



REPRESENTANDO INTERAÇÕES ENTRE HIDROLOGIA E HIDRODINÂMICA EM MODELOS DE GRANDE ESCALA: ESTUDO DE CASO NO RIO NÍGER, ÁFRICA

Ayan Fleischmann¹ & Vinícius Siqueira² & Adrien Paris³ & Walter Collischonn⁴ & Rodrigo Paiva⁵
& Paulo Pontes⁶ & Sylvain Biancamaria⁷ & Marielle Gosset⁸ & Stephane Calmant⁹

Resumo – Recentes avanços em modelagem hidrológica de grande escala têm apontado à necessidade de se melhor representar interações entre processos hidrológicos, em especial em grandes regiões inundáveis, onde processos hidrodinâmicos estão fortemente relacionados a processos de infiltração e evapotranspiração. Este estudo apresenta um aprimoramento do modelo MGB-IPH para representação destes processos, com aplicação à bacia do Alto Rio Níger, onde o Delta Interno do Níger apresenta mais de 10.000 km² inundados sazonalmente. O modelo foi adaptado para representar (i) múltiplas defluências, (ii) infiltração da planície inundada para o solo, (iii) a densa rede de drenagem da área, e (iv) os complexos padrões difusos de inundação. O modelo foi forçado com precipitação diária (TRMM) e normais climatológicas (CRU) para o período 1998-2014, calibrado com vazão observada e validado com altimetria espacial. Resultados indicaram que a inclusão destes processos melhoraram as estimativas do modelo, com performances (Nash-Sutcliffe) geralmente superiores a 0.6. Por exemplo, a infiltração das áreas inundadas foi necessária para manter taxas de evapotranspiração em meses subsequentes à passagem da cheia. Assim, este trabalho agrega à discussão sobre melhoria de modelos acoplados hidrodinâmicos e hidrológicos de grande escala, especialmente frente à grande disponibilidade de dados de sensoriamento remoto disponíveis.

Palavras-Chave – Modelo hidrodinâmico, acoplamento de modelos, Rio Níger

REPRESENTING INTERACTIONS BETWEEN HYDROLOGY AND HYDRODYNAMICS IN LARGE SCALE MODELS: CASE STUDY IN NIGER RIVER BASIN

Abstract – Recent developments in large scale hydrological models have pointed towards the need of better representing hydrological processes, especially in large floodable areas, where hydrodynamic processes are deeply related to infiltration and evapotranspiration processes. This study presents an improvement of MGB-IPH model for representation of such processes, with an application to the Upper Niger River Basin, where the Niger Inner Delta presents more than 10.000 km² seasonally flooded areas. The model was adapted to represent (i) multiple distributaries, (ii) infiltration from floodplains into soil, (iii) the dense drainage network, and (iv) the complex, diffuse flooding patterns. The model was forced with daily precipitation (TRMM) and climate normals (CRU) for the period 1998-2014, calibrated against observed discharge and validated with satellite altimetry. Results indicated that the inclusion of such processes improved model estimates, with

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: vinisiquera@gmail.com

³ Afiliação: IRD, Toulouse, França. Email: adrien.paris@legos.obs-mip.fr

⁴ Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Email: waltercollischonn@gmail.com

⁵ Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Email: rodrigocdpaiva@gmail.com

⁶ Afiliação: Unisinos, São Leopoldo, Brasil. Email: p.rogenes@gmail.com

⁷ Afiliação: IRD, Toulouse, França. Email: marielle.gosset@ird.fr

⁸ Afiliação: IRD, Toulouse, França. Email: sylvain.biancamaria@legos.obs-mip.fr

⁹ Afiliação: IRD, Toulouse, França. Email: stephane.calmant@ird.fr

performance (Nash-Sutcliffe) generally higher than 0.6. For instance, infiltration from floodplains proved necessary to maintain evapotranspiration rates after the flooding passage. Then, this study adds to the discussion on the improvement of coupled hydrologic-hydrodynamic, large-scale models, especially in the context of large availability of remote sensing data.

Keywords – Hydrodynamic model, model coupling, Niger River Basin

INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos de grande escala são ferramentas importantes para aplicações em estudos relacionados a recursos hídricos, incluindo previsão de vazões, compreensão de respostas hidrológicas a mudanças de uso e cobertura de solo, avaliações de risco a inundações, entre outros (Alfieri *et al.*, 2013; Trigg *et al.*, 2016; Pontes *et al.*, 2017). Recentes avanços em disponibilidade de dados de sensoriamento remoto (precipitação, modelos digitais de elevação, estimativas de níveis de rios e áreas inundáveis), associados ao aumento de nossa capacidade computacional, têm proporcionado um rápido crescimento na qualidade das previsões de nossos modelos, que representam os variados processos hidrológicos e hidrodinâmicos existentes em grandes bacias hidrográficas.

No contexto de grandes regiões planas, com complexos processos de inundação (múltiplas bifurcações, interações entre inundação e solo adjacente, fluxos difusos ao longo das planícies), modelos de grande escala adotam normalmente uma estratégia *offline* de acoplamento entre processos hidrológicos verticais (infiltração no solo, evapotranspiração, geração de escoamento) e hidrodinâmicos (propagação de cheias nos rios, armazenamento em planícies de inundação), onde séries de vazões observadas ou calculadas por modelos hidrológicos são utilizados como condições de contorno de modelos hidrodinâmicos, 1D ou 2D (e.g. Biancamaria *et al.*, 2009; Neal *et al.*, 2012). No entanto, é sabido que as interações entre estes processos são relevantes em muitos sistemas hídricos, onde, por exemplo, a inundação oriunda do extravasamento da calha fluvial interage com o solo adjacente. Este é o caso do Pantanal (Paz *et al.*, 2014) e da região semi-árida do Delta do Okavango na África austral (Bauer *et al.*, 2006). Neste contexto, o presente trabalho apresenta um aprimoramento do modelo MGB-IPH que represente de forma acoplada as interações entre hidrologia e hidrodinâmica, e um estudo de caso é realizado na bacia do Alto Rio Níger, onde a vasta planície inundável do Delta Interno do Níger está presente.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia do Alto Rio Níger compreende cerca de 657.000 km², definida até a capital do Níger, Niamey (Figura 1). Possui três regiões distintas: áreas tropicais do planalto da Guiné, Delta Interno do Níger e semi-árido do Deserto do Sahel com três importantes tributários intermitentes, sendo a primeira e a última as principais áreas geradoras de escoamento. O Delta Interno do Níger (referido como Delta neste texto) é uma das maiores áreas inundáveis do planeta, com cerca de 10.000 km² inundados sazonalmente (Bergé-Nguyen e Crétaux, 2015), e onde cerca de 40% das águas provenientes de montante do Rio Níger são perdidos na forma de evaporação ou infiltração (Mahé *et al.*, 2009). Distintos processos de inundação ocorrem nas partes norte e sul do Delta, onde na parte sul uma importante defluência (Rio Diaka) remove grande parcela de água do canal principal e distribui de forma difusa ao longo da área. Os fluxos convergem para a região dos Lagos (Lac Débo, entre outros), a partir de onde algumas defluências carregam água para a região de Erg de Nianfunké e diversos canais surgem como meandros ao redor de dezenas de dunas estacionárias, até por fim se encontrarem no canal principal do Rio Níger. A partir deste ponto o rio segue por

centenas de quilômetros em direção a Niamey, recebendo poucos tributários na margem direita (*Red Floods tributaries*) e nenhum na margem esquerda, onde basicamente bacias endorreicas ocorrem (Davies *et al.*, 1996; Mahé *et al.*, 2009).

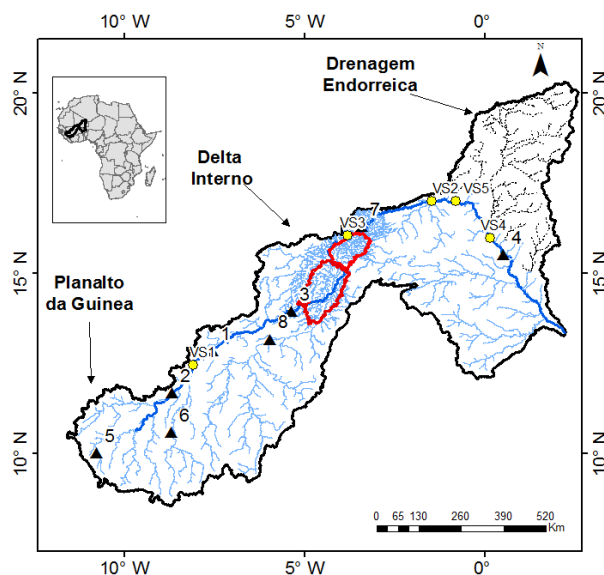


Figura 1 – Apresentação da bacia do Alto Rio Níger na África ocidental. Estão apresentadas as sete estações virtuais de altimetria espacial (círculos amarelos), as oito estações com observação utilizadas (triângulos pretos): Koulikoro (1), Banankoro (2), Ke-Macina (3), Ansongo (4), Faranah (5), Mandiana (6), Diré (7) e Douna (8). A rede de drenagem está apresentada em azul claro, rio principal em azul escuro, e drenagem endorreica que não contribui à bacia do Níger em preto.

Modelo MGB-IPH

MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007; Pontes *et al.*, 2017) é um modelo tipo chuva-vazão semi-distribuído, desenvolvido 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. Por fim, as vazões no rio são propagadas com métodos como Muskingum-Cunge linear (tradicionalmente) ou Inercial (recentemente desenvolvido).

Fan e Collischonn (2014) apresentaram o acoplamento do modelo com o software SIG MapWindow®, enquanto Pontes *et al.* (2017) introduziram uma nova versão do modelo em que o modelo de propagação inercial é utilizado para cálculo de fluxos em rios e armazenamento de água em planícies de inundação. No presente trabalho, a propagação inercial (hidrodinâmica) é aplicada à bacia do Alto Rio Níger, com algumas adaptações para representar os processos de inundação do Delta Interno do Níger.

A implementação para regiões inundáveis áridas envolveu (i) cômputo da infiltração de água das áreas inundadas para a coluna de solo, permitindo um acoplamento em dois sentidos (solo para planície e planície para solo), (ii) representação do fluxo difuso e das bifurcações existente no delta com o esquema de conexões laterais, (iii) densificação da rede de drenagem na região do Delta de modo a representar os múltiplos canais existentes na planície.

Dados de entrada, calibração e validação do modelo

A simulação foi realizada entre 1998 e 2014 utilizando como forçantes precipitação do TMPA 3B42 (Huffman *et al.*, 2007) e dados de clima do CRU (New *et al.*, 2002). A bacia foi discretizada em 4307 minibacias, delimitadas para trechos de rede de drenagem de 10 km, seguindo método disponível no pacote IPH-HydroTools (Siqueira *et al.*, 2016) e utilizando modelo digital de elevação SRTM 250 m. Unidades de Respostas Hidrológicas para definição de parâmetros do modelo foram estabelecidas a partir de mapas do projeto ECOCLIMAP.

O modelo foi calibrado para todo o período de simulação para as 12 estações apresentadas na Figura 1, e validado com dados de altimetria espacial processados a partir dos produtos das missões JASON-2, ENVISAT e SARAL-ALTIKA. Sete estações virtuais (cruzamento entre traços do satélite e rio) foram então obtidas e as séries temporais utilizadas para avaliação dos resultados do modelo. Métricas de performance utilizadas foram Nash-Sutcliffe (NSE) e *Delay Index* (DI, em dias; avalia em dias quão satisfatório é o *timing* das vazões simuladas).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração e validação

A Figura 2 apresenta resultados de calibração do modelo para quatro estações selecionadas, onde de modo geral se obteve resultados satisfatórios com $NSE > 0.7$ e DI com menos de 11 dias, especialmente considerando a complexidade da região modelada, e comparando a estudos passados de modelagem de grande escala desta área (Neal *et al.*, 2012; Pedinotti *et al.*, 2012). A Figura 3 apresenta a validação do modelo para as cinco estações virtuais de altimetria espacial, onde resultados satisfatórios foram obtidos para todas as estações, com $NSE > 0.6$ para três das cinco estações. A estação virtual VS2 obteve uma baixa performance devido aos *outliers* existentes na série observada.

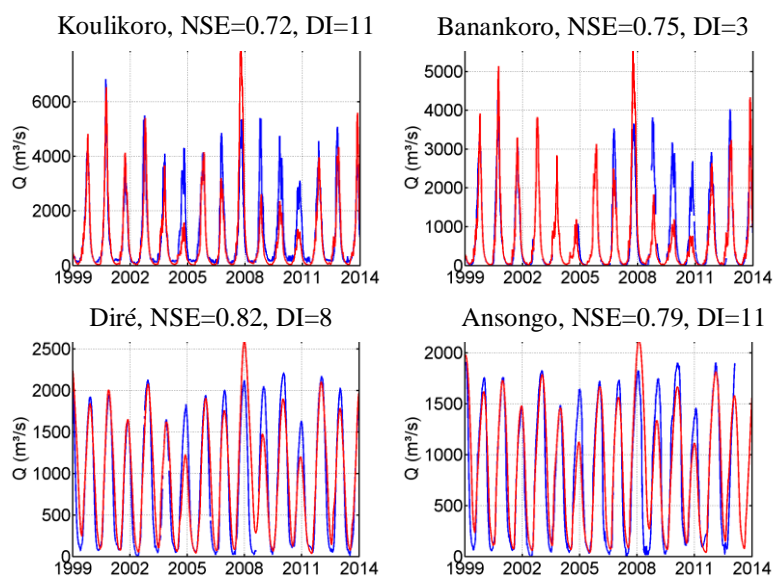


Figura 2 – Vazões observadas (azul) e simuladas (vermelho) nas estações de Koulikoro (código 2 na Figura 1), Banankoro (código 1), Diré (código 7) e Ansongo (código 4).

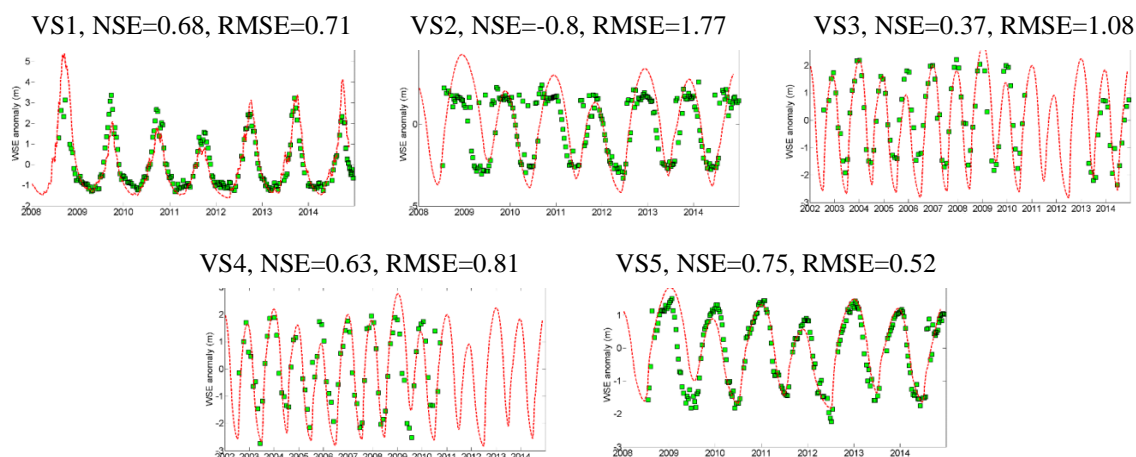


Figura 3 – Resultados de validação do modelo com altimetria espacial para as sete estações virtuais apresentadas na Figura 1.

Importância da interação entre hidrologia e hidrodinâmica

Nesta seção são avaliados cenários de simulação com diferentes estruturas do modelo, buscando identificar a importância dos diversos processos hidrológicos e hidrodinâmicos representados.

A interação entre áreas inundadas e o solo adjacente é reconhecida como importante elemento de *feedback* entre processos hidrológicos em áreas semi-áridas como o Delta do Níger e o Delta do Okavango (Bauer *et al.*, 2006; Mahé *et al.*, 2009). Neste último, por exemplo, é aceito que importantes volumes são infiltrados durante a chegada da inundação anual, quando o solo está relativamente seco. Assim, a Figura 5 apresenta as estimativas do modelo hidrológico de evapotranspiração (valores mensais e anuais) para a região do Delta do Níger para dois cenários, com e sem infiltração da planície para o solo. Os resultados indicam que o cenário com infiltração gera taxas de evapotranspiração mensais e anuais (linha azul) expressivamente maiores que o cenário sem infiltração (linha verde). A precipitação no Delta (linha vermelha) precede a chegada da inundação do Níger, de modo que o solo já está saturado na chegada desta. No entanto, durante o período de recessão de cheia, o solo passa a receber infiltração das áreas inundáveis, pois neste ponto o solo já está secando (não está mais saturado). A água fornecida para o solo é relevante para manter taxas de evapotranspiração relativamente altas durante os meses seguintes à passagem da cheia. Os valores anuais estimados de evapotranspiração (entre 800 e 1100 mm/ano) são bastante coerentes com estimativas de balanço hídrico de Mahé *et al.*, 2009 (entre 400 e 1300 mm/ano, com média de 800 mm/ano, para um período distinto de análise).

A Figura 5 apresenta as estimativas de máxima área inundada do modelo para a região do Delta Interno do Níger com a simulação padrão (Figura 5a), e com simulações alternativas, em que todas as conexões laterais são desativadas (Figura 5b) e em que apenas a defluência do rio Diaka é incluída (Figura 5c). A não inclusão de conexões laterais (Figura 5b) acarreta uma errônea representação do padrão de inundação, de acordo com a imagem LANDSAT apresentada na Figura 5d e com resultados de Bergé-Nguyen e Crétaux (2015): a inundação passa a ser restrita à planície de extravasamento do canal principal do Níger, e os fluxos para o interior do Delta transportados pelos vários canais defluentes não foram representados. Da mesma forma, a simulação com representação apenas da defluência do rio Diaka, importante distributário que retira significativo volume do rio principal, indica que o padrão de inundação fica restrito à zona de extravasamento do

Diaka e do rio principal. A inundação do cenário *default* (Figura 5a) é de fato bem mais próxima ao padrão observado (Figura 5d).

Hidrogramas para a localização de Diré (jusante do Delta) estão apresentados na Figura 6 para cenários *default* (vermelho), sem infiltração da planície inundada para o solo (preto), sem conexões laterais (verde), e sem hidrodinâmica (ciano). Resultados indicam que o cenário default é o que mais se aproxima da observação in-situ, apesar de erros na estimativa da recessão serem evidentes, possivelmente associados a errôneas estimativas de elevações ao longo do Delta, ou ainda à não representação ao de processos hidrológicos importantes na região. Ainda, a não inclusão de infiltração gera superestimativas especialmente na recessão do hidrograma, cujo volume passa a ser disponível para evapotranspiração com a representação deste processo (vide Figura 4). A ausência de conexões laterais acarreta uma atenuação maior do hidrograma em Diré, visto que as múltiplas defluências do canal principal não são implementados neste cenário, e muito volume de água passa a ser extravasado da calha fluvial do rio principal (planície adjacente passa a atenuar muito o hidrograma). Por fim, o cenário sem hidrodinâmica (múltiplas defluências, infiltração da planície, armazenamento nas planícies), realizado com o método Muskingum-Cunge em vez de modelo inercial de propagação, mostra a total incapacidade deste de representar os processos existentes na área, o que é esperado e está de acordo com outros trabalhos de modelagem na região (e.g., Neal *et al.*, 2012).

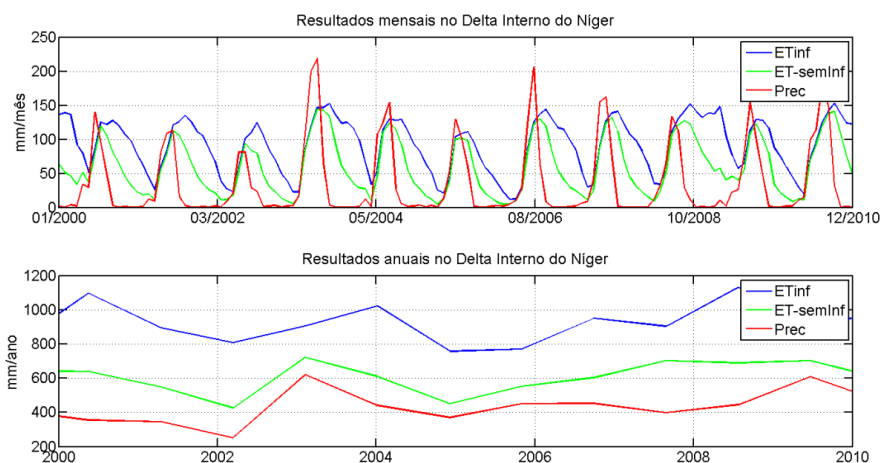


Figura 4 – Estimativas de evapotranspiração mensal (painel superior) e anual (painel inferior) para cenários com infiltração (ETinf) e sem infiltração (ET-semInf) de água da planície de inundação para o solo. Valores de precipitação são também apresentados para comparação e discussão no texto.

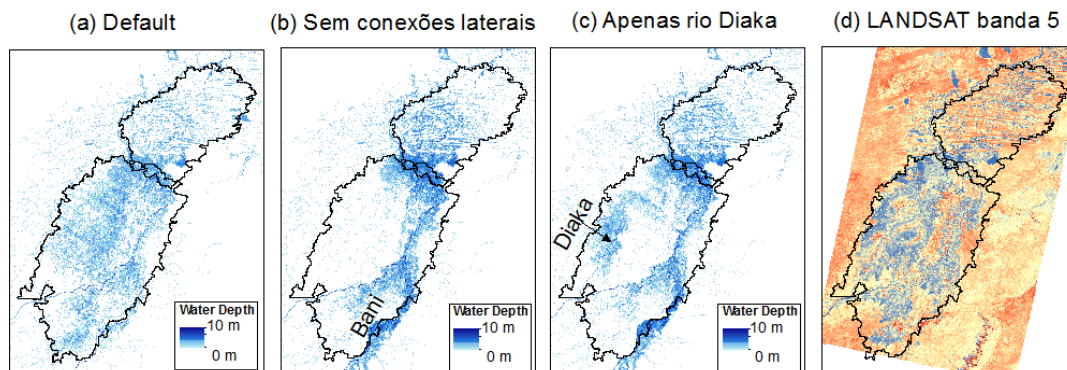


Figura 5 – Áreas inundadas para diversos cenários de simulação. Imagem LANDSAT na banda 5 para período de águas altas.

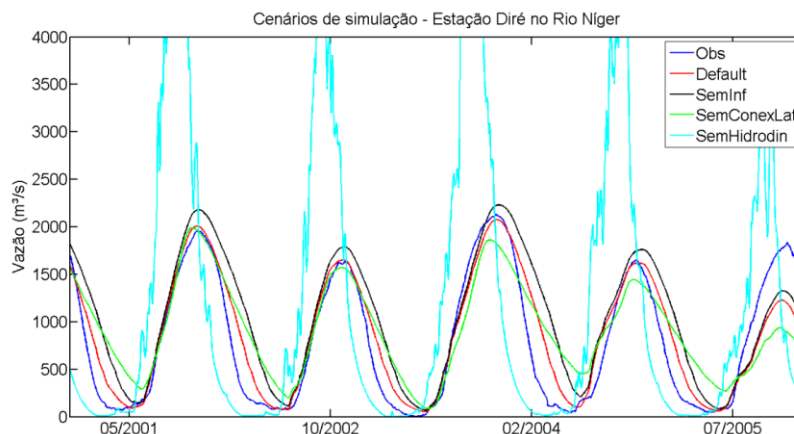


Figura 6 – Hidrogramas em Diré (a jusante do Delta Interno) observado (azul) e simulados nos cenários Default (vermelho), sem infiltração da planície inundada para o solo (preto), sem conexões laterais (verde), sem hidrodinâmica (ciano).

CONCLUSÃO

Modelos matemáticos de complexas áreas inundáveis exigem que interações entre processos hidrológicos e hidrodinâmicos sejam representados. Neste estudo, apresentou-se uma adaptação do modelo MGB-IPH com aplicação à bacia do Alto Rio Níger, onde a região do Delta Interno do Níger está localizada, e onde importante parcela do volume que chega à área é perdida na forma de infiltração e evapotranspiração. O modelo representou de forma satisfatória as vazões observadas, bem como os níveis de altimetria espacial observados ao longo do rio Níger. A representação de processos hidrológicos (infiltração de planície para solo, evaporação de águas abertas) e hidrodinâmicos (armazenamento de água em planície, bifurcações, fluxo difuso ao longo da planície) mostrou-se necessária para uma mais correta representação do sistema.

Com a crescente disponibilidade de dados de sensoriamento remoto (precipitação, modelos digitais de elevação, áreas inundadas, altimetria espacial), torna-se cada vez mais possível e interessante o desenvolvimento de modelos hidrológicos de grande escala, com a possibilidade de utilizar estes dados para validação, calibração e assimilação em modelos. O presente trabalho está inserido neste contexto, e pretende-se em futuros desenvolvimentos validar este modelo com outros produtos de sensoriamento remoto como estimativas de áreas inundadas.

REFERÊNCIAS

- ALFIERI, L.; BUREK, P.; DUTRA, E.; KRZEMINSKI, B.; MURARO, D.; THIELEN, J.; PAPPENBERGER, F. (2013). GloFAS e global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, pp. 1161-1175.
- BAUER, P.; GUMBRICHT, T.; KINZELBACH, W. (2006). A regional coupled surface water/groundwater model of the Okavango Delta, Botswana. *Water Resour. Res.* 42, W04403.
- BERGÉ-NGUYEN, M.; CRÉTAUX, J.F. (2015). Inundations in the Inner Niger Delta: Monitoring and Analysis Using MODIS and Global Precipitation Datasets. *Remote Sens.* 7, 2127-2151.

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.

DAVIES, S., (1996). *Adaptable Livelihoods : Coping with Food Insecurity in the Malian Sahel*. New York: St. Martin's Press, 335 pp.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2014). Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 19, pp. 243-254.

HUFFMAN, G., ADLER, R., BOLVIN, D., GU, G., NELKIN, E., BOWMAN, K., HONG, Y., STOCKER, E., WOLFF, D. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology* 8, doi 10.1175/JHM560.1.

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.

PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J.M.; BATES, P.D., BAUGH, C. (2014). The influence of vertical water balance on modelling Pantanal (Brazil) spatio-temporal inundation dynamics. *Hydrol. Process.* 28 (10), pp. 3539-3553.

PEDINOTTI, V.; BOONE, A.; DECHARME, B.; CRÉTAUX, J. F.; MOGNARD, N.; PANTHOU, G.; PAPA, F.; TANIMOUN, B.A. (2012). Evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrologic system over the Niger basin using in situ and satellite derived datasets. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, pp. 1745–1773.

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.

SIQUEIRA, V.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P.; FAN, F.; COLLISCHONN, W. (2016). IPH HydroTools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 21(1), pp. 274-287.

TRIGG, M.; BIRCH, C.E.; NEAL, J.; BATES, P.; SMITH, A.; SAMPSON, C., YAMAZAKI, D.; HIRABAYASHI, Y.; PAPPENBERGER, F.; DUTRA, E.; WARD, P.; WINSEMIUS, H.; SALAMON, P.; DOTTORI, F.; RUDARI, R.; KAPPES, M.; SIMPSON, A.; HADZILACOS, G.; FEWTRELL, T. (2016). The credibility challenge for global fluvial flood risk analysis. *Environ. Res. Lett.* 11, 094014.