

## Validação do modelo hidrológico MGB-IPH com umidade do solo da missão SMOS na bacia do Alto Paraná

Bibiana Rodrigues Colossi<sup>1,2</sup>  
Ayan Santos Fleischmann<sup>1,3</sup>  
Vinicius Alencar Siqueira<sup>1,4</sup>  
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>1,5</sup>  
Fernando Mainardi Fan<sup>1,6</sup>  
Anderson Ruhoff<sup>1,7</sup>  
Paulo Rógenes Monteiro Pontes<sup>1,8</sup>  
Walter Collischonn<sup>1,9</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

Caixa Postal 91501-970, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Brasil  
bibiana.colossi@gmail.com<sup>2</sup>/bibiana.colossi@ufrgs.com<sup>2</sup>, ayan.fleischmann@gmail.com<sup>3</sup>,  
vinisiquera@gmail.com<sup>4</sup>, rodrigocdpaiva@gmail.com<sup>5</sup>, fernando.fan@ufrgs.br<sup>6</sup>,  
andersonruhoff@gmail.com<sup>7</sup>, p.rogenes@gmail.com<sup>8</sup>, collischonn@iph.ufrgs.br<sup>9</sup>

**Abstract.** Large scale representation of soil moisture conditions can be achieved through hydrological simulation and remote sensing techniques. However, both methodologies have several limitations, which suggests the potential benefits of using both information together. The main objective of this study is to perform a validation for the soil moisture simulated with a large scale semi-distributed hydrological model, MGB-IPH, using remotely sensed soil moisture from SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) L3 product. The study aimed to analyze results in South American continent, where hydrometeorological monitoring is usually very scarce. The study was performed in Paraná River Basin, an important South American basin, whose extension and particular characteristics allow the representation of different climatic, geological, and, consequently, hydrological conditions. Soil moisture estimated with SMOS was transformed from water content to a Soil Water Index (SWI) so it is comparable to the saturation degree simulated with MGB-IPH model. Results show that this type of analysis can be very useful, because it allows to recognize limitations in both remotely sensed observations and hydrological model simulations. In the case of the hydrological model, this analysis can avoid the use of parameters out of range, in an attempt to compensate model limitations. Also, it indicates aspects of the model where efforts should be concentrated, in order to improve hydrological or hydraulics process representation.

**Palavras-chave:** remote sensing, hydrological modelling, sensoriamento remoto, modelagem hidrológica.

### 1. Introdução

A umidade do solo tem um importante papel no ciclo hidrológico, afetando a geração de escoamento e fluxos de umidade e energia. Eventos extremos como secas e cheias estão diretamente conectados às condições de umidade do solo. Assim, simulações apropriadas desta variável e de sua variação temporal são críticas para representar tais processos hidrológicos. Porém, medições de umidade do solo *in situ* são escassas, mal distribuídas nos continentes e limitadas para capturar padrões de umidade de grande escala. Para estimativas em grande escala, passam a ser fontes de dados modelos hidrológicos ou *Land Surface Models*, que simulam matematicamente a umidade do solo a partir de balanços entre precipitação, evapotranspiração e demais fluxos hidrológicos, como também produtos de sensoriamento remoto provenientes de missões como SMOS - *Soil Moisture and Ocean Salinity* (Kerr et al., 2010) e SMAP (Entekhabi et al., 2010).

No entanto, tanto estimativas com simulação hidrológica quanto por sensoriamento remoto têm limitações. Produtos de sensoriamento remoto são limitados quanto a resolução espacial e temporal, e são susceptíveis a uma série de fontes de erros. No caso da missão SMOS, suas estimativas são impactadas principalmente por efeitos de vegetação e interferência por radio-frequência (RFI), e em menor intensidade por características atmosféricas, rugosidade da superfície, topografia e textura dos solos (Kerr et al., 2012). Por sua vez, a representação de

processos hídricos nos solos é muitas vezes simplificada em modelos hidrológicos. Modelos complexos, que representem a dinâmica da interação entre umidade do solo e crescimento de plantas requerem dados de entrada muitas vezes de difícil aquisição, além de envolver uma maior parametrização do que modelos mais simples de balanço hídrico (o que aumenta as incertezas), utilizando frequentemente princípios de *upscaling* de funções desenvolvidas para escalas pequenas e locais (e.g., Equação de Richards para infiltração de água no solo) (Zhang et al., 2002). Assim, o uso de ambas as informações de forma combinada (sensoriamento remoto e modelagem de umidade do solo), e a validação cruzada entre estes, pode ser uma interessante forma de melhorar a capacidade preditiva da umidade do solo.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é realizar uma validação cruzada entre a umidade do solo calculada com um modelo semidistribuído de grande escala e o produto de umidade do solo da missão SMOS. Foi aplicado o modelo MGB-IPH (Collischonn et al., 2007) na bacia do rio Paraná e o produto SMOS L3 de resolução temporal de 3 dias.

## 2. Metodologia de trabalho

### 2.1 Bacia do Alto rio Paraná

A bacia do Alto Paraná é um dos principais sistemas hídricos na América Latina, com cerca de 900,000 km<sup>2</sup> de área de drenagem próximo da barragem de Itaipu, após a confluência com o Rio Iguaçu. Além do uso para geração de energia, as águas da bacia são utilizadas intensamente para agricultura, indústria e abastecimento humano. Devido a sua grande abrangência espacial, a bacia apresenta significativa variação climática, topográfica e pedológica, apresentando diferentes respostas hidrológicas em diferentes regiões (Figura 1a). Existe uma expressiva diferença em relação à rede de monitoramento hidroclimática: enquanto na parte leste existe uma densa rede, a parte oeste é mal monitorada por estações pluviométricas e fluviométricas. Sob uma perspectiva hidrogeológica, a bacia é também bastante heterogênea, variando de rochas areníticas permeáveis no oeste a geologia ígnea e impermeável no norte e leste (Figura 1b).

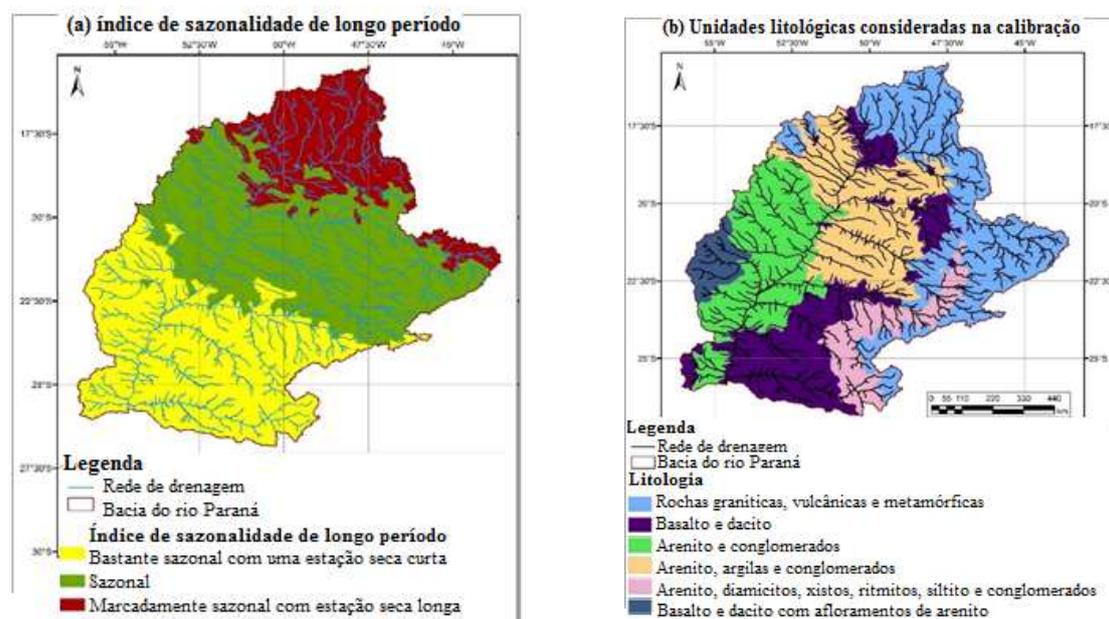


Figura 1. Caracterização da bacia do rio Paraná: (a) índice de sazonalidade de longo período, baseado na metodologia de Walsh e Lawler (1981) e calculado para o período de 1998 a 2015; (b) unidades litológicas utilizadas para calibração do modelo.

## 2.2 Modelo MGB-IPH

O MGB-IPH é um modelo hidrológico conceitual, semidistribuído, que tem sido amplamente utilizado para simulações de bacias de grande escala na América do Sul (Collischonn et al., 2007). Na sua versão atual, a topologia e as características hidráulicas são extraídas de modelos digitais de elevação utilizando o pacote de ferramentas IPH-HydroTools (Siqueira et al., 2016), onde a bacia é subdividida em minibacias. Combinações de tipo e uso do solo para cada minibacia são classificadas como Unidades de Resposta Hidrológica (URH) e parâmetros do modelo são associados a cada URH. Em cada minibacia é calculado o balanço hídrico vertical em uma única camada de solo, sendo que o escoamento é gerado com base no armazenamento de água desta camada. Vazões geradas em cada minibacia são transferidas para reservatórios lineares, de onde são então liberadas na rede de drenagem e propagadas com o método Muskingum-Cunge linear.

Para comparação com o produto de umidade do solo do SMOS, o armazenamento de água no solo foi convertido para grau de saturação (GS) de água, equivalente à relação entre armazenamento de água naquele instante e a máxima capacidade de armazenamento, que é um parâmetro do modelo.

## 2.3 Dados de entrada do modelo MGB-IPH

Dados de precipitação e vazão foram obtidos a partir da plataforma HidroWeb, da ANA – Agência Nacional de Águas. Como as vazões da bacia são bastante regularizadas por reservatórios, optou-se por utilizar também séries naturalizadas de vazão disponibilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Como dados de clima foram adotadas as normais climatológicas das estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). O número de postos utilizados de precipitação, vazão e clima foram de, respectivamente, 5201, 499 e 195. Para a extração de dados topológicos da bacia foi utilizado o MDE do SRTM com 90 m de resolução espacial e a identificação de URHs baseou-se no mapa desenvolvido por Fan et al. (2015).

## 2.4 Produto SMOS Level 3 (L3)

A missão SMOS é a primeira desenvolvida para monitorar remotamente umidade do solo no globo, utilizando sinais de microondas passivo 1,41 GHz (Banda L). A profundidade amostrada é da ordem de 2.5-3.5 cm (Escorihuela et al., 2010) com uma acurácia de no mínimo  $0.04 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , providenciando cobertura global com uma revisita de 3 dias no Equador e resolução espacial de 25 km (Kerr et al., 2010).

Para validação cruzada da umidade de solo foi utilizado o produto SMOS Level 3 com reprocessamento RE02, disponibilizado pelo CATDS (Centre Aval de Traitement des Données) (Jacquette et al., 2010). A qualidade dos pixels é estimada através do índice DQX, e aqueles com baixa qualidade ( $\text{DQX} < 0,06$ ) foram removidos. Além disso, neste estudo foram utilizadas apenas as observações obtidas em órbita ascendente devido à maior acurácia desta como observado em outros trabalhos (e.g., Al-Yaari et al., 2014). Para cada minibacia, valores do SMOS L3, com resolução espacial de 25 km, foram interpolados utilizando método baseado no inverso do quadrado da distância, sendo que o raio de interpolação foi baseado na raiz quadrada da área de cada minibacia.

## 2.5 Soil Water Index - SWI

Enquanto o modelo MGB-IPH simula o grau de saturação do solo em uma única camada de solo, as observações do SMOS são fornecidas como valores absolutos de umidade do solo ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) para os primeiros centímetros de solo. Para tornar estas estimativas comparáveis foi utilizado o método do *Soil Water Index* (SWI) proposto por Wagner et al. (1999). Este índice qual assume que a variação do perfil médio de saturação do solo é linearmente relacionada com

a diferença entre o grau de saturação da superfície e deste perfil (Brocca et al., 2010), e já foi utilizado em estudos similares para estimar a umidade do solo na zona não-saturada (e.g. Silvestro et al., 2015). O método consiste em um filtro exponencial escrito na forma recursiva (Albergel et al., 2008):

$$SWI_n = SWI_{n-1} + K_n(ms(t_n) - SWI_{n-1}) \quad (1)$$

Onde  $n$  é um índice de tempo;  $ms(t_n)$  é a umidade do solo estimada por sensoriamento remoto, reescalada para os máximos e mínimos valores observados e;  $K$  um fator de ganho, que varia entre  $[0,1]$  e é estimado por:

$$K_n = \frac{K_{n-1}}{K_{n-1} + e^{\frac{(t_n - t_{n-1})}{T}}} \quad (2)$$

Onde  $T$  é um parâmetro de tempo que indica a defasagem entre processos na superfície e no perfil da zona não-saturada. e que deve ser correlacionado a medições obtidas em campo, mas dada a dificuldade de obtenção de dados de umidade *in situ*, adotou-se neste estudo um valor de  $T=20$  baseado em valores razoáveis apresentados por Wagner et al. (1999). Além disso, para evitar uma excessiva suavização dos valores de umidade foi realizado um reescalamento do valor de SWI (Equação 3) baseado nos valores de climatologia simulados pelo MGB-IPH e utilizando o método de mínimos-máximos descrito em Brocca et al. (2013), conforme empregado em Silvestro et al. (2015). O procedimento de reescalamento foi realizado para cada minibacia utilizando os valores mínimos e máximos de grau de saturação simulados (GS-MGB), de acordo com o seguinte:

$$SWI^*_{m,n} = \frac{SWI_{m,n} - \min(SWI_m)}{[\max(SWI_m) - \min(SWI_m)]} \times [\max(GS_m) - \min(GS_m)] + \min(GS_m) \quad (3)$$

Onde  $SWI^*$  é o SWI reescalado;  $m$  e  $n$  são índices relacionados a minibacia e tempo, respectivamente, e  $GS_m$  é o grau de saturação na minibacia  $m$ .

## 2.6 Calibração e validação do modelo

O período de calibração foi de 2000 a 2010, onde os principais parâmetros do modelo foram calibrados para melhorar a representação das vazões. A validação do modelo foi realizada para o período entre 2010 a 2014, visto que dados do SMOS são disponíveis apenas a partir de 2010. Para o período de validação, apenas 26 estações fluviométricas foram identificadas com dados.

## 3. Resultados e discussão

Resultados foram avaliados para grau de saturação do solo e vazões através do índice de Eficiência de Kling-Gupta - KGE (Gupta et al., 2009). Para a área de drenagem a montante de cada posto de vazão observada foi comparado a série de grau de saturação GS-MGB médio com a média dos valores de SWI estimados através do SMOS. A comparação entre grau de saturação do solo simulada pelo MGB-IPH e a observação do SMOS está apresentada na Figura 3a em termos da métrica KGE para cada minibacia, enquanto a Figura 3b apresenta os resultados da validação entre vazões observadas e calculadas.

Há três áreas principais de baixa concordância entre umidade do solo simulada e estimada através de sensoriamento remoto. Na porção leste da bacia, uma performance razoável foi observada para as vazões simuladas (Figura 3b), apesar do falho desempenho do KGE para umidade do solo (Figura 3a). Esta área, perto do Rio Grande e do rio Tietê, sofre de uma forte influência de RFI. Um mapa de probabilidade de RFI pode ser analisado em [http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS\\_blog/smos\\_rfi/](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/smos_rfi/), onde se observa que esta interferência

pode ser forte em grandes áreas urbanas, tais como São Paulo. Infere-se disto que a qualidade dos dados do SMOS e, conseqüentemente, do SWI do SMOS, podem não ser confiáveis nesta região. A região sudoeste, próximo ao rio Iguçu na área da usina de Itaipu (próximo à estação 26 na Figura 3b) possui uma cobertura vegetal consideravelmente densa, que pode estar afetando o desempenho do SMOS nesta área. Al-Yari et al. (2014) observaram que para IAF (Índice de Área Foliar) maior que cerca de  $4 \text{ m}^2/\text{m}^2$  o produto L3 do SMOS apresenta uma correlação mais baixa com a umidade do solo estimada através do modelo de superfície MERRA-Land. Por fim, a área oeste da bacia, próxima ao rio Pardo, também é uma zona identificada como de baixa correlação entre o GS-MGB e SWI-SMOS. A formação geológica da região, juntamente com o fato de ser uma área fracamente monitorada quanto a variáveis hidrometeorológicas, impactam negativamente no desempenho do modelo hidrológico.

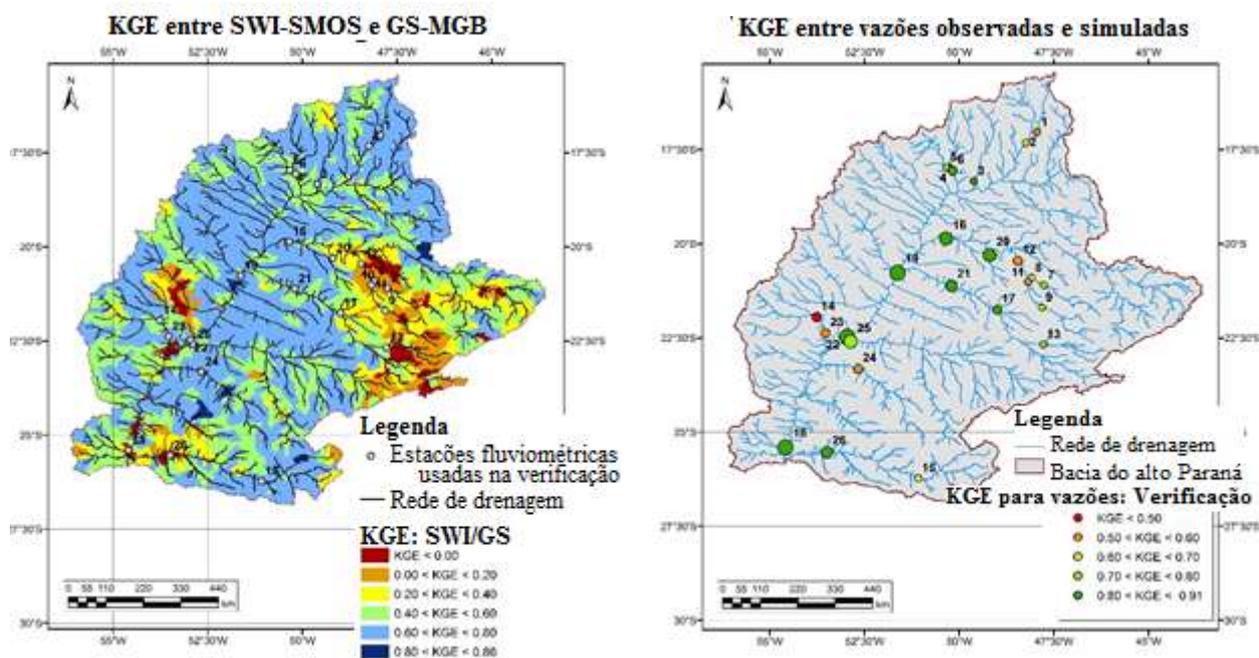


Figura 3. Resultados da validação do modelo por minibacia. (a) Valores de KGE entre SMOS SWI grau de saturação de solo. (b) Valores de KGE entre vazões observadas e calculadas.

A Figura 4 permite a análise de como cada região se comporta em termos de umidade do solo e vazões propagadas. Por exemplo, se uma dada estação apresenta um baixo KGE para vazão, mas um bom para umidade do solo, é possível que seja necessário focar esforços na melhoria da representação da hidráulica do sistema. Isto pode ocorrer, entre outros casos, na presença de planícies de inundação ou grandes reservatórios, onde um modelo de onda cinemática não é suficiente para apropriadamente representar a propagação de vazões. Por outro lado, altos valores de KGE para vazões e baixos para umidade do solo podem indicar que o balanço hídrico não está sendo bem representado pelo modelo – no caso de modelos tipo “balde” como o MGB-IPH, a implementação de múltiplas camadas de solo talvez permitisse minimizar este tipo de erro.

Neste contexto, o KGE de umidade do solo das estações no Rio Grande e no rio Tietê (7 a 13, 17, 20 e 21) está abaixo de 0,5. Estas são as estações na região onde provavelmente as observações do SMOS são problemáticas. Além disso, quanto maior a área de drenagem (e mais distante da região metropolitana de São Paulo, maior o KGE de umidade do solo. Isto suporta a hipótese de que as observações do SMOS tenham baixa qualidade nesta área e estejam sofrendo com Interferência de Rádio Frequência.

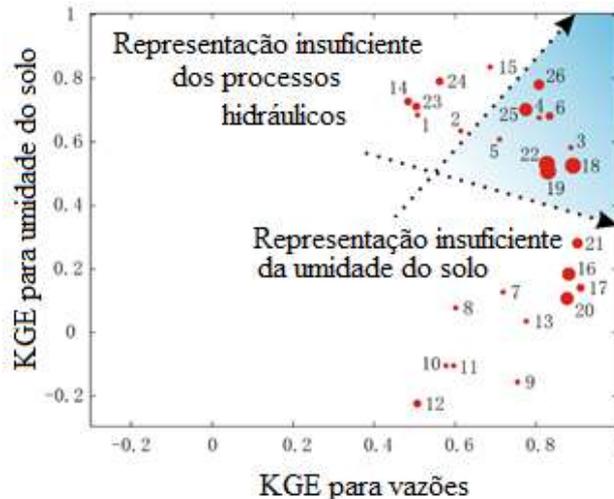


Figura 4. Comparação de valores de KGE entre observação e simulação de grau de saturação do solo (eixo y) e vazão (eixo x) para os 26 postos fluviométricos utilizados na validação do modelo. As setas separam estações com comportamentos distintos em termos de representação de hidráulica e umidade do solo.

Para as estações 14, 15 e 23 (a jusante da estação 14), observam-se altos valores de KGE de umidade do solo, mas valores mais baixos para vazões. Nestas estações, identifica-se uma boa representação hidrológica dos processos, porém associada a limitações do método de Muskingun-Cunge (MC) empregado no MGB-IPH para propagação de vazões. A montante das estações 14 e 15 há extensas planícies de inundação, cujas particularidades hidráulicas não são apropriadamente levadas em conta pelo método de MC. Para as estações 1 e 2 também foram encontrados bons valores de KGE de umidade do solo e baixos de vazão. Nesta área, as séries de vazões simuladas não apresentam boa concordância com aquelas observadas devido a presença de reservatórios a montante.

Valores intermediários de KGE foram encontrados para a estação 5 no rio Verde, o que pode estar relacionado à baixa densidade de estações pluviométricas na margem direita do rio Paraná. Isto pode conduzir a séries de precipitação errôneas na área, o que se reflete na baixa concordância entre os hidrogramas observado e calculado e na incapacidade do grau de saturação calculado pelo MGB-IPH de representar a maior parte dos picos de SWI do SMOS.

Entre as 26 estações fluviométricas, quatro tipos básicos de comportamento foram identificados para as relações entre grau de saturação do MGB-IPH e SWI do SMOS e hidrogramas observados e calculados. A Figura 5 mostra os resultados para quatro estações representativas destes padrões, classificando as estações entre dominadas por sazonalidade (ou não sazonalidade) climática, má representação da propagação nos rios e erros no SMOS, provavelmente devido ao efeito de RFI.

A primeira coluna da Figura 5 mostra um exemplo representativo do comportamento entre GS-MGB e SWI-SMOS em uma região marcadamente sazonal. Apesar de apresentar uma boa concordância entre vazões observadas e simuladas, a estação mostra diferenças na umidade do solo. Pode-se observar que SWI-SMOS aumenta mais rapidamente que o GS-MGB quando a estação úmida inicia. Quando a estação seca chega, a umidade do solo observada pelo SMOS permanece em níveis mais altos durante um período mais longo. Como mencionado, o MGB-IPH considera apenas uma camada de solo. Quando a umidade do solo começa a aumentar (por volta de setembro), esta camada de solo leva mais tempo para umedecer do que é provável que realmente esteja acontecendo na área, o que também é indicado pelo SWI-SMOS. Esta dificuldade em representar as primeiras cheias no início da estação úmida é devida à um reservatório do subsuperficial ainda seco, representando uma única camada de solo. Este reservatório acaba não representando a frente de molhamento que de fato ocorre no solo. No

período de recessão, a camada de solo do MGB-IPH tem uma menor capacidade de reter água, uma vez que toda a água armazenada no solo está disponível para evapotranspiração. Plotando o SWI-SMOS contra o GS-MGB, nota-se que os valores de SWI do SMOS são quase sempre superiores ao grau de saturação simulado pelo MGB-IPH.

A segunda coluna da Figura 5 ilustra o comportamento da umidade do solo e da vazão em uma região onde nenhum problema específico ocorre. Observa-se boa concordância entre vazões observadas e calculadas, assim como para SWI-SMOS e GS-MGB. A terceira coluna mostra um caso onde infere-se que os processos hidrológicos estejam bem representados pelo MGB-IPH, ao contrário da hidráulica fluvial.

Por fim, a quarta coluna da Figura 5 traz um exemplo de uma região onde as observações do SMOS estão mais suscetíveis a erros, provavelmente sofrendo de RFI. Apesar da relativamente boa concordância entre vazões simuladas e observadas, os valores de umidade do solo estimados através do modelo hidrológico e do SMOS são altamente discordantes. Corroborando a hipótese de que as observações do SMOS sejam deficientes nesta área, observa-se que o SWI-SMOS não consegue refletir a sazonalidade existente na região.

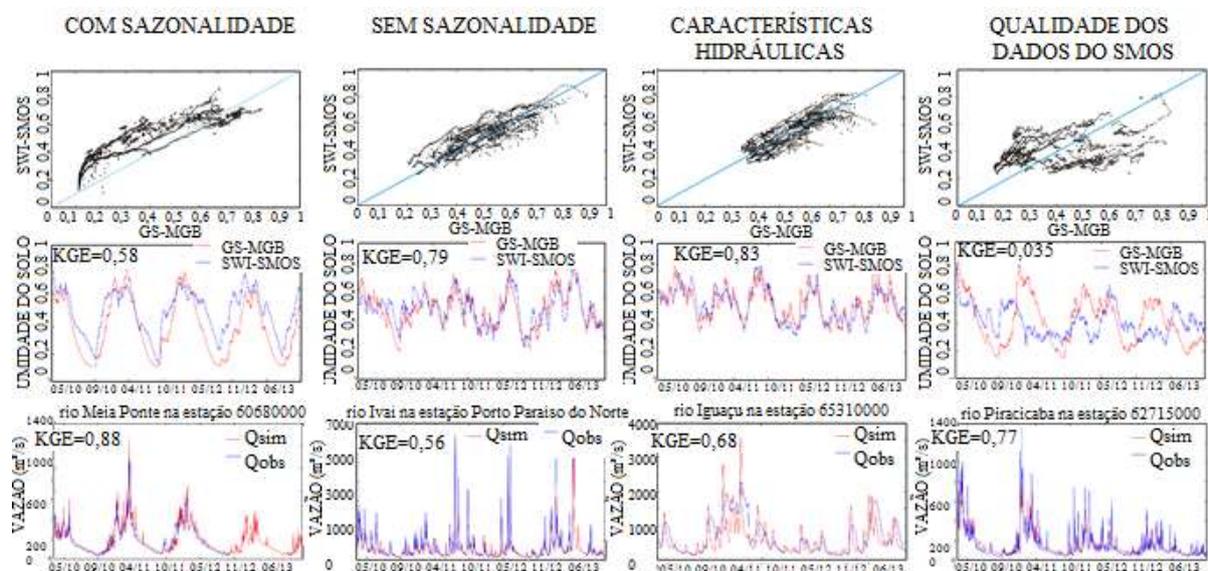


Figura 5. Exemplos de comportamentos de SMOS SWI e grau de saturação do MGB-IPH, e vazões observadas e simuladas pelo MGB-IPH.

#### 4. Conclusões

A validação do MGB-IPH com a umidade do solo estimada através do SMOS possibilita uma avaliação das qualidades e limitações do modelo hidrológico, permitindo ponderar onde e em quais situações são melhor ou pior representados os processos hidrológicos e hidráulicos. Modelos hidrológicos, tais como o MGB-IPH, são em geral calibrados apenas com dados de vazão. A análise dos resultados simulados para outras variáveis, comparando-os com dados de outras fontes, como a umidade do solo aqui comparada com o SWI do SMOS, permite que se evite a utilização de parâmetros extremos e fora da realidade na calibração do modelo. Isto pode ocorrer em situações em que os dados de vazão simulada não se ajustam facilmente às vazões observadas em decorrência de limitações do modelo, quando o modelador tende, muitas vezes sem a devida consciência, a compensar estas limitações com a utilização de parâmetros forçados. A utilização de uma metodologia de validação, como a aqui realizada, possibilita que se analise a coerência dos resultados, avaliando as limitações do modelo e aceitando, quando julgado razoável, desempenhos piores em termos de uma ou outra variável simulada.

Ressalta-se, contudo, que os resultados aqui analisados estão atrelados à qualidade das

observações do SMOS, à disponibilidade de dados de precipitação e vazão observados, à metodologia do SWI, à parametrização adotada nos modelos e a limitações do próprio modelo hidrológico.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas de pesquisa concedidas.

## 6. Referências bibliográficas

Albergel, et al (2008) From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations. *Hydrology Earth System Sciences*, Vol.12 p.1327-1337.

Al-Yaari, A.; Wigneron, J.-P.; Ducharne, A.; Kerr, Y.H.; Wagner, W.; Lannoy, G., Reichle, R.; Al Bitar, A. Dorigo, W.; Richaume, P.; Mialon, A. (2014) Global-scale comparison of passive SMOS and active ASCAT satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations MERRA-Land. *Remote Sensing of Environment*, Vol 152, p.614-626.

Brocca, L.; Melone, F.; Moramarco, T.; Wagner, W.; Naeimi, V.; Bartalis, Z.; Hasenauer, S. (2010) Improving runoff prediction through the assimilation of the ASCAT soil moisture product. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14, p. 1881-1893.

Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., and Albergel, C. (2013) Scaling and filtering approaches for the use of satellite soil moisture observations “Remote Sensing of Land Surface Turbulent Fluxes and Soil Surface moisture Content: State of the Art”, Chapter 17, Taylor & Francis Group, London, UK, p. 415– 430.

Collischonn, W.; Allasia, D. G.; Silva, B. C.; Tucci, C. E. M.. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895, 2007.

Fan, F.M.; Buarque, D.C.; Pontes, P.R.M.; Collischonn, W. 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. Disponível em: [http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-351\\_um-mapa-de-unidades-de-resposta-hidrologia-para-a-america-do-sul](http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-351_um-mapa-de-unidades-de-resposta-hidrologia-para-a-america-do-sul). Acesso em: 18/10/2016.

Gupta, H.V.; Kling, H.; Yilmaz, K.K.; Martinez, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 377, Issues 1-2, p. 80-91, 2009.

Jacquette E.; Al Bitar A.; Mialon A.; Kerr Y.H.; Quesney A.; Cabot F.; Richaume P. (2010). SMOS CATDS level 3 global products over land “. *Proc. SPIE 7824*, 78240K, 2010, doi:10.1117/12.865093.

Kerr, Y. H., and Coauthors, 2010: The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proc. IEEE*, 98, 666–687.

Kerr, Y. H., Waldteufel, P. R., Wigneron, J. P., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., Al Bitar, A., Cabot, F., Gruhier, C., Juglea, S. E., Leroux, D., Mialon, A., Delwart, S. (2012) The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 50, No. 5, pp 1384-1403.

Silvestro et al (2015) Uncertainty reduction and parameter estimation of a distributed hydrological model with ground and remote-sensing data. *HESS*, Vol. 19, p. 1727-1751.

Siqueira, V. A.; Fleischmann, A. S.; Jardim, P. F.; Fan, F. M.; Collischonn, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in open-source environment. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, p. 274-287, 2016.

Wagner, W., Lemoine, G., Rott, H.: A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data, *Remote Sens. Environ.*, 70, 191–207, 1999.

Walsh, P.D., Lawler, D.M. 1981. Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time. *Weather* 36: 201–208.