

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO HIDROLÓGICO- HIDRODINÂMICO PARA A AMÉRICA DO SUL: PARTE 2

Vinícius Alencar Siqueira^{1} & Rodrigo Cauduro Dias de Paiva² & Anderson Ruhoff³ & Ayan Santos Fleischmann⁴ & Fernando Mainardi Fan⁵ & Walter Collischonn⁶*

Resumo – Na sequência do ajuste do modelo hidrológico-hidrodinâmico desenvolvido em escala continental (parte 1), este trabalho apresenta uma avaliação de estimativas de evapotranspiração (ET) e anomalias de armazenamento de água terrestre (TWS) simuladas para a América do Sul. As estimativas foram comparadas a uma base de dados global de ET derivada de um conjunto de vários produtos, incluindo satélite, modelos de superfície e dados de reanálise, além das anomalias de TWS observadas pela missão GRACE. De forma geral, o modelo apresentou coerência na sazonalidade de evapotranspiração para alguns dos principais sistemas hidrológicos, situando-se, na maior parte dos casos, dentro da faixa de incerteza da base de dados. Na avaliação do TWS, foi verificado um bom desempenho na região tropical da América do Sul porém com deterioração da qualidade nas latitudes mais elevadas, especialmente nas regiões com baixa disponibilidade de dados para calibração. Conclui-se que o modelo desenvolvido tem potencial para estudos hidrológicos em escala continental, sendo que bases de dados de sensoriamento podem ser utilizadas para melhorar as deficiências detectadas.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológica, América do Sul, Sensoriamento remoto

DEVELOPMENT OF A COUPLED HYDROLOGIC-HYDRODYNAMIC MODEL FOR SOUTH AMERICA: PART 2

Abstract – Following the adjustment of the hydrological-hydrodynamic model developed at continental scale (part 1), an assessment of evapotranspiration (ET) and terrestrial water storage anomalies (TWS) simulated for South America is presented. Model estimates were compared to a global dataset of ET derived from several products, including satellite, land surface models and reanalysis data, in addition to the TWS anomalies observed by the GRACE mission. In general, model estimates were in agreement in terms of ET seasonality of the main hydrological systems, being in most of the cases within the uncertainty range of the dataset used. Regarding TWS, a good performance was observed in the tropical part of South America, with less quality in higher latitudes especially in regions with low data availability for model calibration. We conclude that the developed model can be used for hydrological studies at continental scale, and remote sensing datasets can be used in order to improve some of the shortcomings outlined.

Keywords – Hydrological modelling, South America, Remote Sensing.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. vinicius.siqueira@ufrgs.br

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. rodrigocdipaiva@gmail.com

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. andersonruhoff@gmail.com

⁴ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. ayan.fleischmann@gmail.com

⁵ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. fernando.fan@ufrgs.br

⁶ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. collischonn@iph.ufrgs.br

*Autor correspondente: vinicius.siqueira@ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos são ferramentas que descrevem matematicamente os processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas, permitindo avaliação de impactos de alteração do uso do solo, efeitos de mudanças climáticas, aplicações operacionais, entre outros. Tais modelos vêm sendo cada vez mais aplicados em escalas continental a global de maneira a abranger as bacias em toda sua extensão e fornecer uma visão integrada dos recursos hídricos, especialmente quando grandes rios são compartilhados por vários países.

Apesar das diversas utilidades, a simulação hidrológica em si é sujeita a um grande número de incertezas relacionadas aos dados de entrada, à estrutura do modelo pela simplificação de processos físicos e aos parâmetros definidos no procedimento de calibração. Nesse sentido, modelos hidrológicos precisam ser validados para verificar se a qualidade de predição é mantida para outras regiões ou períodos independentes ao da calibração. Entretanto, para uma aplicação na escala da América do Sul isso se torna mais difícil, uma vez que a disponibilidade de dados é reduzida seja pela limitação de recursos das instituições responsáveis, pelo difícil acesso a regiões específicas, ou pela política de compartilhamento de informações entre os países envolvidos.

Uma forma de complementar a validação de modelos hidrológicos, usualmente realizada apenas com postos de vazão, consiste na comparação das predições do modelo com outros componentes do balanço hídrico, como evapotranspiração (ET), umidade do solo e armazenamento terrestre de água (TWS). Esta verificação permite gerar respostas mais confiáveis especialmente quando processos hidrológicos distintos devem ser estudados ou quando se busca avaliar o efeito de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Além disso, a estimativa de variáveis relacionadas ao balanço hídrico por parte de modelos de grande escala pode contribuir para a elaboração de bases de dados globais, dado que estas muitas vezes incorporam informação de diferentes fontes (p.ex. sensoriamento remoto, simulações hidrológicas, dados de reanálise) com o intuito de melhor lidar com as incertezas individuais de cada produto ou modelo (e.g. Schellekens et al. 2016; Zhang et al. 2017).

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um modelo hidrológico-hidrodinâmico de escala continental (para maiores informações sobre o modelo, ver Siqueira et al. 2017) com base em estimativas de componentes do balanço hídrico terrestre, como ET e TWS.

2. MÉTODOS

2.1 Modelo hidrológico-hidrodinâmico: MGB-IPH

O MGB-IPH é um modelo hidrológico conceitual e semi-distribuído que foi desenvolvido especialmente para grandes bacias tropicais, utilizado com sucesso em um grande número de aplicações na América do Sul (e.g. Collischonn et al. 2007; Paiva et al. 2013; Pontes et al. 2017). Na versão atual, a bacia hidrográfica é discretizada em minibacias nas quais é calculado o balanço hídrico no solo, subdivididas em unidades de resposta hidrológica (URH) categorizadas por tipo do solo e cobertura vegetal. O balanço de água no solo é realizado através da geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. A interceptação é representada por um reservatório cujo volume depende da cobertura vegetal expressa em termos de índice de área foliar, enquanto a estimativa da evapotranspiração é calculada pelo método de Penman-Monteith. Após a geração de escoamento, este sofre atenuação e retardo no interior da minibacia através de reservatórios lineares (superficial, sub-superficial e subterrâneo), sendo posteriormente propagado ao longo da rede de drenagem.

Neste estudo, a propagação hidrodinâmica nos rios é resolvida explicitamente através de uma formulação inercial local (Pontes et al. 2017), a qual despreza apenas o termo de aceleração convectiva nas equações completas unidimensionais de Saint Venant. Detalhes sobre os dados utilizados para preparação e ajuste do modelo podem ser encontrados no artigo complementar denominado “Desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a América do Sul – parte 1” (Siqueira et al. 2017).

Armazenamento total de água (TWS) - Missão GRACE

A missão denominada *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) tem como objetivo monitorar as variações espaciais e temporais no campo gravitacional terrestre (Tapley et al. 2004). As variações de TWS incluem todos os compartimentos hidrológicos, tais como água armazenada nos rios, planícies, lagos, solo, reservatório subterrâneo e aquela retida no dossel da vegetação. Nesse sentido, os dados do GRACE já foram utilizados em estudos anteriores para validação do modelo MGB-IPH na região da Amazônia (Getirana et al. 2010; Paiva et al. 2013).

No presente estudo foram utilizadas as soluções disponibilizadas no *Release 05* (RL05), produzidas pelos laboratórios *GeoForschungsZentrum Potsdam* (GFZ), *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) e *Texas Austin University - Center for Space Research* (CSR), com uma resolução espacial de 1° e acurácia aproximada de 15-20 mm de espessura de água equivalente. As soluções, originalmente compostas por um conjunto de harmônicos esféricos, são pós-processadas com a aplicação de filtros *de-striping* e de suavização espacial para reduzir erros correlacionados que se manifestam devido a problemas de amostragem do gradiente gravitacional no sentido Oeste-Leste (Wiese et al. 2016). Por fim, as soluções são distribuídas em intervalo de tempo mensal e na forma de anomalias de TWS relativas ao período entre 2004-2009. Os dados GRACE podem ser adquiridos no endereço web <http://gracetellus.jpl.nasa.gov/>.

Para derivar estimativas de TWS no modelo MGB-IPH, o volume total em todos os compartimentos hidrológicos foi calculado a cada intervalo de tempo mensal, sendo que o armazenamento total de água em cada minibacia é obtido através da seguinte expressão:

$$TWS_{i,t} = \sum_{u=1}^n [(SI_{i,t,u} + W_{i,t,u}) * w_u] + \frac{(V_{bas_{i,t}} + V_{int_{i,t}} + V_{sup_{i,t}} + V_{rio_{i,t}})}{A_i * 1000} \quad (1)$$

Onde: $TWS_{i,t}$ é o armazenamento terrestre de água para a minibacia i e tempo t (mm); SI é a lâmina de água interceptada pela vegetação (mm); W é a umidade do solo (mm); w é o fator de ponderação da HRU; V_{bas} é o volume do reservatório subterrâneo (m³); V_{int} é o volume do reservatório sub-superficial (m³); V_{sup} é o volume do reservatório superficial (m³); V_{rio} é o volume armazenado na calha do rio e na planície (m³) e; A é a área da minibacia (km²).

Para manter concordância com o pós-processamento dos dados GRACE, um filtro gaussiano de 300 km foi aplicado ao TWS de cada minibacia, similar ao aplicado por Paiva et al. 2013). Posteriormente, estas foram agrupadas em células com mesma resolução espacial de 1°, utilizando um ponderador de acordo com a área das minibacias. Por fim, as anomalias de TWS do MGB foram obtidas para cada célula da grade subtraindo-se a média dos valores, calculadas para o período entre 2004-2009.

Evapotranspiração - Climate Data Record (CDR)

Os valores de referência de ET foram extraídos da base de dados global denominada *Climate Data Record* – CDR (Zhang et al. 2017). Esta base fornece estimativas dos principais componentes do ciclo hidrológico terrestre (Precipitação, ET, vazão e variações de TWS) para o período entre 1984-2010, considerando o fechamento do balanço hídrico em uma grade com resolução espacial de 0,5°. Adicionalmente, são fornecidos também os valores de erro/incerteza estimados para cada um destes componentes.

No caso da ET do CDR, são utilizados 5 produtos derivados de satélite, 3 modelos de superfície – *Land Surface Models* (VIC, NOAH e CLM) e 2 produtos de reanálise (MERRA e ERA-Interim). Os produtos de ET derivados de satélite incluem o *Global Land-surface Evaporation: the Amsterdam Methodology* – GLEAM e outros quatro produtos estimados com base nas equações de Penman-Monteith (PM) e Priestly-Taylor (PT), que utilizam base de dados de sensoriamento remoto além de forçantes meteorológicas de reanálise e balanço de radiação em superfície. Estes produtos são combinados através da técnica descrita em Luo et al. (2007), a qual usa uma abordagem bayesiana e uma regressão linear ponderada para estimar um valor ótimo do *ensemble* (conjunto) de ET. O peso de cada produto na determinação do valor ótimo depende da variância em relação à média do conjunto, sendo que o desvio em relação a este último é assumido como um *proxy* do erro (incerteza) dos produtos individualmente. Juntamente com a ET, as estimativas das outras variáveis são ajustadas para garantir o fechamento do balanço hídrico em cada pixel utilizando uma técnica de assimilação de dados denominada *Constrained Kalman Filter* (Pan et al., 2012).

Para fins de comparação, um procedimento de agregação espacial de 0,5° para 1° foi inicialmente realizado na grade do CDR. Posteriormente, as minibacias foram agrupadas em pixels com esta mesma resolução espacial, de maneira similar ao procedimento realizado para comparação do TWS estimado pelo MGB-IPH e observado pelo GRACE.

Configuração da simulação e avaliação do desempenho do modelo

A simulação com o MGB-IPH foi realizada para o período de 1990 a 2010, utilizando os dois primeiros anos para aquecimento do modelo. Para avaliação do desempenho foi utilizado o erro médio absoluto (EMA), erro médio relativo (EMR), viés no desvio padrão (BIAS), RMSE e índice de Nash-Sutcliffe:

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{sim_i} - ET_{obs_i}|}{n} \quad (2)$$

$$EMR = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{ET_{sim_i} - ET_{obs_i}}{ET_{obs_i}} \right)}{n} \quad (3)$$

$$RMSE_{TWS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TWS_{sim_i} - TWS_{obs_i})^2}{n}} \quad (4)$$

$$BIAS_{TWS} = \frac{\sigma_{TWS_{sim}} - \sigma_{TWS_{obs}}}{\sigma_{TWS_{obs}}} \quad (5)$$

$$ENS = 1 - \frac{\sum (TWS_{obs_i} - TWS_{calc_i})^2}{\sum (TWS_{obs_i} - TWS_{obs})^2} \quad (6)$$

Onde: ET_{sim_i} e ET_{obs_i} são, respectivamente, a evapotranspiração simulada e observada (estimada pelo CDR) no tempo i ; $\sigma_{TWS_{sim_i}}$ e $\sigma_{TWS_{obs_i}}$ são, respectivamente, o desvio padrão da anomalia de TWS simulada e observada no tempo i ; n é o número de observações.

3. RESULTADOS

A figura 1 apresenta um comparativo entre a ET calculada pelo modelo MGB-IPH e aquela estimada através da combinação ótima de vários produtos globais de ET (CDR). Os erros aqui apresentados descritivamente correspondem à diferença entre as duas estimativas. Observa-se que na maior parte da América do Sul, a estimativa dos erros/incerteza na base de dados de ET do CDR é maior do que a diferença absoluta entre o MGB-IPH e o CDR. Estes erros tendem a ser maiores na região central e noroeste da América do Sul, (principalmente no entorno da bacia Amazônica e na bacia do rio Paraguai), chegando a valores próximos a $30 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$. As maiores diferenças entre as estimativas de ET foram observadas em regiões localizadas ao longo da Cordilheira dos Andes, no sudoeste da Amazônia e nas Guianas, onde verifica-se uma superestimativa dos valores simulados na faixa de 35 a $50 \text{ mm} \cdot \text{mês}^{-1}$, o que corresponde a valores relativos entre 50% e mais de 100%. Essas diferenças podem ser explicadas pelas deficiências relativas às informações de uso do solo no modelo MGB-IPH (obtidos de Fan et al., 2015) e limitação do modelo em lidar com processos que não são típicos de regiões tropicais, como derretimento de neve, por exemplo. Além disso, modelos de estimativa de ET por sensoriamento remoto e/ou reanálise (CDR) apresentam incertezas relacionadas à cobertura de nuvens, processos orográficos (como aqueles predominantes nos Andes) e parametrização de uso e cobertura da terra, em função da inexistência de dados observados para calibração desses modelos.

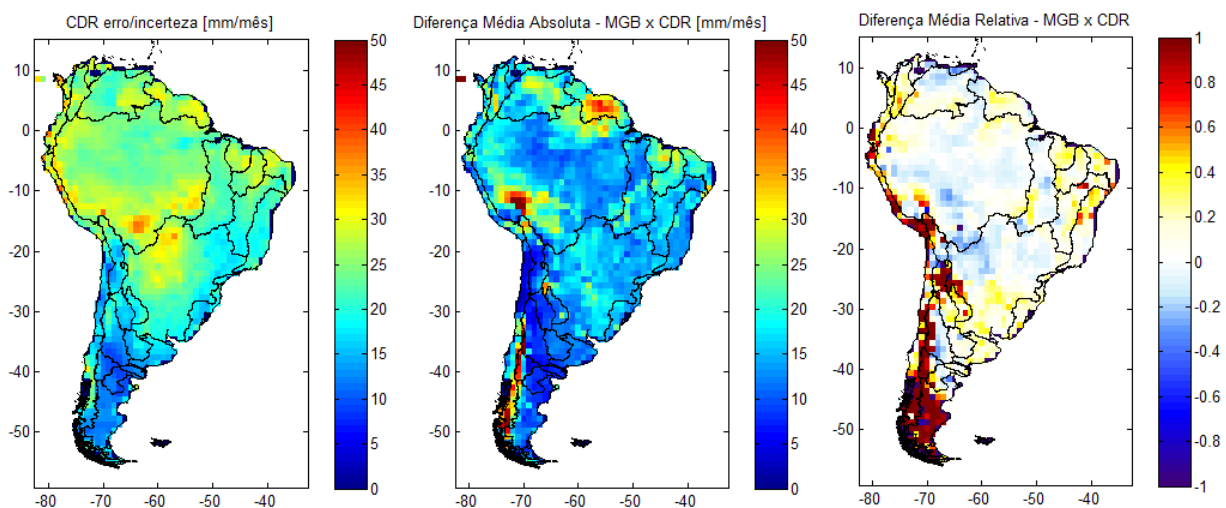


Figura 1 – Erro/incerteza da estimativa de ET combinada da base de dados do CDR (a); Diferença média absoluta entre a estimativa de ET do CDR x MGB (mm) (b); Diferença média relativa entre a estimativa do ET do CDR x MGB (c).

A figura 2 apresenta a sazonalidade da ET em alguns dos grandes sistemas hidrológicos na América do Sul e também para toda escala continental. Na bacia Amazônica, os valores de ET apresentam valores médios de $100 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$, mantendo-se relativamente constantes ao longo do ano.

Comportamento similar é observado também nos valores médios relativos à América do sul. Já nas bacias do Prata e do São Francisco, a sazonalidade de ET é bastante pronunciada, com valores variando entre 40 mm (entre os meses de junho e setembro) e 100 mm no mês de janeiro. É possível verificar que existe uma boa concordância entre o MGB-IPH e a base de dados do CDR, especialmente em termos de valores absolutos de ET. Entretanto, na bacia do São Francisco observa-se uma defasagem temporal na sazonalidade da ET, onde os valores calculados pelo modelo MGB-IPH estão atrasados em aproximadamente um mês em relação aos valores estimados através da base de dados CDR.

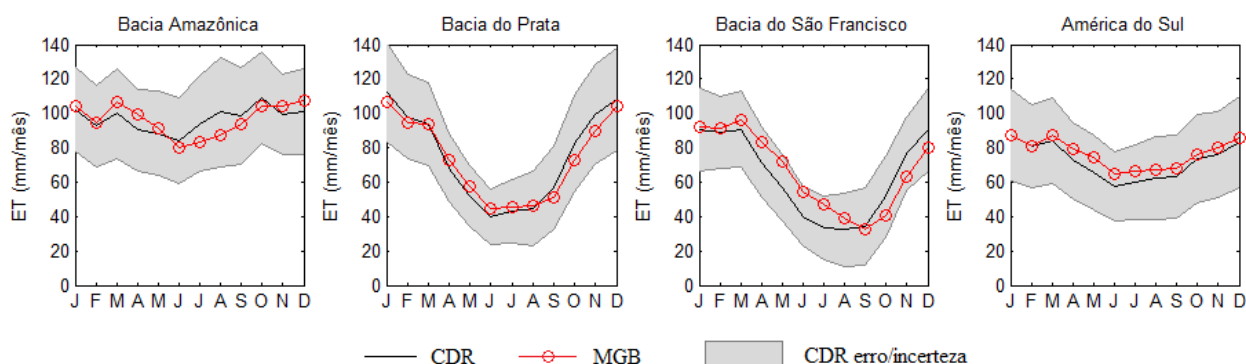


Figura 2 – Comparação da sazonalidade de ET entre o modelo MGB-IPH e a estimativa combinada do CDR (1990-2010), nas bacias do Amazonas (a), Prata (b), São Francisco (c) e para toda América do Sul (d).

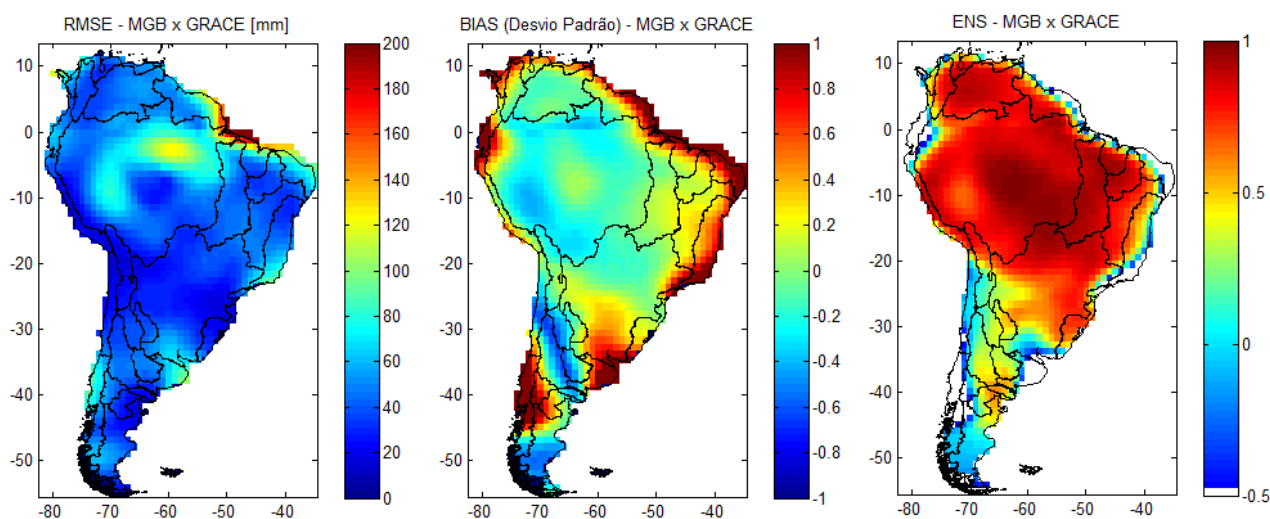


Figura 3 – Comparação do armazenamento total de água entre o modelo MGB e GRACE (conjunto médio – CSR,GFZ e JPL) em termos de RMSE (a); Biais no desvio padrão (b); Eficiência de Nash-Sutcliffe - ENS (c)

Na avaliação do TWS (figura 3), o modelo demonstrou um bom desempenho ($ENS > 0.7$) principalmente na parte da América do Sul situada na região tropical. Embora grandes magnitudes de RMSE podem ser encontradas em áreas no nordeste da bacia Amazônica (maior do que 100 mm), estes valores não são expressivos em termos de viés devido à grande amplitude de TWS nesta região. Já nas latitudes mais altas, onde a disponibilidade de postos fluviométricos foi menor (ou até inexistente) para a calibração (parte 1, Siqueira et al. 2017), nota-se claramente uma redução de desempenho do modelo. Por serem regiões bastante áridas, valores baixos de RMSE acabam sendo pronunciados em termos percentuais devido à amplitude de TWS ser menor. Ainda, grandes superestimativas no desvio padrão em algumas regiões de borda, que conduzem a um baixo

desempenho do modelo, podem estar também relacionadas a erros de vazamento (*leakage*) nos dados do GRACE que se manifestam entre os limites de oceano e continente (Wiese et al. 2016).

Na figura 4 é mostrada série temporal de TWS para o período entre 02/2002 e 12/2009 para algumas regiões da América do Sul. É possível observar que o MGB-IPH consegue capturar a variabilidade inter-anual das anomalias de TWS, especialmente nas bacias Amazônica e do Prata, que são bastante coerentes com os dados GRACE. No São Francisco, nota-se que nas anomalias negativas a recessão tende a ser mais rápida no modelo hidrológico, porém a forma dos picos é muito similar nas anomalias positivas. Na América do Sul, a amplitude de TWS é superestimada tanto nas anomalias negativas como nas positivas, o que pode ter relação com os erros de vazamento (*leakage*) na borda do continente, conforme mencionado anteriormente.

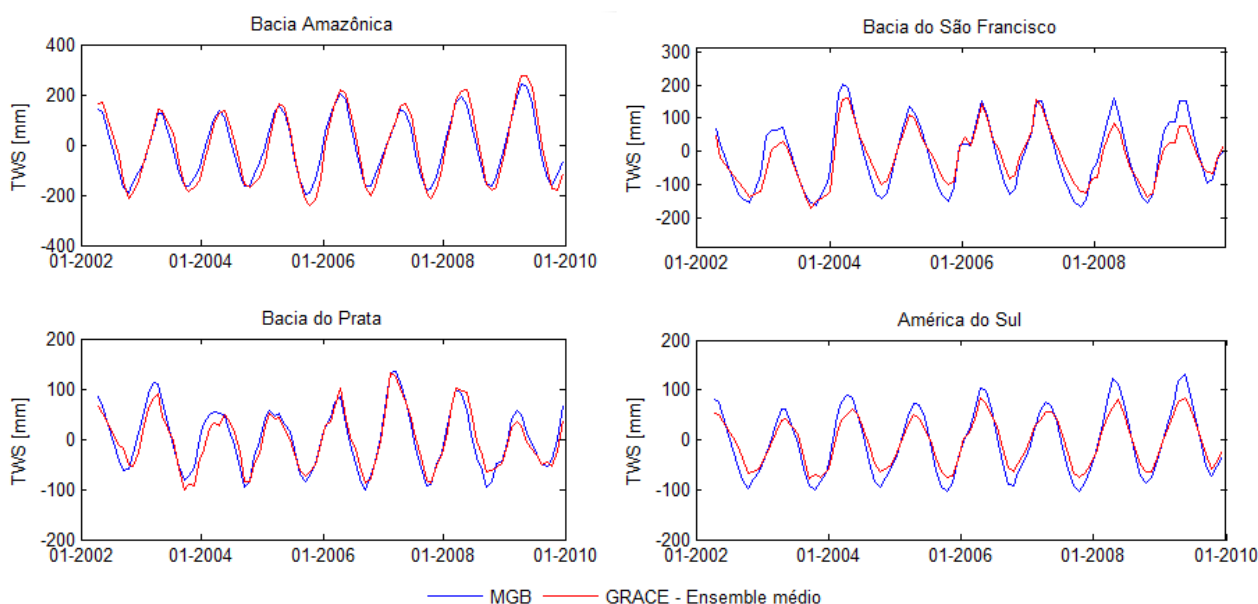


Figura 4 – Comparação da série temporal de armazenamento terrestre de água (TWS) estimada pelo modelo MGB-IPH e o conjunto médio do GRACE (2002-2010), nas bacias do Amazonas (a), Prata (b), São Francisco (c) e para toda a América do Sul (d).

4. CONCLUSÃO

No presente estudo, foi realizada uma avaliação preliminar de algumas variáveis relacionadas ao balanço hídrico terrestre, simuladas a partir de um modelo hidrológico-hidrodinâmico desenvolvido para a América do Sul. De forma geral, o modelo apresentou coerência na sazonalidade de evapotranspiração quando comparada a um produto global que combina estimativas de ET de diversas fontes (satélite, modelos de superfície e reanálise), situando-se, na maior parte dos casos, dentro da faixa de incerteza destes dados. Na avaliação do TWS, foi verificado um bom desempenho na região tropical da América do Sul e boa captura da variabilidade inter-anual nas bacias do Amazonas e Prata, porém com deterioração da qualidade nas latitudes mais altas, especialmente nas regiões com baixa disponibilidade de dados para calibração.

Destaca-se que, bases de dados de sensoriamento remoto são constantemente produzidas com resoluções cada vez mais finas, as quais podem ser utilizadas juntamente com técnicas de assimilação para melhorar a representação de componentes do balanço hídrico do modelo. Nesse sentido, conclui-se que o modelo desenvolvido tem potencial para utilização em estudos hidrológicos na escala continental.

REFERÊNCIAS

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

FAN, F.M.; BUARQUE, D.C.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. (2015) Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 21, 2015. Brasília. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2015.

GETIRANA, A.; ROTTUNO FILHO, O. C.; MANSUR, W. J.; BONNET, M.-P.; SEYLER, F.; GUYOT, J. L.; FRAPPART, F.; MARTINEZ, J.-M. ROUX, E.; CALMANT, S.; RAMILIEN, G.; XAVIER, L. COLLISCHONN, W. (2011) Calibração e validação de modelo hidrológico com observações in situ, altimetria e gravimetria espaciais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n.1, pp. 29-45.

LUO, L.; WOOD, E. F.; PAN, M. (2007) Bayesian merging of multiple climate model forecasts for seasonal hydrological predictions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 112, D10102, doi:10.1029/2006JD007655.

PAIVA, R. C. D., D. C. BUARQUE, W. COLLISCHONN, M.-P. BONNET, F. FRAPPART, S. CALMANT, AND C. A. B. MENDES, (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin, *Water Resources Research*, 49, pp. 1226–1243.

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

SCHELLEKENS et al. (2016) A global water resources ensemble of hydrological models: the earthH2Observe Tier-1 dataset. *Earth System Sciences Data Discussions*, <https://doi.org/10.5194/essd-2016-55>, in review, 2016.

SIQUEIRA, V. A. S.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a América do Sul: parte 1. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, 22. Florianópolis. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2017.

TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; RIES, J. C.; THOMPSON, P. F.; WATKINS, M. (2004) GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, v. 305, pp. 503–505.

WIESE, D. N.; LANDERER, F. W.; WATKINS, M. M. (2016) Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05 GRACE mascon solution. *Water Resources Research*, v.52, pp. 7490-7502.

ZHANG et al (2017). A Climate Data Record (CDR) for the global terrestrial water budget: 1984–2010, *Hydrology Earth System Sciences Discussions*. In Review.