

## MUDANÇAS NOS NÍVEIS DA ÁGUA NA LAGOA MIRIM USANDO DADOS ALTIMÉTRICOS DOS SATÉLITES ENVISAT E ICESAT

*Andrés Mauricio Munar<sup>1\*</sup>; J.Rafael Cavalcanti<sup>1</sup>; Gláucia dos Santos Nascimento<sup>1</sup>; David da Motta Marques<sup>1</sup>; Juan Martin Bravo<sup>1</sup> & C.Ruberto Frago Jr<sup>2</sup>*

**Resumo** – A variação do nível da água em lagos e reservatórios é um importante indicador do clima global podendo ser usado indiretamente na estimativa do balanço hídrico. A estimativa das variações nos níveis da água também é essencial no gerenciamento dos recursos hídricos. Em corpos hídricos pouco monitorados, a altimetria por satélite pode ser uma ferramenta indispensável para estimar mudanças nos níveis da água e tendências no armazenamento. Essas ferramentas provêm informações com ampla cobertura espacial e temporal podendo indicar mudanças nos volumes da água. Neste estudo foram validados os níveis da água derivados dos satélites ICESat/Envisat na Lagoa Mirim a partir dos níveis da água simulados através de um modelo hidrodinâmico previamente validado (IPH-ECO). Os resultados demonstram que os níveis d'água derivados do ICESat se ajustam bem com os níveis da água simulados no IPH-ECO ( $R^2 \geq 0.66$ ;  $RMSE \leq 29$  cm). Embora os níveis da água obtidos a partir do Envisat apresentaram baixa acurácia ( $R^2 \geq 0.005$ ;  $RMSE \leq 92$ cm), a tendência e o comportamento sazonal foi bem representada. Esta abordagem pode ser usada para o monitoramento nos níveis da água em lagos e reservatórios, na calibração/validação de modelos hidrodinâmicos ou como fonte alternativa de dados altimétricos.

**Palavras-Chave** – Variação do nível da água, ICESat/Envisat, Lagoa Mirim

## CHANGES ON WATER LEVELS OF THE LAKE MIRIM FROM ENVISAT/ICESAT SATELLITE ALTYMETRY DATA

**Abstract** – Water level variations in lakes and reservoirs are an important indicator of global climate and can be used indirectly to the water balance estimation. Monitoring variations in water levels is also essential in managing water resources. In ungauged areas or water bodies poorly monitored, satellite altimetry can be an indispensable tool to estimate changes in water levels and trends in water storage. These tools provide invaluable information with wide spatial and temporal coverage and may indicate changes in water volumes. In this study, the water levels derived from the ICESat / Envisat satellites in Lake Mirim were validated base on simulated water levels from a previously validated hydrodynamic model (IPH-ECO). The results demonstrate that the water levels derived from ICESat agreement well with the water levels simulated from the IPH-ECO model ( $R^2 \geq 0.66$ ;  $RMSE \leq 29$  cm). However, the water levels obtained from Envisat showed low accuracy ( $R^2 \geq 0.005$ ;  $RMSE \leq 92$ cm), the trend and seasonal behavior in the water levels was well

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil ([andresmm4@hotmail.com](mailto:andresmm4@hotmail.com), [rafaelcavalcanti@gmail.com](mailto:rafaelcavalcanti@gmail.com), [gal.sn@hotmail.com](mailto:gal.sn@hotmail.com), [jumarbra@iph.ufrgs.br](mailto:jumarbra@iph.ufrgs.br), [dmm@iph.ufrgs.br](mailto:dmm@iph.ufrgs.br)).

<sup>2</sup> Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil ([carlosruberto@gmail.com](mailto:carlosruberto@gmail.com)).

\* Autor Correspondente.

represented. This approach can be used to monitor water levels in lakes and reservoirs, the calibration / validation of hydrodynamic models or as an alternative source of altimetric data.

**Keywords** – Water level variation, ICESat/ENVISat, Lake Mirim

## INTRODUÇÃO

Ecossistemas como lagos e reservatórios vêm sendo afetados devido à mudança climática e atividades antropogênicas, alterando os processos hidrológicos nas bacias de contribuição e provocando mudanças significativas nos níveis de água e nos componentes hidrodinâmicos (Jones *et al.*, 2001; Legesse *et al.*, 2004). Estas variações nos níveis da água podem ser consideradas um parâmetro chave em estudos hidrológicos por exercer influência direta nos processos do ecossistema, comunidades bióticas e qualidade da água (Coops *et al.*, 2003). Adicionalmente, as flutuações nos níveis da água, além de ser um parâmetro importante para o entendimento do balanço hídrico, representam um forte indicador de mudança climática. Portanto, para um melhor entendimento, manutenção e gerenciamento desses ecossistemas, torna-se importante seu monitoramento.

O monitoramento das variáveis hidrológicas em lagos e reservatórios na maioria dos casos se realiza de maneira convencional, através de observações obtidas por redes hidrométricas (*in situ*), o que poderia ser inadequado, tendo em vista a interferência de possíveis erros humanos de medição ou séries de dados incompletas. Ao mesmo tempo, o monitoramento usando abordagens convencionais tende a ser limitado em termos de cobertura espacial e frequência temporal (*e.g.*, amostragens pontuais em intervalos mensais ou trimestrais).

Nos últimos anos, dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados de maneira alternativa para obtenção de dados em regiões onde medidas *in situ* são escassas ou difíceis de obter (Alsdorf *et al.*, 2007; Calmant *et al.*, 2008). Além, os dados provenientes de sensores remotos, podem ser uma ferramenta de qualidade para calibração/validação de modelos (Schneider *et al.*, 2017), provendo uma importante fonte complementar de dados em escalas locais e globais.

Recentemente, diversos estudos têm utilizado dados de sensoriamento remoto baseados em altimetria por satélite para validar modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, como a missão Envisat (Birkinshaw *et al.*, 2014; Paiva *et al.*, 2013) e o satélite ICESat (Hall *et al.*, 2011; Jarihani *et al.*, 2015; O'Loughlin *et al.*, 2016). Estes satélites fornecem informações valiosas para calibrar e validar modelos hidrológicos/hidrodinâmicos e como fonte de dados complementares para regiões pouco monitoradas, ou regiões com dados de acesso limitado.

Neste trabalho foram validados os níveis da água estimados através dos satélites ICESat/Envisat na Lagoa Mirim, localizada entre Brasil e Uruguai, a partir dos níveis da água simulados por um modelo hidrodinâmico previamente validado (IPH-ECO). Esta abordagem permitiu avaliar a capacidade dos satélites ICESat/Envisat para o monitoramento desse grande corpo hídrico, assim como estudar possíveis mudanças nos níveis da água da lagoa.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de Estudo

A bacia da Lagoa Mirim está localizada entre latitudes de 31°00' e 35°00'S e longitudes 052°15' e 055°15'W (Figura 1- . Lagoa Mirim. RS- Brasil, hidrografia, batimetria da lagoa e limites internacionais). Apresenta uma área superficial aproximada de 58.400Km<sup>2</sup>, dos quais 32.704 Km<sup>2</sup> (56%) em território uruguaio e 25.696 Km<sup>2</sup> (53%) em território brasileiro. A Lagoa Mirim, como corpo de água principal da bacia hidrográfica está localizada entre latitudes de 32°00' e 33°00'S e longitudes

052°00' e 054°00'W, conta com uma área superficial aproximada de 4000 Km<sup>2</sup>, sendo o segundo maior corpo hídrico com características lacustres do Brasil. O eixo maior da lagoa tem aproximadamente 190 Km e a largura média oscila em 40 Km. A profundidade varia de 0.2 a 9 metros com uma média aproximada de 4.5 metros. A lagoa está ligada à Lagoa dos Patos através do Canal de São Gonçalo, o qual, por sua vez, apresenta uma extensão de 76 km. Por sua importância política (bacia binacional) e econômica, a Lagoa Mirim localizasse em uma região complexa e estratégica para Brasil e Uruguai. O principal uso das águas consiste em extrações diretas para a irrigação das lavouras de arroz, tanto em território brasileiro como em território uruguaio, além como fonte de abastecimento para os municípios de Rio Grande e Pelotas.

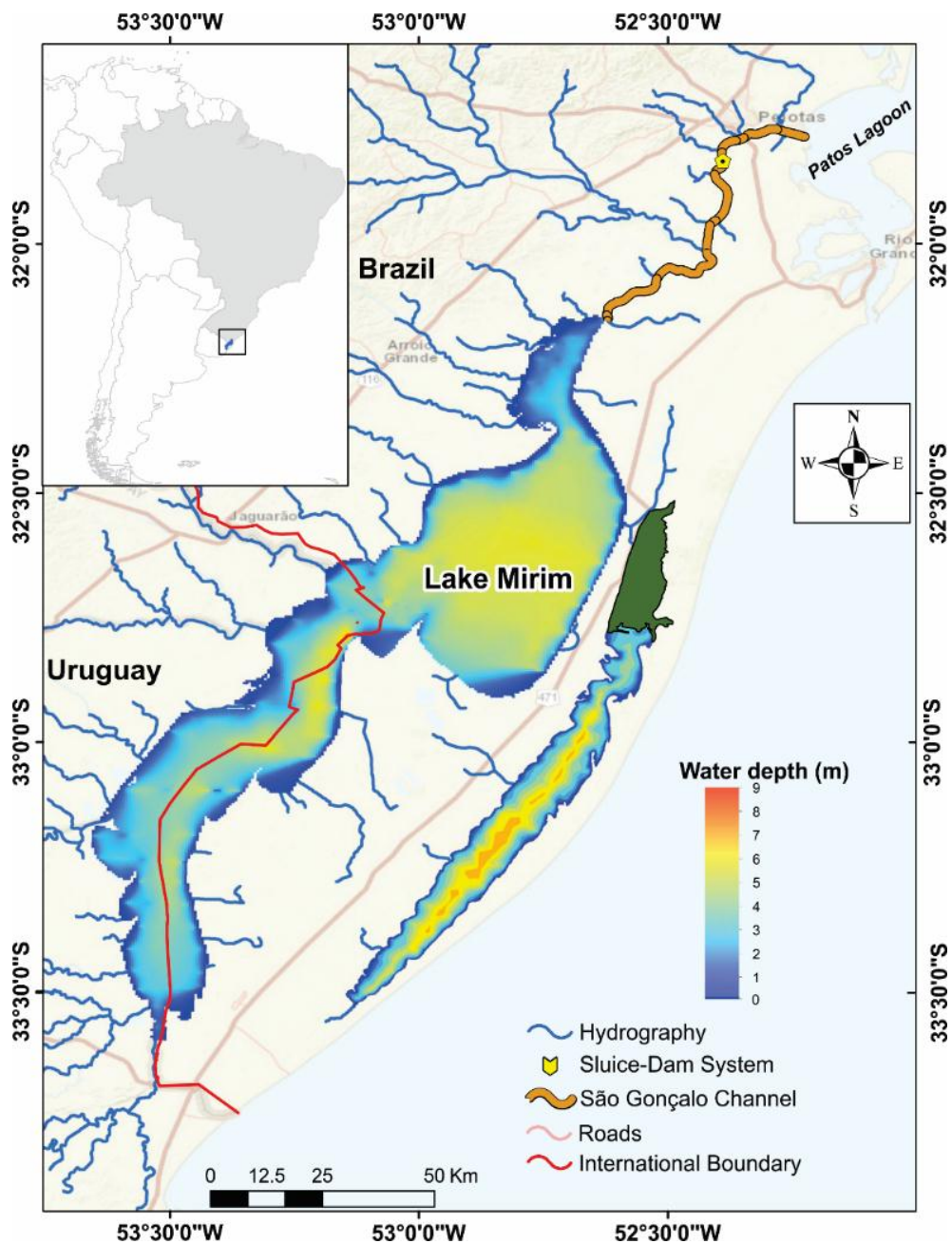


Figura 1 - . Lagoa Mirim. RS- Brasil, hidrografia, batimetria da lagoa e limites internacionais.

## Descrição do Modelo IPH-ECO

O modelo IPH-ECO (Fragoso *et al.*, 2009) disponível em <http://ipheco.org/> descreve os principais processos físicos (temperatura e níveis da água, campos de velocidade), químicos e biológicos em ecossistemas aquáticos. O modelo também descreve os componentes hidrodinâmicos, bióticos e abióticos mais importantes do meio ambiente aquático, podendo ser utilizado para avaliações isoladas de processos físicos, químicos ou biológicos, ou em avaliações onde estes processos interagem simultaneamente entre si. O IPH-ECO possui um módulo hidrodinâmico acoplado com módulos de qualidade da água e biológico. O módulo hidrodinâmico descreve quantitativamente os fluxos e níveis d'água e os módulos de qualidade da água e biológico, tratam dos mecanismos de transporte de nutrientes e todas interações de organismos aquáticos da cadeia alimentar. O modelo IPH-ECO é baseado no TRIM (Casulli & Cheng, 1992) e resolve as equações de Navier - Stokes através de um esquema semi-implícito discretizado em grades estruturadas que utiliza uma abordagem Euleriana- Lagrangeana para a resolução das equações de momento e continuidade (Cheng *et al.*, 1993).

Para a aplicação do modelo IPH-ECO, a Lagoa Mirim foi discretizada usando uma grade regular de 500x500 metros de resolução espacial. A parametrização e calibração do modelo, os dados hidro - meteorológicos usados, a simulação hidrológica das bacias de contribuição à lagoa e os níveis da água simulados, foram apresentadas em detalhe em um recente artigo (Munar *et al.*, 2017, em revisão). Neste trabalho foram utilizados os níveis da água simulados no modelo IPH-ECO em seis regiões da Lagoa Mirim (Figura 2. Validação do nível da água derivado dos satélites ICESat/Envisat em seis estações virtuais (A,B,C,D,E,F) na Lagoa Mirim).

## Dados ICESat/Envisat

Os dados dos satélites ICESat/Envisat foram utilizados para derivar os níveis da água da Lagoa Mirim a partir da passagem dos satélites em seis estações virtuais ao longo da lagoa (Figura 2. Validação do nível da água simulado em seis estações virtuais (A,B,C,D,E,F) derivadas a partir de dados altimétricos do satélite). Foram utilizados dados do ICESat disponíveis no período 2003-2009 através da interface <http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/reverb.echo.nasa.gov>. O processamento e análise dos dados foi realizado usando uma rotina no MatLab®. Os dados do Envisat no período 2002-2010 foram descarregados a partir da plataforma <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/products>. Foi usado o software *Multi-mission Altimetry Processing Software MAPS* (Frappart *et al.*, 2015) para o processamento e análise dos dados Envisat. Posteriormente, um análise estatístico para os dados ICESat/Envisat foi realizado usando a mediana dos níveis da água derivados dos satélites e comparado com a mediana dos níveis da água simulados no modelo IPH-ECO.

Como métricas de avaliação ou medidas de desempenho foram consideradas: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o Viés (Bias), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da validação do níveis da água derivados do satélites ICESat/Envisat em seis estações virtuais da Lagoa Mirim apresentaram um bom ajuste. (Figura 2. Validação do nível da água derivado dos satélites ICESat/Envisat em seis estações virtuais (A,B,C,D,E,F) na Lagoa Mirim).

Um melhor ajuste para o ICESat foi verificado (estações virtuais B,C,E,F). Dados do Envisat apresentaram menor ajuste que os dados do ICESat (estações virtuais A,D), embora foi bem representada a tendência geral e o comportamento sazonal nas variações dos níveis de água.

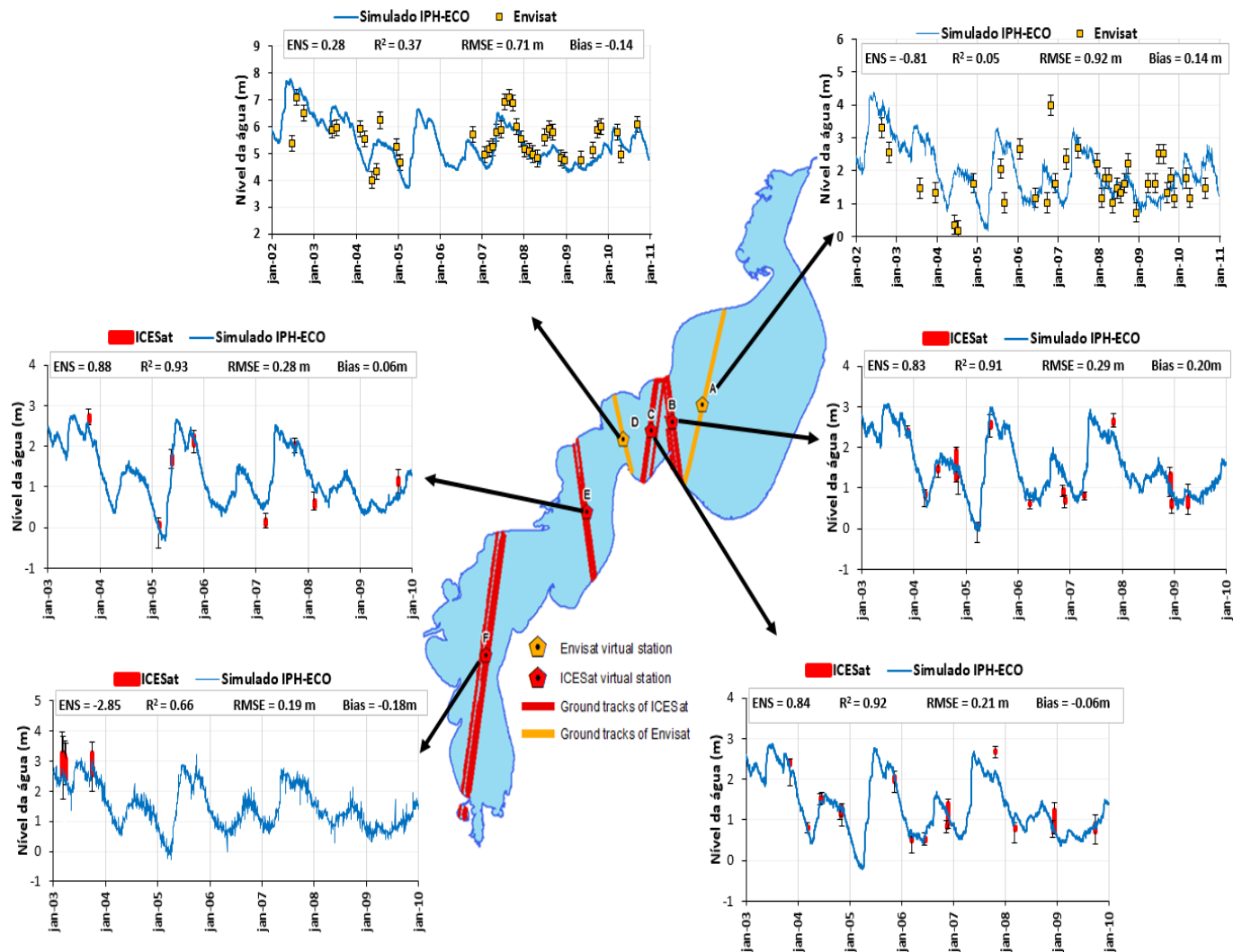


Figura 2 - Validação do nível da água derivado dos satélites ICESat/Envisat em seis estações virtuais (A,B,C,D,E,F) na Lagoa Mirim. A linha azul em cada gráfico representa o nível da água simulado no IPH-ECO. Os box plots vermelho e amarelo indicam os níveis da água derivados a partir dos satélites ICESat/Envisat. As linhas vermelha (ICESat) e amarela (Envisat) indicam a passagem do satélite sobre a Lagoa.

Os resultados da validação do nível da água derivado dos satélites ICESat/Envisat indicaram que o Satélite ICESat se ajustou melhor ( $R^2 \geq 0.66$ ;  $RMSE \leq 29$  cm) com os níveis simulados no modelo IPH-ECO. Embora a série temporal de níveis da água obtidos a partir do Envisat contenha mais dados altimétricos (período de operação 2002-2012), o ajuste foi menor ( $R^2 \geq 0.005$ ;  $RMSE \leq 92$  cm). A acurácia dos resultados foi consistente com acurácias encontradas em outros estudos (Brenner *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2011; Hall *et al.*, 2012), os quais mostraram que os níveis da água derivados a partir do ICESat têm maior precisão e acurácia vertical em comparação com os dados do Envisat, apesar de seu grande ciclo de repetição (91) dias, e os erros de saturação e retro espalhamento (O'Loughlin *et al.*, 2016, Urban *et al.*, 2008).

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que os dados de altimetria espacial derivados a partir dos satélites ICESat/Envisat têm capacidade para o monitoramento dos níveis da água na Lagoa Mirim, e permitem verificar o comportamento sazonal nos níveis da água no período analisado. Além disso, os dados podem ser usados na calibração/validação de modelos hidrodinâmicos ou como fonte alternativa de dados altimétricos.

O satélite ICESat apresenta maior acurácia que o satélite Envisat em cada uma das estações virtuais avaliadas, quando comparada com os níveis simulados no modelo IPH-ECO. Embora o satélite Envisat mostre baixa acurácia, os resultados permitem acompanhar a tendência geral e o comportamento sazonal nos níveis da água na lagoa.

Futuros estudos poderiam ser encaminhados usando as novas missões ICESat-2 e CryoSat-2 para melhorar a acurácia na estimativa dos níveis da água na Lagoa Mirim.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as bolsas de pós - graduação CNPq e CAPES. O trabalho faz parte do projeto de pesquisa *Impacto das mudanças climáticas em ambientes fluviais e lacustres do Rio Grande do Sul*, financiado pelo CNPq.

## REFERÊNCIAS

- ALSDORF, D.E., RODRÍGUEZ, E., LETTENMAIER, D. P. (2007). Measuring surface water from space, *Reviews of Geophysics*. 45, RG2002. <http://dx.doi.org/10.1029/2006RG000197>.
- BIRKINSHAW, S.J., MOORE, P., KILSBY, C.G., O'DONNELL, G.M., HARDY, A.J., BERRY, P.A.M. (2014). Daily discharge estimation at ungauged river sites using remote sensing. *Hydrol. Process*. 28, 1043–1054. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9647>
- BRENNER, A.C., DIMARZIO, J.P., ZWALLY, H.J., (2007). Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 45, 321–331. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2006.887172>
- CALMANT, S., F. SEYLER, AND J. F. CRETAX. (2008). Monitoring continental surface waters by satellite altimetry, *Surv. Geophys.*, 29(4-5), 247–269. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-008-9051-1>
- CASULLI, V., CHENG, R.T. (1992). Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *Int. J. Numer. Meth. Fl.* 15, 629–648. <http://dx.doi.org/10.1002/fld.1650150602>
- CHENG, R.T., CASULLI, V., GARTNER, J.W. (1993). Tidal, residual, intertidal mudflat (TRIM) model and its applications to San Francisco Bay, California. *Est. Coast. Shelf Sci.* 36, 235–280. <http://dx.doi.org/10.1006/ecss.1993.1016>
- COOPS, H., BEKLIOGLU, M., & CRISMAN, T. L. (2003). The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems—workshop conclusions. *Hydrobiologia*, 506(1-3), 23-27.
- FRAGOSO, C.R., VAN NES, E.H., JANSE, J.H., DA MOTTA MARQUES, D. (2009). IPH-TRIM3D-PCLake: A three-dimensional complex dynamic model for subtropical aquatic ecosystems. *Environ. Modell. Softw.* 24, 1347–1348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.05.006>

- FRAPPART, F., PAPA, F., MARIEU, V., MALBETEAU, Y., JORDY, F., CALMANT, S., DURAND, F., BALA, S. (2015). Preliminary assessment of SARAL/AltiKa observations over the Ganges-Brahmaputra and Irrawaddy Rivers. *Mar. Geod.* 38(sup1), 568–580. <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2014.990591>
- JONES, R., MCMAHON, T., BOWLER, J. (2001). Modelling historical lake levels and recent climate change at three closed lakes, Western Victoria, Australia (c. 1840–1990). *J. Hydrol.* 246, 159–180. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00369-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00369-9)
- HALL, A.C., SCHUMANN, G.J.P., BAMBER, J.L., BATES, P.D. (2011). Tracking water level changes of the Amazon Basin with space-borne remote sensing and integration with large scale hydrodynamic modelling: A review. *Phys. Chem. Earth Pts A/B/C* 36, 223–231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.010>
- HALL, A.C., SCHUMANN, G.J.-P., BAMBER, J.L., BATES, P.D., TRIGG, M.A. (2012). Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry. *Water Resour. Res.* 48, W06602, 6 pp. <http://dx.doi.org/10.1029/2011WR010895>
- JARIHANI, A.A., CALLOW, J.N., MCVICAR, T.R., VAN NIEL, T.G., LARSEN, J.R., (2015). Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments. *J. Hydrol.* 524, 489–506. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.049>
- LEGESSE, D., VALLET-COULOMB, C., GASSE, F., (2004). Analysis of the hydrological response of a tropical terminal lake, Lake Abiyata (Main Ethiopian Rift Valley) to changes in climate and human activities. *Hydrol. Process.* 18, 487–504. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.1334>
- MUNAR, A.M.; CAVALCANTI, JR.; MAINARDI FAN, F.; MOTTA- MARQUES, D.M.L.; FRAGOSO JR, C.R. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of shallow lake-watershed processes. *J. Hydrol.* (under review).
- O’LOUGHLIN, F.E., NEAL, J., YAMAZAKI, D., BATES, P.D. (2016). ICESat-derived inland water surface spot heights. *Water Resour. Res.* 52, 3276–3284. <http://dx.doi.org/10.1002/2015WR018237>
- PAIVA, R.C.D., COLLISCHONN, W., BONNET, M.P., DE GONCALVES, L.G.G., CALMANT, S., GETIRANA, A., DA SILVA, J.S. (2013). Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 2929–2946. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>
- SCHNEIDER, R., GODIKSEN, P.N., VILLADSEN, H., MADSEN, H., BAUER-GOTTWEIN, P., (2017). Application of CryoSat-2 altimetry data for river analysis and modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 751–764. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-751-2017>
- URBAN, T. J., B. E. SCHUTZ, AND A. L. NEUENSCHWANDER. (2008). A survey of ICESat coastal altimetry applications: Continental coast, open ocean island, and inland river. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 19(1&2), 1–19
- ZHANG, G., XIE, H., KANG, S., YI, D., ACKLEY, S.F. (2011). Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using icesat altimetry data (2003–2009). *Remote Sens. Environ.* 115, 1733–1742. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.005>