos reservatórios, enquanto a diferença entre curvas azul e preta indica o efeito das planícies de inundação na atenuação de cheias. Os resultados indicam que as planícies têm um papel menor nas bacias a montante de Ituporanga e Ibirama, e maior em Taió e Blumenau (a qual envolve os três últimos

locais). De fato, os rios Itajaí do Sul e Itajaí do Norte apresentam topografia relativamente encaixada em relação aos outros, como mostra também a próxima análise de áreas inundadas.

Tabela 1 – Resumo de métricas de Nash-Sutcliffe (NSE) para os 11 postos calibrados.

Estação fluviométrica	NSE
Taió	0,70
Ituporanga	0,70
Rio do Sul	0,83
Barra do Prata	0,66
Ibirama	0,55
Apiuna	0,84
Indaial	0,78
Timbo	0,73
Blumenau	0,57
Trombudo	0,54
Brusque	0,65

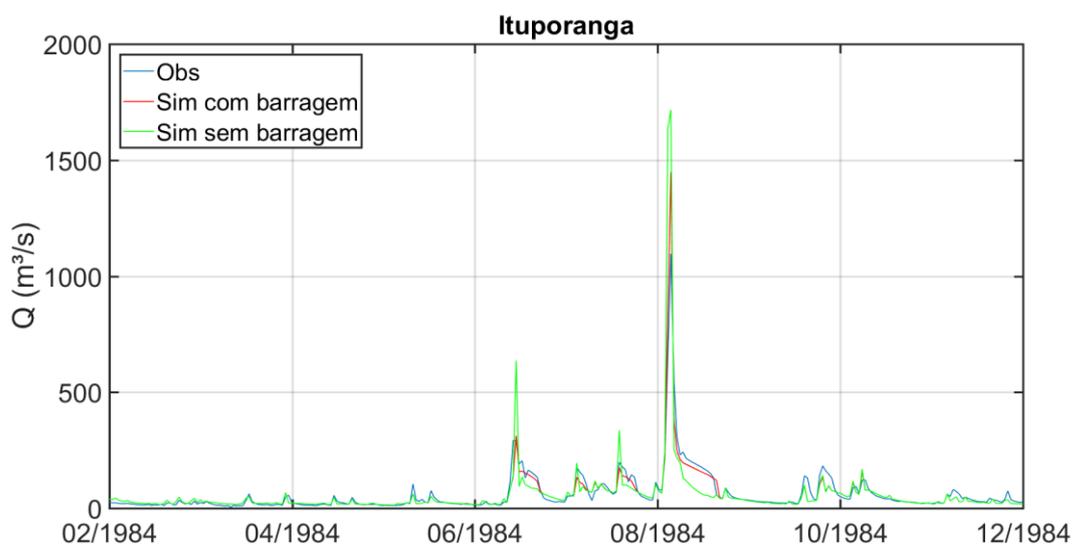


Figura 2 – Hidrogramas observados e simulados com e sem reservatórios em Ituporanga para a cheia de 1984.

A aplicação do modelo hidrológico-hidrodinâmico permite a geração de mapas de inundação. Um exemplo está apresentado na Figura 4, com um mapa de profundidades de água para a máxima área inundada simulada em toda a bacia do Itajaí. Fica evidente a profundidade alta nos três reservatórios simulados (salienta-se que a profundidade nestes está fora da escala apresentada, com valores maiores de 10 m), bem como as áreas inundáveis no rio Itajaí do Oeste, próximo à cidade de Rio do Sul e no Baixo Itajaí, próximo à cidade de Itajaí. Os trechos do baixo Itajaí são dependentes da condição de contorno de jusante adotada, como o nível da maré.

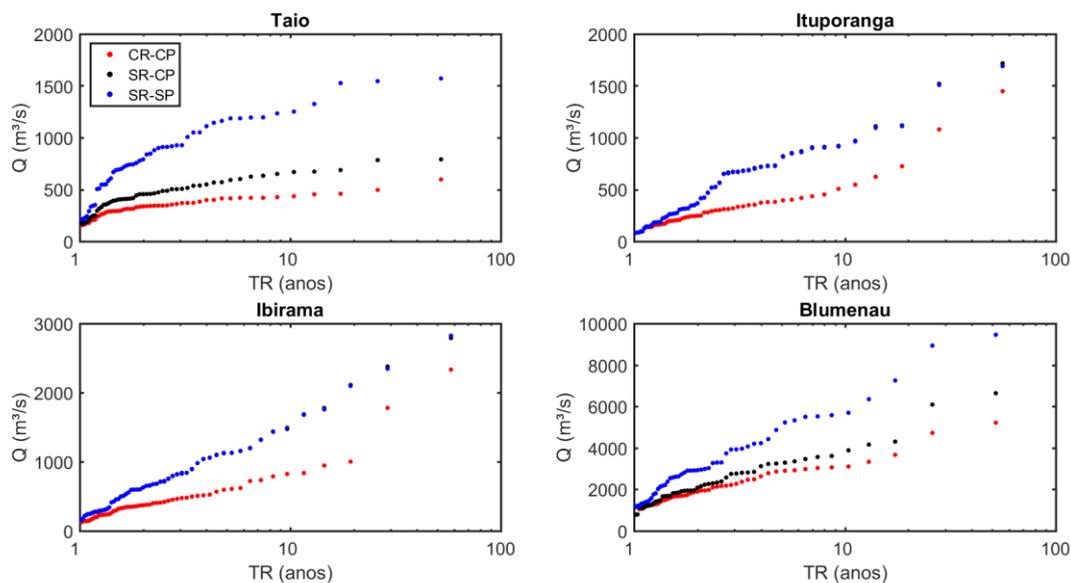


Figura 3 – Curvas de frequência de vazões máximas par as localidades de Taio, Ituporanga, Ibirama e Blumenau. Veja Figura 4 para localização. CR: com reservatório; CP: com planície; SR: sem reservatório; SP: sem planície.

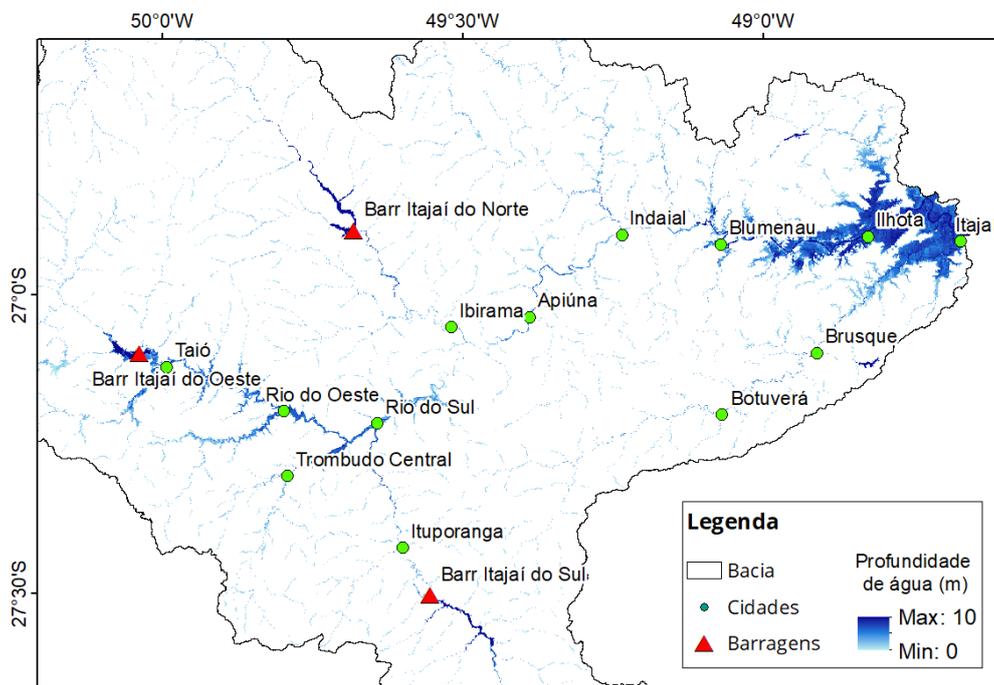


Figura 4 – Mapa de inundação.

4 - CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma aplicação do modelo MGB na bacia do rio Itajaí-Açu em Santa Catarina, bastante afetada por inundações. Desenvolveu-se uma versão do modelo capaz de

representar tanto a geração de escoamento (processo chuva-vazão) quanto a propagação nos rios, planícies de inundação e reservatórios. As três barragens existentes na bacia para controle de cheias foram simuladas explicitamente no modelo. Os resultados indicaram um satisfatório ajuste do modelo às vazões observadas, representando inclusive a liberação de água dos reservatórios após os eventos de cheia. Estimativas de vazões máximas em cenários de simulação com e sem barragens e planícies de inundação indicaram o maior papel das planícies em atenuar cheias no rio Itajaí-Açu e no Itajaí do Oeste, enquanto o Itajaí do Norte e o Itajaí do Sul apresentam um maior papel relativo dos reservatórios. Por fim, a possibilidade de gerar mapas de inundação para toda a bacia tornam a presente metodologia bastante promissora para avaliação integrada de cenários de intervenção e alteração da bacia em relação a inundações.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

FRANK, B. (2003). "Uma história das enchentes e seus ensinamentos". In: Frank and Pinheiro (Ed) *Enchentes na Bacia do Itajaí*. Edifurb, Blumenau, pp 15-62.

IGARAPÉ. (2018). "Artigo estratégico 29: Migrantes invisíveis: a crise de deslocamento forçado no Brasil". <https://igarapeorgbr/wp-content/uploads/2018/03/Migrantes-invis%C3%ADveis.pdf>. Acessado em 1st May 2018.

JICA (Japan International Cooperation Agency). (2011). "Estudo Preparatório para o Projeto de Prevenção e Mitigação de Desastres na Bacia do Rio Itajaí". Relatório Final.

PINHEIRO, A., FRANK, B. (2003). "Obras de controle de cheias". In: Frank and Pinheiro (Ed) *Enchentes na Bacia do Itajaí*. Edifurb, Blumenau, pp 143-172.

SDS - Secretary of State for the Economic and Sustainable Development. (2013). "Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina Florianópolis". ENGEMAP 202 Digital Document. Disponível em <<http://sigsc.sds.sc.gov.br>>.

SIQUEIRA, V.A., FLEISCHMANN, A., JARDIM, P.F., FAN, F.M., COLLISCHONN, W. (2016). *“IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment”*. Brazilian Journal of Water Resources, v. 21, n.1, p. 274-287.

PAIVA, R.C.D., BUARQUE, D.C., COLLISCHONN, W., BONNET, M.P., FRAPPART, F., CALMANT, S., BULHOES MENDES, C.A. (2013). *“Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin”*. Water Resources Research, v. 49, n. 3, p.1226-1243.

BARRAQUÉ, B. (2014). *“The common property issue in flood control through land use in France”*. Journal of Flood Risk Management, v. 10, n.2, p. 182-194.

BLOSCHL, G., GAAL, L., HALL, J., KISS, A., KOMMA, J., NESTER, T., PARAJKA, J., PERDIGÃO, R., PLAVCOVÁ, L., ROGGER, M., SALINAS, J.L., VIGLIONE, A. (2015). *“Increasing river floods: fiction or reality”*. Water, v. 2, p. 329-344.

DI BALDASSARRE, G., KOOY, M., KEMERINK, J.S., BRANDIMARTE, L. (2013). *“Towards understanding the dynamic behaviour of floodplains as human-water systems”*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 17, n.8, p.3235-3244.

HIRABAYASHI, Y., MAHENDRAN, R., KOIRALA, S., KONOSHIMA, L., YAMAZAKI, D., WATANABE, S., KIM, H., KANAE, S. (2013). *“Global flood risk under climate change”*. Nature Climate Change, n. 3, v.9, p. 816-821.

NEAL, J., SCHUMANN, G., BATES, P. (2012). *“A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas”*. Water Resources Research, v. 48, n. 11.

PAZ, A.R.D., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E., PADOVANI, C.R. (2011). *“Large-scale modelling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil)”*. Hydrological processes, v. 25, n.9, p. 1498-1516.

SEIBERT, S.P., SKUBLICS, D., EHRET, U. (2014). *“The potential of coordinated reservoir operation for flood mitigation in large basins—A case study on the Bavarian Danube using coupled hydrological–hydrodynamic models”*. Journal of Hydrology, v.517, p. 1128-1144.

TANAKA, T., TACHIKAWA, Y., IACHIKAWA, Y., YOROZU, K. (2017). *“Impact assessment of upstream flooding on extreme flood frequency analysis by incorporating a flood-inundation model for flood risk assessment”*. Journal of Hydrology, v. 554, p. 370-382.

WINSEMIUS, H.C., AERTS, J.C., VAN BEEK, L.P., BIERKENS, M.F., BOUWMAN, A., JONGMAN, B., WARD, P.J. (2016). *“Global drivers of future river flood risk”*. Nature Climate Change, v. 6, n.4, p. 381.