

MODELAGEM HIDROLÓGICA-HIDRODINÂMICA DA BACIA AMAZÔNICA

Rodrigo C. D. Paiva^{1,2*}, Diogo Buarque¹, Walter Collischonn¹, Marie-Paule Bonnet², Carlos E.M. Tucci¹, Frédéric Frappart², Stephane Calmant³ & Carlos André Mendes¹

Resumo – Apresenta-se um estudo de modelagem hidrológica-hidrodinâmica da bacia Amazônica. Investiga-se as fontes de erro na modelagem através de uma validação baseada em sensoriamento remoto e os processos físicos na bacia. Utiliza-se o modelo hidrológico baseado em processos MGB-IPH acoplado a um modelo hidrodinâmico 1 D de rios e um modelo tipo armazenamento para as várzeas de inundação. Parâmetros relativos à geometria dos rios e várzeas são extraídos do SRTM DEM e o modelo foi forçado com precipitação estimada por satélite. As simulações concordam com observações de vazões e cotas *in situ* e com estimativas de três produtos de sensoriamento remoto: (i) níveis d'água de altimetria espacial; (ii) extensão de áreas alagadas e (iii) variações no armazenamento d'água terrestre (TWS) da missão GRACE. Entretanto, o modelo mostrou-se sensível à informação de precipitação e aos parâmetros de rios e várzeas. Conforme as simulações, as águas superficiais regulam a maior parte da variabilidade de TWS (56%), seguido da água no solo (36%) e águas subterrâneas (8%). Além disto, as várzeas desempenham um importante papel na propagação do escoamento nos rios, embora efeitos de remanso também sejam importantes para o atraso e atenuação das ondas de cheia.

Palavras-Chave – modelagem hidrológica-hidrodinâmica, Amazônia, sensoriamento remoto.

HYDROLOGIC-HYDRODYNAMIC MODELLING OF THE AMAZON RIVER BASIN

Abstract – In this paper, a hydrologic/hydrodynamic modelling of the Amazon River basin is presented using the MGB-IPH model with a validation using remotely-sensed observations. Moreover, the sources of model errors by means of the validation are investigated and the physical functioning of the Amazon basin is also explored. The MGB-IPH is a physically-based model resolving all land hydrological processes and here using a full 1D river hydrodynamic module with a simple floodplain storage model. River-floodplain geometry parameters were extracted from SRTM DEM and the model was forced using satellite-derived rainfall from TRMM3B42. Model results agree with observed *in situ* daily river discharges and water levels and with three complementary satellite-based products: (i) water levels derived from ENVISAT altimetry data; (ii) a global dataset of monthly inundation extent; and (iii) monthly terrestrial water storage (TWS) anomalies derived from GRACE. However, the model is sensitive to precipitation forcing and river-floodplain parameters. Finally, analyses of Amazon hydrological processes demonstrate that surface waters governs most of the Amazon TWS changes (56%), followed by soil water (36%) and ground water (8%). Moreover, floodplains play a major role in stream flow routing, although backwater effects are also important to delay and attenuate flood waves.

Keywords – hydrologic hydrodynamic model, Amazon, remote sensing.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/Brasil.

² Université Toulouse III Paul Sabatier, OMP, Geosciences Environnement Toulouse (UMR 5563 CNRS IRD UPS), Toulouse/France.

³ Université Toulouse III Paul Sabatier, OMP, Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (UMR 5566 CNES CNRS IRD UPS), Toulouse/France.

*rodrigocdpaiva@gmail.com

INTRODUÇÃO

A bacia Amazônica se destaca como a maior do mundo e pelo seu importante papel no sistema terrestre, influenciando o clima global e o ciclo de carbono, em particular as emissões de metano e dióxido de carbono (Richey *et al.*, 2002, Melack *et al.*, 2004). Paralelamente, recentes pressões antrópicas, como o desflorestamento (Leite *et al.*, 2012), mudanças climáticas (IPCC, 2007) e a construção de barragens hidroelétricas (BRASIL, 2007), ameaçam este sistema e motivam o seu estudo. Somam-se a isto as recentes cheias (*e.g.* 2009 e 2012) e secas (*e.g.* 1996, 2005 e 2010) extremas (Chen *et al.*, 2010; Tomasella *et al.*, 2010; Marengo *et al.*, 2008), que causaram importantes impactos sobre a população amazônica, que é altamente dependente dos rios (*e.g.* para transporte, energia, alimentos), e muito vulnerável à inundações. Além disso, algumas características hidrológicas particulares também motivam a pesquisa sobre a bacia Amazônica, como: precipitações intensas com alta variabilidade espacial e regime hidroclimático contrastante em diferentes regiões (Espinoza *et al.*, 2009); efeitos de remanso que controlam o escoamento fluvial (Meade *et al.*, 1991; Kosuth *et al.*, 2009); além de extensas várzeas alagáveis (Hess *et al.*, 2003) com escoamento d'água complexo (Alsdorf *et al.*, 2007) e exercendo função importante no ciclo de carbono (*e.g.* Richey *et al.*, 2002; Melack *et al.*, 2004), dinâmica de sedimentos (*e.g.* Bourgoin *et al.*, 2007) e condições ecológicas dos rios amazônicos (Junk, 1997).

Os modelos hidrológicos de base física se apresentam como uma ferramenta útil para (i) a compreensão acerca de processos hidrológicos e impactos de atividades antrópicas e para (ii) o desenvolvimento de sistemas de previsão visando à redução da vulnerabilidade da população local. Entretanto, aspectos como rios muito planos e grandes áreas alagáveis dificultam a aplicação de modelos hidrológicos convencionais na Amazônia. Particularmente nesta bacia, diversos esforços de modelagem hidrológica têm sido desenvolvidos (*e.g.* Paiva *et al.*, 2013 Yamazaki *et al.*, 2011; Getirana *et al.*, 2010; Coe *et al.*, 2008; Trigg *et al.*, 2009), utilizando diferentes abordagens e buscando a representação ótima dos processos físicos, mas limitados pelos dados disponíveis e capacidade computacional. Neste sentido, o aperfeiçoamento destes modelos passa pela sua validação com dados observados e investigação de suas fontes de erros, como a incompleta representação de processos físicos ou limitações nos dados de entrada. Para tanto, somando-se aos dados hidrológicos convencionais, recentes observações oriundas de sensoriamento remoto oferecem novas oportunidades para a validação de modelos, *e.g.* níveis d'água de altimetria espacial (Santos da Silva *et al.*, 2010), extensão de áreas alagadas (*e.g.* Papa *et al.*, 2010) ou armazenamento d'água da missão de gravimetria GRACE (Tapley *et al.*, 2004).

Neste trabalho, apresenta-se uma modelagem hidrológica-hidrodinâmica da bacia Amazônica usando o modelo hidrológico MGB-IPH acoplado a um modelo hidrodinâmico de rios e um modelo do tipo armazenamento para as várzeas validado com observações *in situ* e de sensoriamento remoto. Investiga-se acerca das fontes dos erros da modelagem e sobre o funcionamento da bacia Amazônica, incluindo aspectos como o papel das águas superficiais, no solo e subterrâneas e a função da hidráulica dos rios e várzeas inundáveis sobre a propagação de ondas de cheia.

MÉTODOS

Modelo hidrológico-hidrodinâmico

O MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007) é um modelo hidrológico de grande escala baseado em processos. A bacia é dividida em minibacias e trechos de rio e utiliza-se também a abordagem de unidades de respostas hidrológicas (HRUs) (Fig. 1). Os processos hidrológicos verticais simulados incluem: balanço d'água no solo, balanço de energia e evapotranspiração, interceptação, infiltração no solo e escoamento superficial, escoamento e percolação ao aquífero. Os volumes gerados nos HRUs são propagados em cada minibacia através de reservatórios lineares

representando o escoamento subterrâneo, subsuperficial e superficial. O escoamento na rede de rios é simulado com o modelo *Muskingum Cunge* (MC) ou com um modelo hidrodinâmico 1 D (HD).

Paiva *et al.* (2011) desenvolveu um modelo hidrodinâmico de grande escala para o modelo MGB-IPH (Fig. 1), que diferencia-se do MC pela capacidade de representar a inundação nas várzeas e efeitos de remanso. O modelo resolve as equações completas de *Saint-Venant* (Fig. 1) para uma rede de rios utilizando um esquema de diferenças finitas implícito baseado em Tucci (1978). A inundação das várzeas é representada com um modelo do tipo armazenamento, que assume que (i) a velocidade do escoamento paralelo ao rio é nula na planície de inundação, (ii) as várzeas atuam somente como áreas de armazenamento e (iii) o nível d'água é igual ao do rio principal. Conseqüentemente, a troca d'água entre o rio e a planície é dada por $q_{fi} = (dz/dt)A_{fi}(z)/dx$ sendo x e t as dimensões espacial e temporal, z o nível d'água $A_{fi}(z)$ a área alagada. Algoritmos de geoprocessamento são utilizados para extrair parâmetros relacionados à geometria dos rios e várzeas de inundação principalmente de modelos digitais de elevação (DEM).

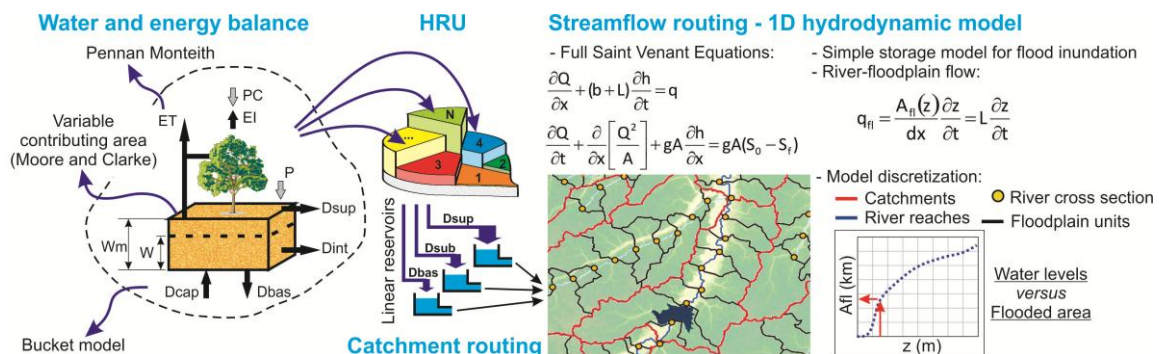


Figura 1 - Representação esquemática do modelo hidrológico MGB-IPH acoplado ao modelo hidrodinâmico 1D.

Aplicação na bacia Amazônica

A discretização da bacia em trechos de rio, minibacias e seções transversais para o modelo hidrodinâmico, além da estimativa de parâmetros topográficos, foi realizada a partir do modelo digital de elevação SRTM DEM (Farr *et al.*, 2007) com resolução espacial de ~ 500 m. Dados meteorológicos foram obtidos da base de dados CRU CL 2.0 (New *et al.*, 2002). Utilizou-se estimativas diárias de precipitação por satélite do produto TRMM 3B42 (Huffman *et al.*, 2007), com resolução espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Os parâmetros do modelo relacionados ao balanço hídrico foram calibrados baseados em dados de vazão de alguns postos fluviométricos seguindo os métodos de Collischonn *et al.* (2007). Maiores detalhes são descritos em Paiva *et al.* (2013).

Bases de dados para validação

As vazões simuladas foram comparadas com dados diários de 111 estações fluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA), dos Serviços Nacionais de Meteorologia e Hidrologia do Peru e Bolívia (SENAMHI) e do projeto HYBAM. Utilizaram-se também dados de cotas de 69 estações da ANA. Os níveis d'água simulados também foram confrontados com estimativas de altimetria espacial por radar desenvolvidas por Santos da Silva *et al.* (2010) com dados do satélite ENVISAT em 212 estações virtuais, com resolução temporal de ~35 dias e precisão de 10 a 40 cm. Simulações de extensão de áreas alagadas foram comparadas com estimativas desenvolvidas a partir de múltiplos satélites por Papa *et al.* (2010), com resolução espacial ~25 x 25 km e na escala mensal. A variação no armazenamento d'água terrestre (TWS), incluindo rios, várzeas de inundação, solo e aquíferos, foi verificada com dados da missão de gravimetria espacial GRACE (Tapley *et al.*, 2004; Frappart *et al.*, 2010), que fornece estimativas de variações no tempo e espaço do campo gravitacional da terra. Estas anomalias de gravidade são posteriormente relacionadas a variações no

armazenamento de água terrestre, com precisão de 15-20 mm sobre áreas de ~333 km e na escala mensal. Maiores detalhes encontram-se em Paiva *et al.* (2013).

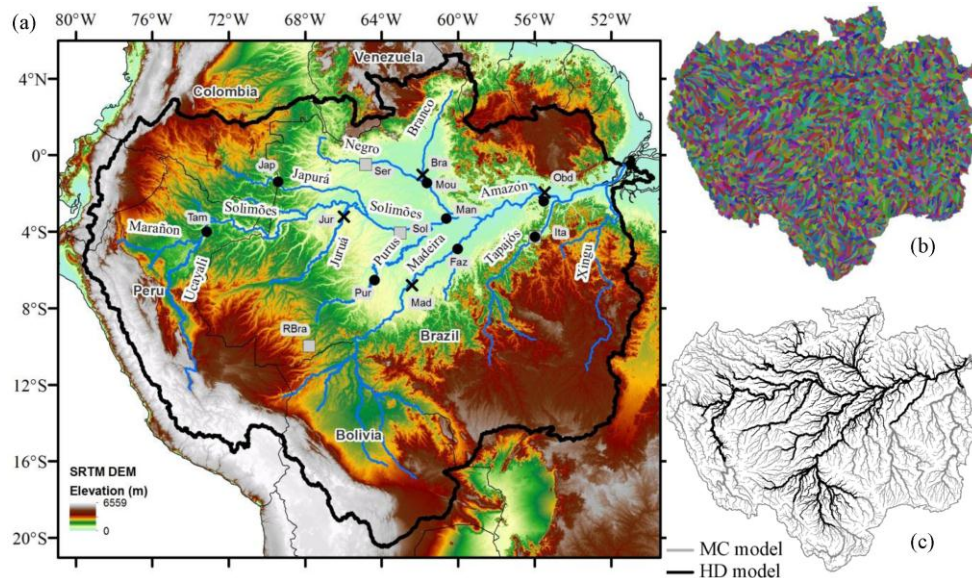


Figura 2 - (a) Bacia Amazônica com principais rios, limites internacionais, relevo do SRTM DEM e alguns sítios de validação, além da discretização em (b) minibacias e (c) trechos de rio.

RESULTADOS

Validação do modelo

A validação dos resultados de simulação versus vazões observadas mostra o bom desempenho do modelo MGB-IPH acoplado ao módulo hidrodinâmico na bacia Amazônica. Conforme a Fig. 3, em 70% dos postos fluviométricos o índice de eficiência de *Nash e Sutcliffe* (ENS) é maior que 0.6, o que é relativamente alto considerando todas as limitações de dados em uma grande bacia como a Amazônia. Em geral, o desempenho é melhor nos grandes rios (*e.g.* rio Amazonas, Fig. 3), mas os resultados também são satisfatórios em rios menores que apresentam cheias mais rápidas. Grande parte dos erros encontrados se concentra em áreas da Bolívia, Peru e Colômbia, onde o modelo subestima vazões, provavelmente como consequência da baixa qualidade do produto de precipitação TRMM 3B42 nestas regiões que são montanhosas e com baixo monitoramento pluviométrico *in situ*, como discutido em Paiva *et al.* (2013).

Os resultados de simulação concordam com observações de níveis d'água (Fig. 4). O ENS é maior que 0.60 em 55% dos postos fluviométricos e em 60% das estações virtuais. Os resultados são satisfatórios principalmente nos grandes rios (*e.g.* rio Juruá, Fig. 4). Entretanto, erros são encontrados em alguns locais, parte deles relacionada aos erros na vazão discutidos anteriormente. Em outras áreas (*e.g.* baixo Amazonas), os erros podem ser devido a incertezas no SRTM DEM e consequentemente em alguns parâmetros do modelo, conforme Paiva *et al.* (2013).

Em geral, as estimativas de extensão de áreas alagadas do modelo são semelhantes às de sensoriamento remoto, apresentando a mesma distribuição espacial (Fig. 5). O modelo também representa variação temporal da área total alagada da bacia, com ENS = 0.71, erro na amplitude de -26% e um pequeno viés de -7%. Entretanto, uma análise em diferentes regiões mostra existir alguns erros relacionados a incertezas no SRTM DEM, como discutido por Paiva *et al.* (2013).

Por fim, mostra-se que o modelo é capaz de representar a variabilidade espaço-temporal do armazenamento d'água terrestre, se comparado a estimativas da missão GRACE (Fig. 6). Os valores de TWS simulados médios em toda a bacia são semelhantes ao GRACE, sendo o valor ENS alto

(0.93) e o erro na amplitude é baixo (12%). Além disso, eventos extremos como a seca de 2005 e a cheia de 2009 são representados pelo modelo. Avaliou-se também 21 subregiões de 4° x 4°, onde $ENS < 0.8$ em somente 5 delas, mostrando o bom desempenho do modelo. Estas são as mesmas regiões que drenam que apresentaram erros nas vazões, como discutido anteriormente.

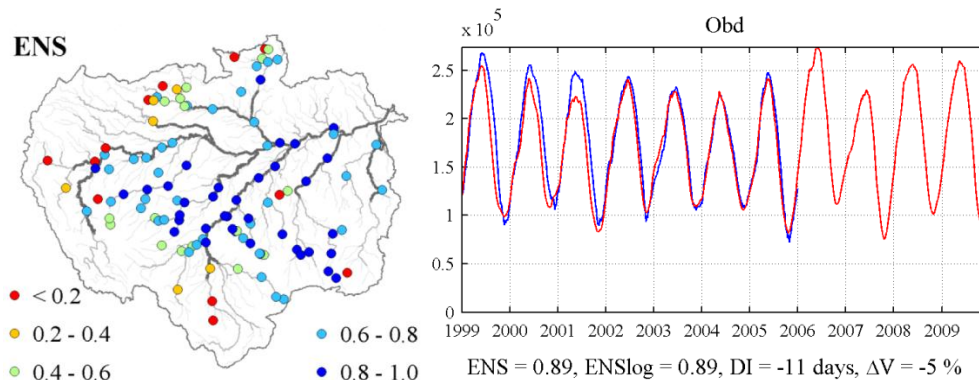


Figura 3 - Validação dos resultados de vazões diárias: Distribuição espacial do índice ENS nas estações fluviométricas e vazões simuladas (vermelho) e observadas (azul) no rio Amazonas em Óbidos (Obd – ver Fig. 2).

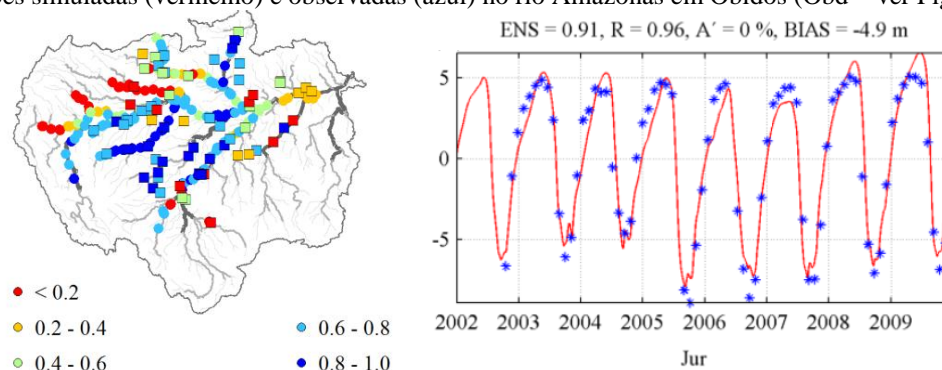


Figura 4 - Validação dos resultados de níveis d'água: Distribuição espacial do índice ENS nas estações fluviométricas (quadrados) e de altimetria espacial (círculos). Níveis d'água simulados (vermelho) e estimados por altimetria espacial (pontos azuis) no rio Juruá (Jur – ver Fig. 2).

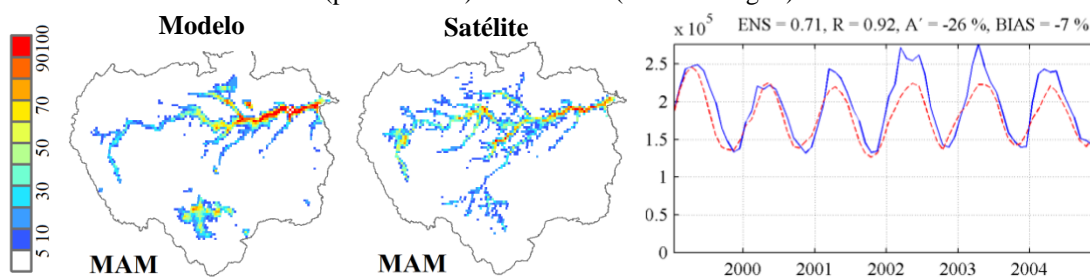


Figura 5 - Distribuição espacial das áreas alagadas no período Março-Abril-Maio (1999 a 2004) simuladas e estimadas por sensoriamento remoto e variação temporal da área alagada total na Amazônia modelada (vermelho) e de sensoriamento remoto (azul).

Análise de processos hidrológicos amazônicos

A partir dos resultados de simulação do modelo MGB-IPH, alguns aspectos do funcionamento físico da bacia Amazônica foram explorados. A Fig. 7 apresenta resultados acerca da variabilidade na água armazenada (TWS) na bacia e o papel das águas superficiais, do solo e subterrâneas neste processo. A variação temporal de TWS apresenta uma forte sazonalidade e uma elevada amplitude (~325 mm em toda a bacia), sendo maior na Amazônia central (>750 mm) e menor na região andina (< 300 mm). Foram computados os armazenamentos d'água sua amplitude de variação nos três principais compartimentos hidrológicos - águas superficiais (rios, várzeas inundáveis e escoamento superficial), água no solo e águas subterrâneas (Fig. 7). As águas superficiais são as maiores

responsáveis pela a variabilidade de TWS na bacia Amazônica (56%), seguidas pela água no solo (36%) e águas subterrâneas (8%) com menor importância. As águas superficiais apresentam um papel dominante na variação de TWS principalmente na Amazônica central, onde existem vastas planícies de inundação (Figs. 5 e 7), enquanto que a água no solo é mais importante no sudoeste da bacia. Estes resultados são coerentes com estudos anteriores, como discutido em Paiva *et al.* (2013).

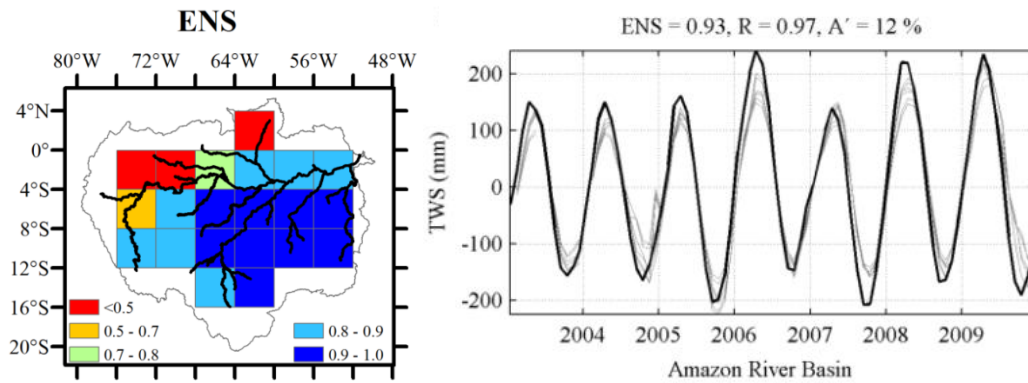


Figura 6 - Validação dos resultados de armazenamento d'água (TWS) calculados pelo MGB-IPH versus estimativas da missão GRACE: Distribuição espacial do índice ENS e variação temporal de TWS na bacia Amazônica do MGB-IPH (preto) e 6 soluções do GRACE (cinza).

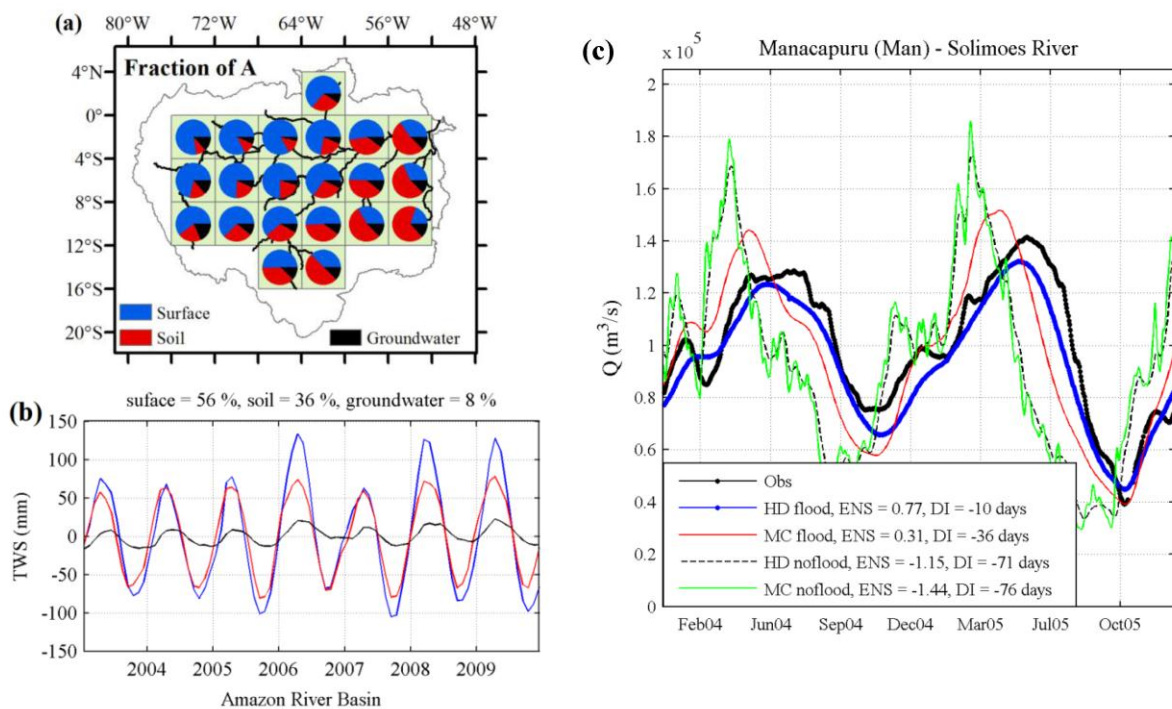


Figura 7 - Análise de processos hidrológicos amazônicos. (a) Distribuição espacial da contribuição das águas superficiais (azul), água no solo (vermelho) e águas subterrâneas (preto) na variação do armazenamento de água terrestre estimado pelo MGB-IPH e (b) variação temporal do TWS em cada compartimento hidrológico. (c) Vazão observada (preto) e simulada em Manacapuru usando os modelos hidrodinâmico (azul) e *Muskingum Cunge* (vermelho) com planície de inundação e hidrodinâmico (preto pontilhado) e *Muskingum Cunge* (verde) sem planície de inundação.

Avaliou-se também o papel das várzeas de inundação e efeitos de remanso na propagação de ondas de cheia nos rios Amazônicos. Foram comparados resultados de simulações com diferentes níveis de simplificação na representação destes processos: (i) modelo hidrodinâmico ou o modelo *Muskingum Cunge*, para representar ou não forças de pressão no escoamento e efeitos de remanso; (ii) simulação ou não do armazenamento d'água nas várzeas e trocas com o rio. Observa-se na Fig.

7 o melhor desempenho do modelo hidrodinâmico com planície de inundação. Incluindo efeitos de remanso e planícies de inundação, tem-se um atraso e atenuação das ondas de cheia, e as simulações concordam com as observações. Sem estes dois efeitos, o hidrograma fica adiantado e menos suavizado. Por outro lado, incluir apenas o efeito das várzeas não é suficiente e a cheia segue adiantada. Estes resultados mostram o importante papel das várzeas no atraso e atenuação das ondas de cheia, mas que os efeitos de remanso também têm uma influencia significativa.

CONCLUSÕES

Apresenta-se resultados de um estudo de modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica usando o modelo hidrológico MGB-IPH acoplado a um modelo hidrodinâmico de rios e várzeas inundáveis. Uma validação detalhada do modelo mostra a sua capacidade de representar vazões observadas em estações fluviométricas, além de níveis d'água de altimetria espacial, extensão de áreas alagadas obtidas de sensoriamento remoto e armazenamento de água terrestre estimada por gravimetria espacial. Parte dos erros encontrados deve estar relacionada a incertezas nos dados de entrada, *e.g.* estimativas de precipitação por satélite e parâmetros geométricos de rios e várzeas inundáveis. Conforme as simulações, águas superficiais regulam a maior parte da variabilidade do armazenamento d'água na bacia (56%), seguido da água no solo (36%) e águas subterrâneas (8%). Destaca-se também o importante papel de efeitos de remanso e principalmente das várzeas de inundação no atraso e atenuação das ondas de cheia amazônicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao CNPq, FINEP, INSU CNRS EC2CO, ANA, SENHAMI, HYBAM, ESA, NASA, J. Santos da Silva, F. Papa, P. Kumar, A. Getirana, B. Collischonn, J.M.Bravo, F. Fan e P. Pontes pelo financiamento, informações e/ou comentários.

REFERÊNCIAS

- ALSDORF, D.; BATES, P.; MELACK, J. et al. (2007). The spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L08402.
- BOURGOIN, L.M.; BONNET, M.P.; MARTINEZ, J.M. et al. (2007). Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. *J. Hydrol.*, 335, 140-156.
- BRASIL. (2007). *Plano Nacional de Energia 2030 v.3*. Geração hidrelétrica. Min. de Minas e Energia, Emp. de Pesq. Energética.
- CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D. (2010). The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resour. Res.*, 46, W12526, doi:10.1029/2010WR009383.
- COE, M.T.; COSTA, M.H.; HOWARD, E.A. (2008). Simulating the surface waters of the Amazon River basin: Impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. *Hydrol. Processes* 22, 14, 2542-2553.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. *Hydrol. Sci. J.*, 52, 878-895.
- ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L. et al. (2009). Spatio – Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *Int. J. Climatol*, 29, 1574-1594.
- FARR, T.G.; CARO, E.; CRIPPEN, R. et al. (2007). The shuttle radartopography mission. *Rev. of Geophysics*, 45, 2.
- FRAPPART, F.; RAMILLIEN, G.; MAISONGRANDE, P.; BONNET, M-P. (2010). Denoising satellite gravity signals by Independent Component Analysis. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 7, 3, 421-425, doi:10.1109/LGRS.2009.2037837.

- GETIRANA, A.C.V.; BONNET, M.-P.; ROTUNNO FILHO, O.C. et al. (2010). Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. *Hydrol. Processes*, 24, 22, 3219-3236.
- HESS, L.L.; MELACK, J.M.; NOVO, E.M.L.M. et al. (2003). Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sens. Environ.*, 87, 404 – 428.
- HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D. et al. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TCMA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydromet.*, 8, 38–55.
- JUNK, W.J. (1997). General aspects of floodplain ecology with special reference to Amazonian floodplains. In: Junk, W.J. (Ed.), *The Central-Amazonian Floodplain: Ecology of a Pulsing System, Ecological Studies*. Springer Verlag/Heidelberg, Berlin/New York, 3–22.
- KOSUTH, P.; CALLEDE, J.; LARAQUE, A. et al. (2009). Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrol. Processes* 23 (22), 3141-3150.
- LEITE, C. C.; COSTA, M.H.; SOARES-FILHO, B.S. et al. (2012). Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. *Global Biogeochem. Cycles*, 26, GB2011, doi:10.1029/2011GB004133.
- MARENGO, J.; NOBRE, C.; TOMASELLA, J. et al. (2008). The drought in Amazonia in 2005. *J. Clim.*, 21:495–516.
- MEADE, R.H.; RAYOL, J.M.; DA CONCEIÇÃO, S.C.; NATIVIDADE, J.R.G. (1991). Backwater effects in the Amazon River basin of Brazil. *Environ. Geol. Water Sci.*, 18, 2, 105-114.
- MELACK, J.M.; HESS, L.L.; GASTIL, M. et al. (2004). Regionalization of methane emissions in the Amazon basin with microwave remote sensing. *Global Change Biol.*, 10, 530–544.
- NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. (2002). A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Res.*, 21.
- PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2011). Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *J. Hydrol.*, 406, 170–181
- PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P. et al. (2013). Large scale hydrologic and hydrodynamic modelling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.*, 49, doi: 10.1002/wrcr.20067.
- PAPA, F.; PRIGENT, C.; AIRES, F. et al. (2010). Interannual variability of surface water extent at the global scale, 1993–2004. *J. Geophys. Res.*, 115, D12111, doi:10.1029/2009JD012674.
- RICHEY, J.E.; MELACK, J.M.; AUFDENKAMPE, A.K. et al. (2002). Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature* 416, 617–620.
- SANTOS DA SILVA, J.; CALMANT, S.; SEYLER, F. et al. (2010). Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sens. Environ.*, 114, 10, 2160-2181.
- TAPLEY, B.D.; BETTADPUR, S.; RIES, J. C., et al. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305, 503–505.
- TOMASELLA, J.; BORMA, L.S.; MARENGO, J.A. et al. (2010) The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem. *Hydrol. Process.*
- TRIGG, M.A.; WILSON, M.D.; BATES, P.D. et al. (2009). Amazon flood wave hydraulics. *J. Hydrol.*, 374, 92–105.
- YAMAZAKI, D.; KANAE, S.; KIM, H.; OKI, T. (2011). A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resour. Res.*, 47, W04501, doi:10.1029/2010WR009726.