

ASSIMILAÇÃO DE DADOS IN SITU E DE ALTIMETRIA ESPACIAL PARA PREVISÃO HIDROLÓGICA NA BACIA AMAZÔNICA

Rodrigo C. D. Paiva^{1,2*}, Walter Collischonn¹, Marie-Paule Bonnet², Luis Gustavo G. de Gonçalves³, Stephane Calmant⁴, Augusto Getirana⁵, Joecila Santos da Silva⁶

Resumo – Apresenta-se o desenvolvimento e avaliação de um esquema de assimilação de dados de vazão e níveis d’água aplicado em um modelo hidrológico-hidrodinâmico para previsão de vazões na bacia Amazônica. Utilizou-se o modelo hidrológico MGB-IPH acoplado a um modelo hidrodinâmico nos rios. A técnica *Ensemble Kalman Filter* - EnKF foi utilizada para assimilar informação de centenas de estações fluviométricas e de altimetria por radar do satélite ENVISAT. O EnKF teve um bom desempenho na assimilação de vazões, melhorando as estimativas do modelo nas estações fluviométricas e também transferindo informação locais não monitorados. A assimilação de dados de altimetria espacial mostrou-se capaz de melhorar as simulações em nível diário, embora as observações do ENVISAT possuam baixa resolução temporal. Desenvolveu-se um protótipo de sistema de previsão de vazões, baseado no modelo inicializado com condições iniciais ótimas e utilizando precipitação estimada por satélite disponível em tempo real. As previsões concordam com as observações, tendo bom desempenho nos grandes rios mesmo para elevados horizontes de previsão, *e.g.* >90 dias no rio Solimões/Amazonas. Os resultados mostram o potencial da modelagem hidrológica apoiada por informação de sensoriamento remoto na previsão hidrológica com alta antecedência em grandes bacias hidrográficas e/ou regiões pouco monitoradas.

Palavras-Chave – assimilação de dados, altimetria espacial, previsão hidrológica Amazônia.

ASSIMILATING IN SITU AND RADAR ALTIMETRY DATA FOR HYDROLOGICAL FORECAST IN THE AMAZON BASIN

Abstract – In this work we introduce and evaluate a data assimilation framework for gauged and radar altimetry-based discharge and water levels applied to a large scale hydrologic-hydrodynamic model for stream flow forecasts over the Amazon River basin. We used the process-based hydrological model called MGB-IPH coupled with a river hydrodynamic module. The Ensemble Kalman Filter (EnKF) technique was used to assimilate information from hundreds of gauging and altimetry stations based on ENVISAT satellite data. The EnKF performed well when assimilating *in situ* discharge, by improving model estimates at the assimilation sites and also transferring information to ungauged rivers reaches. Altimetry data assimilation improves results at a daily basis, even though radar altimetry data has a low temporal resolution. We also developed a forecast system prototype, where the model is based on initial conditions gathered by the data assimilation scheme and forced by satellite-based precipitation. The forecasts agreed well with the observations and maintained meaningful skill at large rivers even for long lead times, *e.g.* >90 days at the Solimões/Amazon main stem. Results encourage the potential of hydrological forecasts at large rivers and/or poorly monitored regions by combining models and remote sensing information.

Keywords – data assimilation, radar altimetry, Amazon hydrologic forecasting.

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 CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista.

⁴ Université Toulouse III Paul Sabatier, OMP, Laboratoire d’Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (UMR 5566 CNES CNRS IRD UPS), Toulouse/France.

⁵ NASA Goddard Space Flight Center, Hydrological Sciences Lab, Greenbelt, USA.

⁶ Universidade do Estado do Amazonas UEA.

*rodrigocdpaiva@gmail.com

INTRODUÇÃO

As águas superficiais exercem um importante papel no ciclo hidrológico e no sistema terrestre, sendo também indispensáveis em diversas atividades humanas (e.g. agricultura e energia) e associadas a grande parte dos desastres naturais. Deste modo, o seu comportamento dinâmico e eventos hidrológicos extremos, como as recentes cheias e secas ocorridas na Amazônia (Chen *et al.*, 2010; Marengo *et al.*, 2008), afetam de sobremaneira a população.

Observações hidrológicas *in situ* de vazões e níveis d'água em estações fluviométricas apresentam-se como a forma mais tradicional de monitorar as águas superficiais, embora as redes de monitoramento sejam esparsas em algumas regiões como a Amazônia. Por outro lado, têm-se desenvolvido recentemente técnicas de altimetria espacial por radar para observar níveis d'água (e.g. Santos da Silva *et al.*, 2010). Se comparadas com redes hidrológicas em regiões remotas, estas técnicas de sensoriamento remoto permitem um monitoramento com melhor resolução espacial, mas com menor amostragem temporal. Deve ser mencionada também a futura missão *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT) (Durand *et al.*, 2010) das agências espaciais NASA e CNES, projetada para fornecer imagens de alta resolução de níveis d'água de águas continentais, i.e. rios, várzeas e reservatórios, com alta amostragem temporal. Por outro lado, existem diversos esforços de modelagem hidrológica para simular processos como a dinâmica d'água em rios e várzeas inundáveis em grandes bacias como a Amazônia (e.g. Paiva *et al.*, 2013a; Getirana *et al.*, 2012; Trigg *et al.*, 2009). Entretanto, estes modelos fornecem estimativas imperfeitas devido a incertezas em sua estrutura, parâmetros e dados de entrada (Liu e Gupta, 2007).

Neste sentido, métodos de assimilação de dados (Fig. 1) apresentam-se como uma opção atraente para combinar de forma ótima a informação de modelos hidrológicos, que são inerentemente imperfeitos, com observações também incertas de estações *in situ* e/ou oriundas de sensoriamento remoto, obtendo-se assim estimativas fisicamente consistentes com redução e quantificação das incertezas (Liu e Gupta, 2007). Tais técnicas podem ser utilizadas para criar reanálises hidrológicas para estudos retrospectivos ou para estimar condições iniciais de modelos hidrológicos utilizados em sistemas de previsão em tempo real. Particularmente na Amazônia, as tentativas de desenvolver previsões hidrológicas são todas baseadas em técnicas estatísticas (e.g. Uvo *et al.*, 2000), embora existam esforços de simulação baseada em processos. Por outro lado, a pesquisa em assimilação de dados para hidrologia tem crescido nos últimos anos (e.g. Biancamaria *et al.*, 2011; Clark *et al.*, 2008; Neal *et al.*, 2007, Kumar *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012). Entretanto, a assimilação vazões ou níveis d'água tanto de observações *in situ* como de sensoriamento remoto em modelos hidrológicos de grande escala ainda é incomum.

Apresenta-se neste trabalho o desenvolvimento e avaliação de uma abordagem de assimilação de dados de vazões e níveis d'água *in situ* e de altimetria espacial em um modelo hidrológico-hidrodinâmico da bacia Amazônica. Explora-se também a utilidade deste sistema para fornecer previsões de vazões baseadas nas condições iniciais ótimas e precipitação estimada por satélite em tempo real. O trabalho está no contexto de recentes esforços de integração de modelos hidrológicos e sensoriamento remoto e desenvolvimento de sistemas de previsão em bacias pouco monitoradas.

MÉTODOS

Modelo hidrológico-hidrodinâmico

Utilizou-se o modelo hidrológico MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007) acoplado a um modelo hidrodinâmico 1D. O modelo é distribuído e baseado em processos, simulando, por exemplo, o balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamento superficial e percolação. Os escoamentos gerados em cada mini-bacia são propagados pela rede de rios usando o modelo *Muskingum Cunge*

ou um modelo hidrodinâmico 1D desenvolvido por Paiva *et al.* (2011), que resolve as equações de *Saint-Venant* e representa as várzeas alagáveis como áreas de armazenamento.

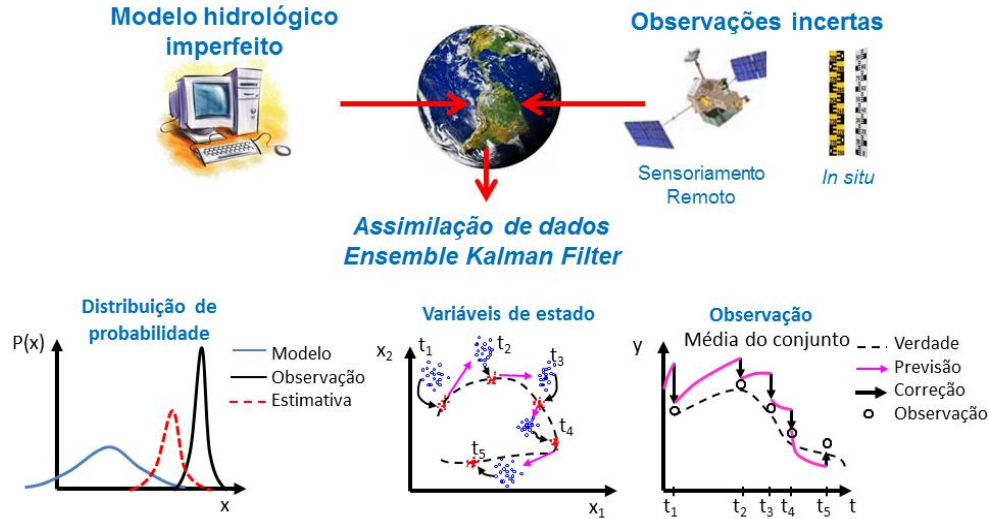


Figura 1 - Representação esquemática da técnica de assimilação de dados com o *Ensemble Kalman Filter*.

Ensemble Kalman Filter

A técnica *Ensemble Kalman Filter* - EnKF (Evensen, 2003) é baseada no filtro de *Kalman* - KF desenvolvido por Kalman (1960). O modelo representando a dinâmica do sistema estudado (*i.e.* MGB-IPH), é representado pela seguinte equação:

$$\mathbf{x}_{k+1} = M(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{q}_k \quad (1)$$

onde \mathbf{x} é o vetor com todas as variáveis de estado do modelo, e \mathbf{u} e $\boldsymbol{\theta}$ representam os forçantes (*e.g.* precipitação) e parâmetros do modelo, respectivamente, M representa as equações do modelo que relacionam os estados entre os tempos t_k e $t_{k+1} = t_k + \Delta t$, e \mathbf{q}_k representa os erros em M , \mathbf{x}_k , \mathbf{u}_k e $\boldsymbol{\theta}$. Neste estudo, \mathbf{x} é composto por todas as variáveis de estado do MGB-IPH, *e.g.* umidade do solo, vazão e níveis d'água nos rios. A equação das observações é definida como:

$$\mathbf{y}_k = H(\mathbf{x}_k) + \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad (2)$$

sendo \mathbf{y} o vetor de observações (*e.g.* vazões ou níveis d'água em alguns pontos), $\boldsymbol{\varepsilon}$ o vetor dos erros nas observações, e H o operador que relaciona as variáveis de estado \mathbf{x} com as observações \mathbf{y} .

Para a assimilação de dados com o filtro de *Kalman*, a cada intervalo de tempo k , o modelo é integrado utilizando a Eq. (1) fornecendo uma estimativa das variáveis de estado \mathbf{x}_{k+1}^f e quando uma observação é disponível, o erro desta previsão é computado como $[\mathbf{y}_{k+1} - H(\mathbf{x}_{k+1}^f)]$. Assim, o objetivo da assimilação de dados é obter uma estimativa ótima \mathbf{x}_{k+1}^a das variáveis de estado, considerando os erros do modelo e das observações. Consideram-se também premissas como: (i) linearidade, (ii) inexistência de viés e correlação espaço-temporal nos erros das observações (iii) inexistência de viés e correlação temporal nos erros do modelo e (iv) inexistência correlação entre os erros das observações e do modelo. Consequentemente, a estimativa ótima, não tendenciosa e de mínima variância das variáveis de estado é dada por:

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K}(\mathbf{y} - H\mathbf{x}^f) \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (4)$$

onde \mathbf{K} é o ganho de *Kalman*, \mathbf{P} é a matriz de variância-covariância dos erros do modelo \mathbf{q} e \mathbf{R} é a matriz de variância-covariância dos erros das observações $\boldsymbol{\varepsilon}$. A aplicabilidade do filtro de *Kalman* é limitada já que os sistemas hidrológicos normalmente são não lineares (Liu e Gupta, 2007) e as premissas acima mencionadas não são sempre válidas. Neste sentido, Evensen (2003) desenvolveu uma versão não linear do KF, o *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). No EnKF, utiliza-se o método Monte Carlo para gerar um conjunto de trajetórias do modelo onde a evolução dos seus erros, a matriz de variância-covariância pode ser estimada (Fig. 1), cada membro do conjunto é atualizado com as mesmas equações do KF (Eq. 3 e 4).

Aplicação na bacia Amazônica

Utilizou-se o modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-IPH implementado na bacia Amazônica por Paiva *et al.* (2013a). Tendo em vista o enfoque em previsão hidrológica, o modelo MGB-IPH foi forçado com dados de precipitação estimada por satélite. Utilizou-se os produtos TRMM 3B42 (Huffman *et al.*, 2007) e TRMM Merge (Rozante *et al.*, 2010).

Avaliou-se a assimilação de dados de vazões observadas em estações fluviométricas e de níveis d'água estimadas por altimetria espacial. Foram utilizados dados de vazões diárias de 111 estações fluviométricas das agências ANA, SENAMHI e HYBAM. As estimativas de altimetria espacial foram 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.

Para a aplicação do EnKF com a técnica de Monte Carlo, utilizou-se um conjunto de simulações com 200 membros. Consideram-se os erros do modelo hidrológico sendo oriundos de erros na precipitação, caracterizados por uma distribuição log-normal e correlacionados no tempo e espaço. Baseado em trabalhos anteriores e uma análise de sensibilidade (Paiva *et al.*, 2013b), foram assumidos erros com desvio padrão de 50% e comprimentos de decorrelação temporal e espacial de 10 dias e 1.5°, respectivamente. Os erros padrões das observações de vazões e níveis d'água foram considerados iguais a 10% e 20 cm, respectivamente, baseados em comparações entre vazões estimadas por curva chave e medidas *in situ* e em Santos da Silva *et al.* (2010).

Foram também avaliadas previsões de vazões produzidas com a técnica *Ensemble Streamflow Prediction* (ESP) (Day, 1985). Neste caso, utilizam-se condições iniciais ótimas estimadas pelo esquema de assimilação de dados e o modelo é forçado com um conjunto de dados de precipitação dos anos passados. As previsões foram geradas a cada 10 dias, com horizonte de 90 dias para o período de 1/1/2004 a 31/12/2005. Maiores informações são encontradas em Paiva *et al.* (2013b).

RESULTADOS

Assimilação de dados

Avaliou-se primeiramente a assimilação de dados de vazões *in situ*. Os resultados de vazão de simulações usando ou não assimilação de dados foram comparados com observações nas estações fluviométricas. Foram utilizadas as métricas: índice de Nash e Sutcliffe (ENS) e alteração na raiz do erro médio quadrático (Δrms) entre valores observados e simulados com ou sem assimilação de dados. Observa-se na Fig. 2 que as estimativas do modelo melhoram com a assimilação de dados na maioria dos postos, inclusive naqueles utilizados somente para validação. Em média, os valores de ENS aumentam de 0,71 para 0,94 e o erro *rms* diminui em 49%, fazendo com que as vazões simuladas fiquem muito mais próximas das observadas, como ilustrado em um posto utilizado para a assimilação no rio Negro (ponto a). O modelo também melhora nos postos fluviométricos utilizados para validação (*e.g.* Fig. 2 ponto b), onde o ENS aumentou de 0,62 para 0,91 e $\Delta rms = -16\%$. Estes resultados mostram que a assimilação de dados melhora as estimativas do modelo não somente nos locais dos postos utilizados, mas possivelmente também em locais não monitorados.

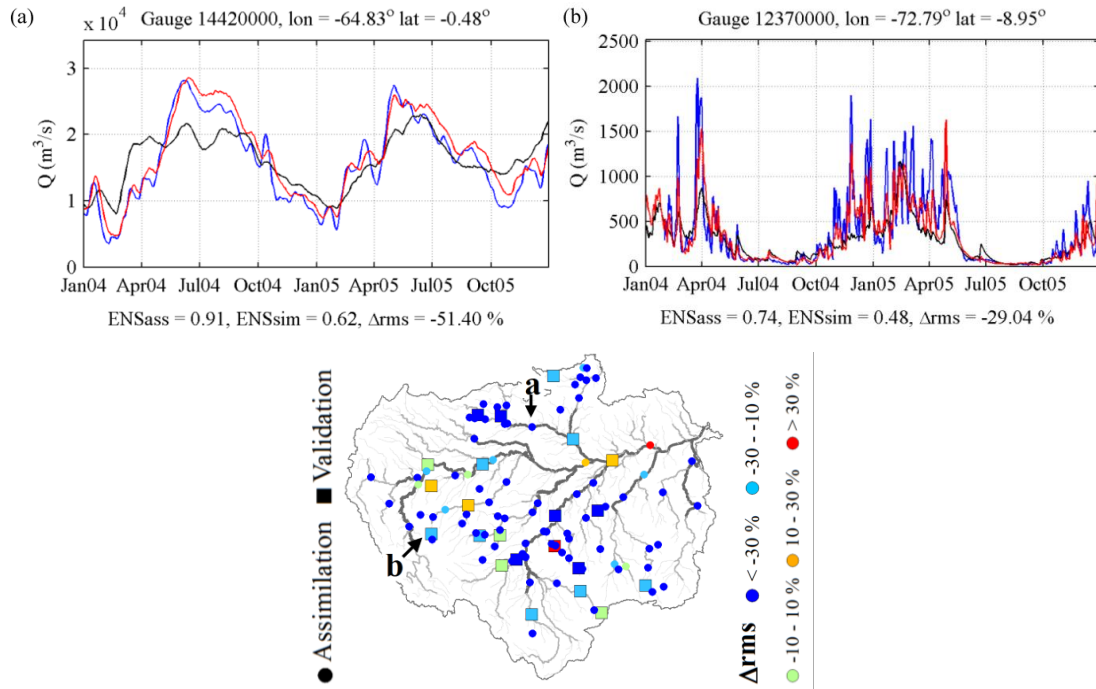


Figura 2 - Avaliação da assimilação de vazões *in situ*. Distribuição espacial da mudança na raiz do erro médio quadrático (Δrms) em postos fluviométricos utilizados na assimilação (círculos) e validação (quadrados) e vazões diárias observadas (azul), simuladas sem (preto) e com (vermelho) assimilação de dados em um ponto de assimilação no rio Negro (ponto a) e outro de validação no rio Juruá (ponto b).

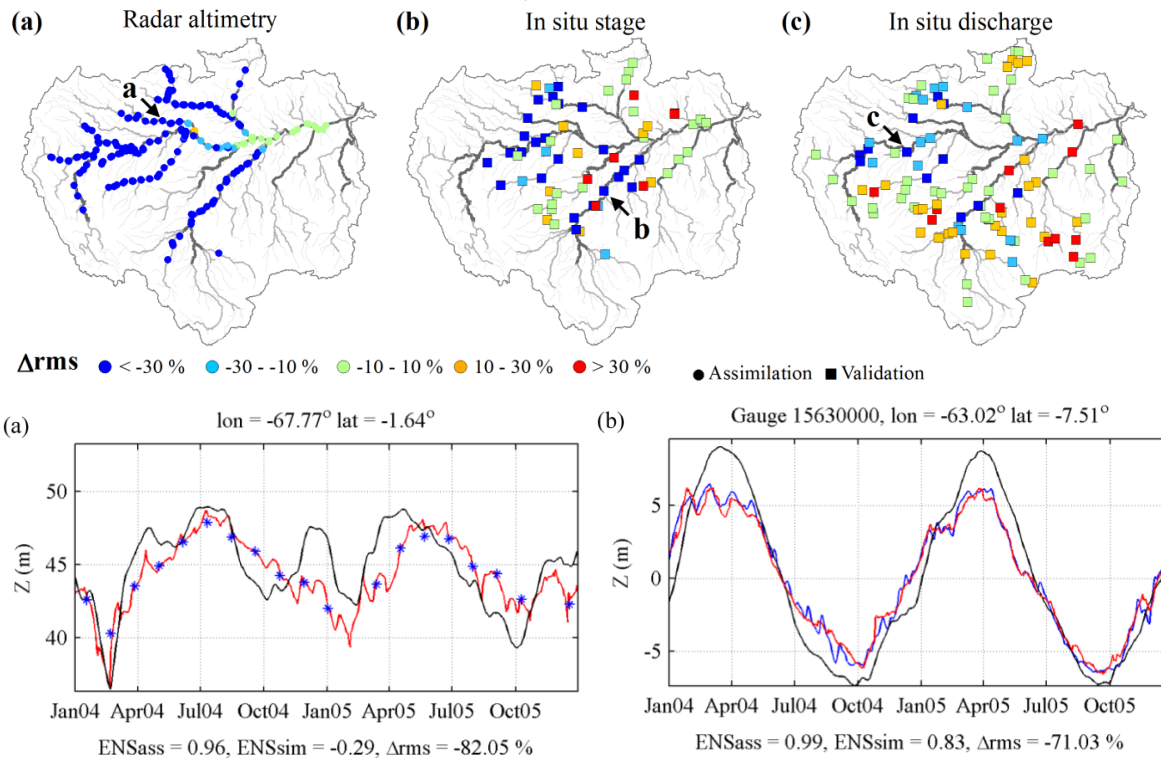


Figura 3 - Avaliação da assimilação de altimetria espacial. Distribuição espacial da mudança na raiz do erro médio quadrático (Δrms) nas estações virtuais usadas na assimilação (a) e nos postos fluviométricos com dados de cotas (b) e vazão (c) usados na validação. Níveis d'água observados (azul) e simulados sem (preto) e com (vermelho) assimilação de dados em uma estação virtual no rio Japurá (ponto a) e em um posto fluviométrico no rio Madeira (ponto b).

Em um segundo experimento, pode-se observar como a assimilação de níveis d'água em estações de altimetria espacial melhoram as estimativas do modelo nestes pontos (Fig. 3), como ilustrado no rio Japurá (ponto a). Os valores de ENS aumentam de 0,66 para 0,96 e os erros diminuem em significativamente ($\Delta rms = -56\%$). Esta melhora também é observada em estações fluviométricas utilizadas para a validação dos resultados (e.g. ponto b). Se os resultados forem comparados somente nas estações fluviométricas localizadas em rios onde existem dados de altimetria espacial, observa-se uma melhora nas estimativas de níveis d'água do modelo, com $\Delta rms = -43\%$, com ENS aumentando de 0,75 para 0,94. No caso de vazões, a assimilação de dados de altimetria causa uma melhora de $\Delta rms = -15\%$ nos postos localizados em rios com estações virtuais. Entretanto, a assimilação pode piorar os resultados em alguns outros trechos de rio. Entre os motivos para este tipo de problema, pode-se citar uma possível má caracterização das fontes de incerteza do modelo, conforme discutido em Paiva *et al.* (2013b). Por outro lado, destaca-se o fato de a assimilação de dados de altimetria espacial melhorar as estimativas do modelo em termos de níveis d'água e também de vazões. Além disso, embora os dados de altimetria do satélite ENVISAT possuam baixa resolução temporal (~35 dias), a sua assimilação melhora os resultados a nível diário. Provavelmente a baixa resolução temporal é compensada pela alta resolução espacial e pelo fato das medições em diferentes pontos não serem simultâneas.

Previsão de vazões

Neste item, apresenta-se a avaliação de previsões de vazões na bacia Amazônica utilizando o sistema desenvolvido neste estudo. As previsões foram comparadas com observações (Q_{obs}) utilizando o índice SS_{cli} , que compara o desempenho de vazões previstas (Q_{for}) com o de uma previsão de referência baseada na climatologia de vazões (Q_{cli}) (Fig. 4). Os valores de SS_{cli} variam entre $-\infty$ e 1 (ótimo), indicando que a previsão é melhor que a referência quando positivos.

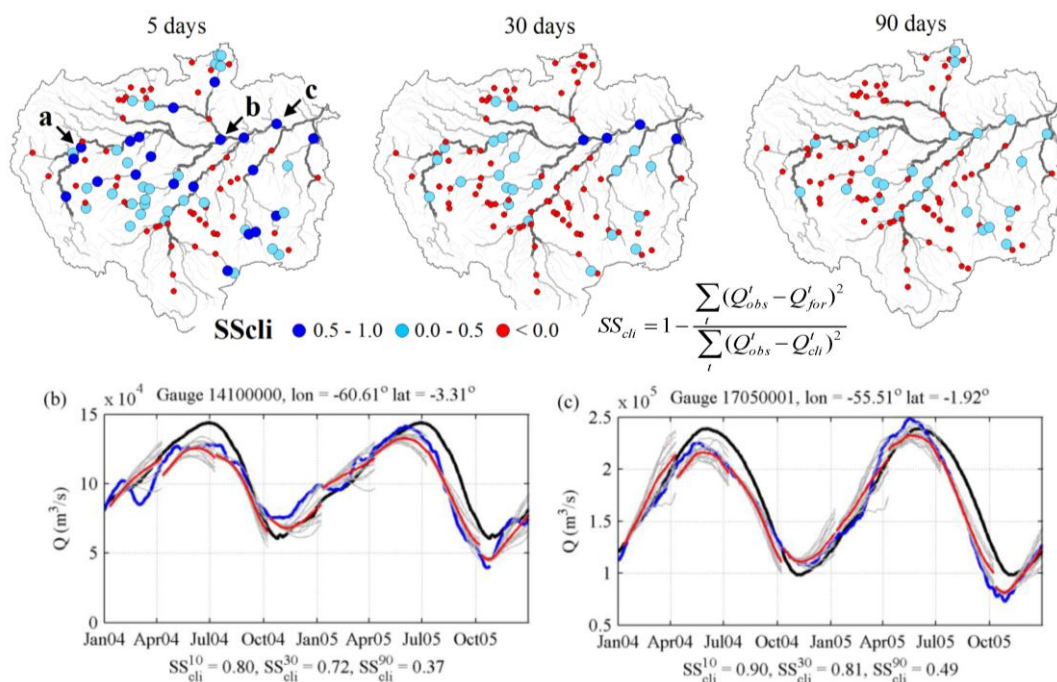


Figura 4 - Avaliação das previsões de vazões. Distribuição espacial do índice de desempenho SS_{cli} para horizontes de previsão de 5, 30 e 90 dias. Vazões observadas (azul), climatológicas (preto), algumas previsões por conjunto (cinza) e média das previsões (vermelho) no rio Solimões em Manacapuru (ponto b) e no rio Amazonas em Óbidos (ponto c).

Conforme a Fig. 4, as previsões para baixos horizontes de tempo (e.g. 5 dias) apresentam bom desempenho na maioria das estações. Entretanto, a qualidade das previsões diminui em função da

antecedência (e.g. 30 e 90 dias), sendo pior em rios pequenos, mas informativa ($SS_{cli} > 0$) principalmente nas estações localizadas nos grandes rios Amazônicos. Por exemplo, para uma antecedência de 90 dias, SS_{cli} permanece positivo em quase todas as estações do rio Solimões/Amazonas e alguns tributários. Tal comportamento é ilustrado na Fig. 4 nos rios Solimões e Amazonas. As previsões são melhores do que simplesmente usar a climatologia das vazões observadas e os valores previstos concordam com as observações mesmo em elevados horizontes de previsão. Este comportamento pode ser explicado pela grande extensão e conseqüente elevada memória da bacia Amazônica, que associada aos altos tempos de propagação das ondas de cheia, torna a previsibilidade hidrológica nos grandes rios muito mais dependente das condições iniciais, i.e. volumes d'água estocados, do que da precipitação no futuro, conforme discutido por Paiva *et al.* (2012). A análise da Fig. 4 também mostra que o modelo previu com sucesso a seca de 2005. Neste ano, o período de águas baixas ocorreu ~1 mês antes do normal e os níveis d'água chegaram a valores historicamente baixos, causando a suspensão da navegação (Marengo *et al.*, 2005). Mesmo assim, o modelo foi capaz de prever este comportamento com cerca de 90 dias de antecedência.

CONCLUSÕES

Apresenta-se o desenvolvimento e avaliação de um esquema de assimilação de dados de vazões e níveis d'água de estações fluviométricas e altimetria espacial em um modelo hidrológico-hidrodinâmico da bacia Amazônica. Em geral, observa-se o bom desempenho da técnica *Ensemble Kalman Filter* para a assimilação de dados. No caso da assimilação de vazões, as estimativas do modelo melhoram tanto em estações usadas na assimilação como em pontos de validação, mostrando ser possível transferir informação para locais não monitorados. A assimilação de dados de altimetria espacial melhora as estimativas do modelo, em termos de níveis d'água e também de vazões em um menor grau, e a nível diário, embora as observações assimiladas de possuam uma baixa resolução temporal. Em alguns casos, ocorre uma degradação dos resultados de simulação, podendo ser explicada por uma caracterização incompleta das fontes de incerteza do modelo. For fim, foi desenvolvido e testado um protótipo de sistema de previsão de vazões para a bacia Amazônica, baseado no modelo inicializado com condições iniciais ótimas do esquema de assimilação de dados e precipitação estimada por satélite disponível em tempo real. Os resultados são promissores e o modelo foi capaz de prever vazões nos principais rios amazônicos com grande antecedência (~1 a 3 meses), antecipando, por exemplo, a grande seca de 2005. No geral, os resultados aqui apresentados são encorajadores, mostrando o potencial do uso combinado de informações de modelos hidrológicos e sensoriamento remoto para previsão hidrológica em grandes bacias hidrográficas e/ou regiões pouco monitoradas.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao CNPq, FINEP, IRD, ANA, SENHAMI, ESA, NASA, HYBAM, G. Evensen, F. Fan, A. Meller e J. Neal pelo financiamento, informações e/ou comentários.

REFERÊNCIAS

- BIANCAMARIA, S.; DURAND, M.; ANDREADIS, K.M. et al. (2011). Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Arctic river modeling. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2, 373-381.
- 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.
- CLARK, M.P.; RUPP, D.E.; WOODS, R.A. et al. (2008). Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: Use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model. *Adv. Water Res.*, 31, 1309-1324, doi:10.1016/j.advwatres.2008.06.005.

- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 878-895.
- DAY, G.N. (1985). Extended streamflow forecasting using NWSRFS. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 111, 157–170.
- DURAND, M.; FU, L.L.; LETTENMAIER, D.P. et al. (2010). The surface water and ocean topography mission: Observing terrestrial surface water and oceanic submesoscale eddies. *Proceedings Of the IEEE*, 98, 5, 766–779.
- EVENSEN, G. (2003). The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 53, 343 – 367.
- 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.
- KALMAN, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the AMSE – Journal of Basic Engineering*, 82 D, 35-45.
- KUMAR, S.V.; REICHLER, R.H. ; PETERS-LIDARD, C.D. et al. (2008). A Land Surface Data Assimilation Framework using the Land Information System: Description and Applications. *Advances in Water Resources*, 31, 1419-1432, DOI:10.1016/j.advwatres.2008.01.013
- LIU, Y.; GUPTA, H.V. (2007). Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resour. Res.*, 43, W07401, doi:10.1029/2006WR005756.
- LIU, Y.; WEERTS, A.H.; CLARK, M. et al. (2012). Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3863-3887, doi:10.5194/hess-16-3863-2012.
- MARENGO, J.; NOBRE, C.; TOMASELLA, J. et al. (2008). The drought in Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 21, 495–516.
- 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. *Journal of Hydrology*, 406, 170–181.
- PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.P.; DE GONÇALVES, L.G.G. (2012). On the sources of hydrological prediction uncertainty in the Amazon, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3127-3137, doi:10.5194/hess-16-3127-2012.
- PAIVA, R.C.D. ; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P. et al. (2013a). Large scale hydrologic and hydrodynamic modelling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.*, 49, doi: 10.1002/wrcr.20067.
- PAIVA, R. C. D., COLLISCHONN, W., BONNET, M.-P. et al. (2013b). Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 2879-2925, doi:10.5194/hessd-10-2879-2013.
- ROZANTE, J.R.; MOREIRA, D.S.; DE GONCALVES, L.G.G.; VILA, D.A. (2010). Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Wea. Forecasting*, 25, 885–894, doi: http://dx.doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1
- 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 Sensing of Environment*, 114, 10, 2160-2181.
- TRIGG, M.A.; WILSON, M.D.; BATES, P.D. et al. (2009). Amazon flood wave hydraulics. *Journal of Hydrology*, 374, 92–105.
- UVO, C.B.; TÖLLE, U.; BERNDTSSON, R. (2000). Forecasting discharge in Amazonia using artificial neural networks. *International Journal of Climatology*, 20, 1495-1507, doi: 10.1002/1097-0088(200010)20:12<1495::AID-JOC549>3.0.CO;2-F.