

## **AVALIAÇÃO DAS ESTIMACÕES DE CHUVA A PARTIR DOS SATÉLITES NA BACIA DO ALTIPLANO**

Frédéric Satgé<sup>1</sup>, Marie-Paule Bonnet<sup>2</sup>, Franck Timouk<sup>2,3</sup>, Jérémie Garnier<sup>1</sup>, Marielle Gosset<sup>2</sup>, Ramiro Pillco<sup>3</sup> Jorge Molina<sup>3</sup>, Wilson Hernan Yuque Lima<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Brasília – UnB/IG

Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília - Brasil  
[frederic.satge@gmail.com](mailto:frederic.satge@gmail.com) ; [garnier@unb.br](mailto:garnier@unb.br)

<sup>2</sup> Institut de Recherche pour le Developpement – IRD/GET

14 avenue Edouard Belin, 31400, Toulouse, France

[marie-paule.bonnet@ird.fr](mailto:marie-paule.bonnet@ird.fr) ; [franck.timouk@ird.fr](mailto:franck.timouk@ird.fr) ; [marielle.gosset@ird.fr](mailto:marielle.gosset@ird.fr)

<sup>3</sup> Universidad Mayor San Andres – UMSA/IHH

Calle 30 Cota Cota – La Paz, Bolivia

[amolina@umsa.bo](mailto:amolina@umsa.bo) ; [rami\\_lund99@hotmail.com](mailto:rami_lund99@hotmail.com) ; [will\\_lliw919@yahoo.es](mailto:will_lliw919@yahoo.es)

### **Resumo:**

Six products of satellite rainfall estimation were evaluated by comparison with rainfall gauges data acquired between 2005 and 2007 in the Andean Altiplano watershed. Comparisons were done on annual, monthly, 15 days and daily time scales. The results differ from one product to another and in function of the considered time scale. The evaluation of real time and adjusted products TMPA and PERSIANN shows the improvement gained thanks the calibration procedures. None of the evaluated products was able to give a good rainfall estimation in the Tititcaca Lake region, probably because of the emissivity difference of the region. The latest version of the TMPA product was the only product, which could be used without any corrections to estimate monthly rainfall. The PERSIANN products were found more suitable to estimate daily rainfall because of their higher capacity to detect rainy and dry day.

## INTRODUÇÃO

---

Informações de chuva são cruciais para a compreensão das mudanças climáticas e fundamentais para diversas aplicações sociais como a gestão da água para atividades agrícolas (Garcia *et al.*, 2004 ; Geerts *et al.*, 2006) e indispensável na hidrologia para entender e planejar cenários de inundação ou seca numa determinada bacia. No entanto, em área isolada como o Altiplano, informações de chuva são pobres e desiguais. Os pluviômetros estão localizados principalmente no entorno de grandes e pequenas cidades por causa do acesso mais fácil para a manutenção. Quando algumas regiões disponibilizam informações como a região do lago Titicaca na parte Norte-Leste da bacia, outras áreas isoladas como na parte Oeste e Sul da bacia contam com poucas informações (Figura 1). No mais, a gestão do recurso água de bacia internacional pode ser origem de conflitos e resultar na ausência de troca de informações entre os países. Com uma alta cobertura espacial (quase mundial) e temporal (uma medição a cada 3 horas) (Tabela 1) como também uma rápida disponibilidade via Internet e um formato único em cada parte, às estimativas de chuva a partir dos satélites (SRE= *Satellite Rainfall Estimation*) representam uma ferramenta alternativa muito interessante. Portanto, os SREs são estimativas indiretas com inconsistências que devem ser avaliadas e eventualmente corrigidas.

As potencialidades de cada SREs variam de uma região para outra. Em comparação com CMORPH, os produtos TMPA foram, mais precisos na Bacia Amazônica (Buarque *et al.*, 2011), avaliados mais adequados pela modelagem hidrológica na bacia do rio Zambezi (Cohen Liechti *et al.*, 2012). Em comparação com CMORPH e PERSIANN-RT, os produtos TMPA, mostraram melhor potencialidade para descrever as características hidrológicas de quatro bacias na África (Thiemig *et al.*, 2012), foram mais precisos nas estimativas das estações de chuva na Índia (Prakash *et al.*, 2014). CMORPH foi mais preciso do que TRMM na África do Leste (Dinku *et al.*, 2007) e em regiões de montanha da África e da América do Sul (Dinku *et al.*, 2010). Outros estudos mostraram que cada SER tem suas vantagens e deficiências. Por exemplo, na bacia do rio Mississipi Gebregiorgis e Hossain (2013) mostraram qualidades variáveis na escala temporal e espacial entre TMPA-RT, CMORPH e PERSIANN-RT. Os autores sugerem um uso conjunto dos três SREs tomando por base as observações previamente realizadas. Asadullah *et al.* (2008) chegaram as mesmas conclusões para Uganda.

A parte do produto CMORPH avaliado por Buarque *et al.* (2011) na bacia Amazônica e por Dinku *et al.* (2010) nos Andes Colombiano, só os produtos TMPA foram avaliados e/ou usados na América do Sul. O continente Sul-Americano inclui uma das maiores cadeias de montanhas do mundo, os Andes. Dinku *et al.* (2007 e 2010) mostraram que em tais regiões o produto CMORPH pode apresentar melhor resultado do que TMPA. Nesse contexto, parece primordial avaliar CMORPH nos Andes. Portanto, até agora e nessa região só os produtos TMPA foram avaliados. Condom *et al.* (2010) avaliaram TMPA-3B43 (estimativas mensais) e sugeriram uma correção para o espaço temporal mensal. Scheel *et al.* (2011) avaliaram TMPA-GA v6 na parte central dos Andes seguido por Heidinger *et al.* (2012) no planalto Andino. O ultimo estudo foi de Zulkafli *et al.* (2014) que analisaram a melhoria da versão 7 sobre a versão 6 do TMPA-GA na parte Andes-Amazonas, no Norte do Peru. Os produtos PERSIANN também nunca foram analisados na América do Sul, portanto a versão PERSIANN-RT foi mais precisa do que CMORPH e TMPA-RT (Romilly e Gebremichael, 2010). Ademais, a versão calibrada PERSIANN-GA foi avaliada no Irã por Katiraie-Boroujerdy *et al.* (2013), num contexto árido similares ao da área de estudo mostrando

uma melhoria certa sobre a versão RT. Assim, parece primordial avaliar esses produtos na América do Sul e na bacia do Altiplano para verificar os resultados encontrados no Irã e na Etiópia.

## AREA DE ESTUDO

O Altiplano é um sistema hidrológico endorreica, localizado entre as latitudes 14° e 20° sul, com uma superfície total de aproximadamente 192.000 km<sup>2</sup> dividido entre o Peru (27%), a Bolívia (69%) e o Chile (4%) (Figura 1).

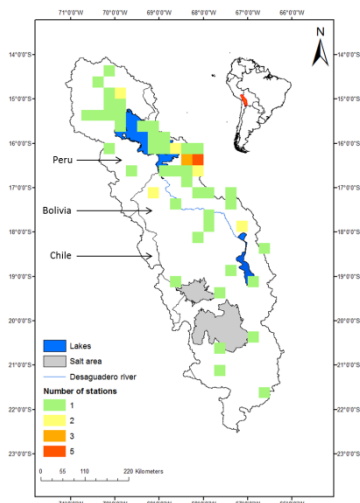


Figura 1: Área de estudo representando os *pixels* (resolução espacial) dos SREs de diferentes cores em função do número de pluviômetros incluído nos *pixels*.

A bacia inclui o sistema TDPS composto pelo lago Titicaca, o rio Desaguadero, o lago Poopó e os desertos de sal (salares) de Coipasa e Uyuni. As elevações na região variam de 3700 até 6500 com uma elevação e declive médio, respectivamente, de 4700 m e 2° (Satzé *et al.*, 2014). As elevações mais baixas se encontram na zona de inundação do rio Desaguadero. Esse rio faz a conexão entre o lago Titicaca no norte e os lagos Uru-Uru e Poopó na parte central. Altos relevos se encontram nas duas cordilheiras (Andina e Royal) que fazem as limites Oeste e Leste da bacia. A precipitação apresenta um forte gradiente Norte-Sul que varia desde 1100 mm/ano, ao Norte, até 200 mm/ano, ao Sul (Garreaud *et al.*, 2003; Pillco e Bengtsson, 2006). Portanto, o padrão de precipitação é o mesmo em toda bacia hidrográfica com uma temporada úmida de dezembro a março, representando uma contribuição anual de 81% no norte e 51% no sul (Guyot *et al.*, 1990; Garreaud *et al.*, 2003).

## MATERIAIS e METODOLOGIA

A *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) de colaboração entre a NASA e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) foi feita para monitorar e estudar as precipitações tropicais. O *Tropical Rainfall Measuring Mission Multisatellite Precipitation Analysis* (TRMM TMPA) é um dos produtos derivados dessa missão. Existem a *Near Real Time product* (TMPA-RT) e uma *Gauge Adjusted version* (TMPA-GA). Para desenvolver o TMPA-RT, quatro radiômetros de micro-ondas passivas (TMI, SSM/I, AMSR-E, AMSU-B) de 4 satélites de baixa órbita (DMSP, Aqua, NOAA, TRMM) servem na determinação das precipitações junto dados infravermelhos de 4 satélites geostacionários (DMSP, NOAA, AQUA, TRMM) (Huffman *et al.*, 2007 e

2010). O TMPA-GA é derivado de uma calibração do TMPA-RT usando dados de precipitações mensais. Até 2005, os dados mensais foram providos pelo *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) numa rede de 1° de resolução espacial. Depois de 2005, os dados usados são providos pelo *Climate Assessment and Monitoring System* (CAMS) numa rede de 0.5° de resolução espacial. A última versão do TMPA (v7) foi liberada em julho 2011 e usa mais dois radiômetros de micro-ondas passivas (SSMIS e MHS) pela geração de sua versão RT.

*Climate prediction center MORPHing* (CMORPH) é um produto do *National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Prediction Center* (NOAA/CPC). Precipitações são derivadas a partir de radiômetros de micro-ondas passivas (AMSU-B, SSM/I, TMI e AMSR). Em função dos radiômetros considerados diferentes algoritmos são usados (Ferraro, 1997, Ferraro *et al.*, 2000, Kummerow *et al.*, 2001). As características das estimativas de chuvas são propagadas temporalmente e espacialmente utilizando vetores de moções derivados de observação infravermelha, de resolução espacial de meia hora de satélites geoestacionários (Joyce *et al.*, 2004). Devido as heterogeneidades nos dados da primeira versão (CMORPH v0.x), uma segunda versão (CMORPH v1) foi desenvolvida com uma melhor homogeneidade.

*Precipitation Estimation from remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN) é um produto do *Center de Hidrometeorology e Remote Sensing* (CHRS). As precipitações são calculadas pelo uso de uma rede neural descrita por Hsu *et al.* (1997) a partir de dados infravermelhos de satélites geoestacionários (GOES-8; GOES-10; GMS-5; Metsat-6; Metsat-7) do CPC e NOAA. Os dados de micro-ondas são usadas em segundo lugar para ajustar os parâmetros da rede a fim de aumentar a precisão da estimativa de precipitação. Há uma versão em quase tempo real (PERSIANN-NRT) feita a partir das estimativas satélites e uma versão ajustada (PERSIANN-ADJ) com os dados GPCP (versão 2.1) no espaço temporal mensal a 2,5° de resolução espacial (Behrangi *et al.*, 2011). Essas duas versões serão avaliadas neste estudo.

Produtos	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Período	Cobertura	G-A
TMPA-RT v7	3 horas	0.25 °	Março 2000 - agora	60°N - 60°S / 180°W - 180°E	Não
TMPA-GA v6	3 horas	0.25 °	Janeiro 1998 - Junho 2011	50°N - 50°S / 180°W - 180°E	Sim
TMPA-GA v7	3 horas	0.25 °	Janeiro 1998 - Novembro 2013	50°N - 50°S / 180°W - 180°E	Sim
PERSIANN-RAW	3 horas	0.25 °	Março 2000 - Março 2013	50°N - 50°S / 180°W - 180°E	Não
PERSIANN-ADJ	3 horas	0.25 °	Março 2000 - Dezembro 2010	60°N - 60°S / 180°W - 180°E	Sim
CMORPH-RAW v1	3 horas	0.25 °	Janeiro 2001 - agora	60°N - 60°S / 180°W - 180°E	Não

Tabela 1: principais características dos diferentes SREs.

A temporada de chuva no Altiplano ocorre entre Novembro e Março o que corresponde a 70 % do total anual (Garreaud *et al.*, 2003). No período de estudo (2005 ate 2007) eu calculei uma contribuição de 82.7 % por esses mesmos meses. Baseando-se no estudo do (Gao e Liu, 2013) apenas esses meses serão avaliados no nosso estudo. Devido à falta de dados nas series temporais que pode ocorrer nos SREs e/ou pluviômetros, para cada *pixel*, eu optei para apenas conservar as datas nas quais todos os SREs e pluviômetros tinham informações. Assim, no passo temporal anual, só os anos com 80 % de informação o mais foram avaliados. Para o passo mensal e 15 dias, o mesmo processo de seleção pelas avaliações foi feito. Tal procedimento não afeita as comparações porque o período por cada SREs e pluviométricos é o mesmo (Buarque *et al.*, 2011). As avaliações no espaço anual são feita pelas observações dos padrões de chuva. Avaliações no espaço temporal mensal e 15 dias são feita pelo calculo do *Root Mean Square Error* (RMSE), *Standard Deviation* (STD) e *coeficiente de correlacion* (R). As comparações no espaço temporal diário são baseadas no fato do que a pluviometria é

uma variável discreta com duas possibilidades: Dia com chuva o dia sem chuva. Enquanto comparar as chuvas detectadas pelos SREs e as detectadas pelos pluviômetros, existem quatro possibilidades.

		Pluviômetro	
		Chuva	Não chuva
SRE	Chuva	Hit (H)	False (F)
	Não chuva	Miss (M)	Nul (N)

Tabela 2: Situações possíveis para verificação dos SREs em função dos dados dos pluviômetros.

Baseado nessa caracterização, usei dois parâmetros frequentemente usados nos outros estudos: o POD (*Probability of Detection*) e o FAR (*Fals Alarm Ratio*). As equações para o calculo são apresentadas abaixo.

$$POD = \frac{H}{H + M}$$

Equação 1: POD

$$FAR = \frac{F}{H + F}$$

Equação 2: FAR

O POD mostra a potencialidade do SRE em detectar os dias de chuva e o FAR caracteriza o quanto o SRE vai detectar chuva eradas (chuvas não detectadas pelos pluviômetros). Os valores do POD e FAR variam entre 0 e 1 com um valor ótimo de 1 para o POD e de 0 para o FAR. Mais o valor do POD é próximo a 1 melhor o SRE detecta as chuvas. Mais o valor do FAR é próximo a 0 menos eventos de chuva erados são detectados pelo SRE.

## RESULTADOS e DISCUSSAOES

### Anual

Pelo período de 01/01/2005 a 31/12/2007 a acumulação anual médio foi mapeada para cada SREs (Figura 2)

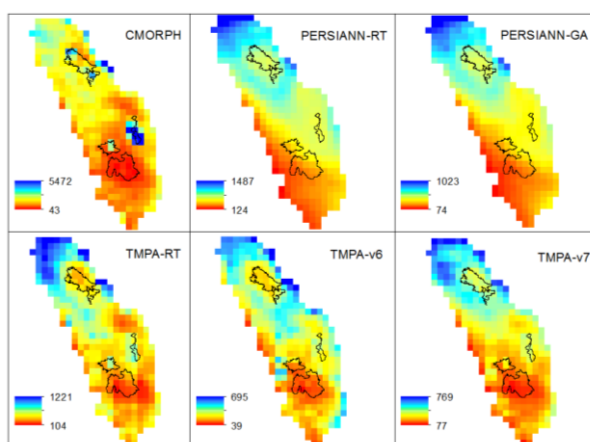


Figura 2: Padrão de chuva anual médio em mm/ano (2005-2007) dos diferentes SREs

Observa-se para cada SRE o gradiente Norte-Sul típico da região com chuvas mais importante no Norte. O gradiente é mais marcado nos produtos PERSIANN e os outros

SREs apresentam mais variações locais. Na zona do lago Titicaca observa-se uma redução das precipitações para todos os produtos. Tal efeitos já foram mostrado por [Paiva et al. \(2011\)](#); [Tian et al. \(2007\)](#) e [Katiraie-Bouroujerdy et al. \(2013\)](#). Análises de séries temporais de chuva passadas mostrarão pico de chuva na zona do lago Titicaca ([Roche et al., 1992](#)) o que demonstra a limitação dos SREs nessa zona de acordo com [Tian et al. \(2007\)](#). Os salares não parecem ter influencia nas estimações. CMORPH apresenta um pico de chuva na zona do lago Poopó o que não é representativo do padrão de chuva nessa região. Todos os SREs tem pico de chuva na parte Sul-Leste do lago Titicaca nos relevos dos Andes. Esse resultado concorda com os valores de chuva registrado nessa parte no estudo do [Roche et al. \(1990\)](#).

### Mensal

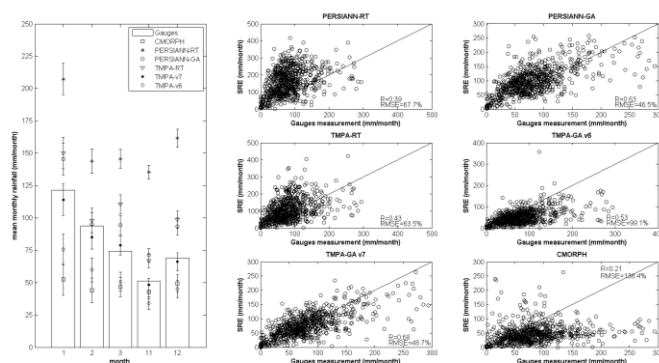


Figura 3: Na direita estão os valores de precipitações mensais média (2005-2007) dos pluviômetros e SREs com barras de erro absoluto de 10 %. Na esquerda estão os *scatters plot* dos SREs vs pluviômetros com os valores do coeficiente de correlação (R) e do RMSE (%)

As barras no histograma representam o viés de + ou -10 % dos SREs em comparação com as acumulações mensais dos pluviômetros. A precisão do SRE é considerada aceitável quando o viés absoluto é menor do que 10 % ([Brown et al., 2006](#); [Yang e Luo, 2014](#)). O TRMM-GA v7 é o único dos produtos que cumpre essa exigência para cada mês. Em quanto o coeficiente de correlação R um valor de 0,7 (Figura 3) foi considerado como limite aceitável ([Condom et al., 2011](#); [Yang e Luo, 2014](#); [Franchito et al., 2009](#)). O TRMM-GA v7 esta muito perto com um valor de 0.68. Nota-se que a calibração do PERSIANN-GA permitiu reduzir a superestimação da versão PERSIANN-RT. A primeira calibração TRMM-GA-v6 produziu uma melhoria em comparação a versão RT, mas tem uma tendência a subestimar a chuva. Em quanto o RMSE um valor limite de 50 % abaixo do qual os estimativos dos SREs foram considerados razoável ([Condom et al., 2011](#); [Franchito et al., 2009](#)). Os únicos produtos que tem uma RMSE<50% são o PERSIANN-GA e TRMM-v7. Com todos os requisitos estáticos definidos respeitados, o TRMM-GA-v7 fornece uma representação mensal aceitável da chuva no Altiplano.

### 15 Dias

Nesse passo temporal todos os SREs estão fora dos critérios de qualidade previamente definidos. O TRMM-GA v7 apresenta um viés de 10% (o muito perto) em cada passo temporal de 15 dias, mas apresenta um valor do R de 0.62 menores do limite de 0.7 e um RMSE de 67.9 % maior do limite de 50% (Figura 4). O PERSIANN-GA apresenta melhor valor do R e RMSE, mas sobrestima as precipitações. O passo temporal mensal aparece como limite de uso dos SREs nessa região.



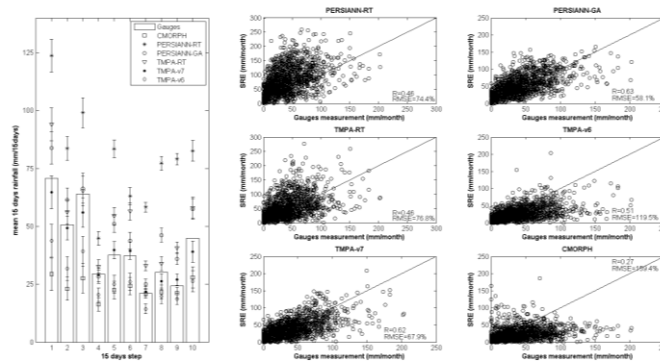


Figura 4: Na direita estão os valores de precipitações 15 dias media (2005-2007) dos pluviômetros e SREs com barras de erro absoluto de 10 %. Na esquerda estão os *scatters plot* dos SREs vs pluviômetros com os valores do coeficiente de correlação (R) e do RMSE (%)

### Diário

Só os *pixels* com mais de 1 pluviômetros foram analisados para segurar uma melhor representação dos *pixels* considerados.

latituda	longituda	Numero de pluviometro	CMORPH	PERSIANN-RT	PERSIANN-GA	TRMM RT	TRMM GA v7	TRMM GA v6
-14,875	-69,875	2	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,09
-16,125	-68,625	2	0,23	0,15	0,14	0,16	0,16	0,17
-16,375	-68,125	5	0,24	0,17	0,16	0,26	0,26	0,28
-16,375	-68,375	3	0,12	0,11	0,09	0,15	0,16	0,20
-16,625	-68,125	2	0,15	0,10	0,10	0,16	0,16	0,18
-17,125	-69,125	2	0,13	0,12	0,10	0,08	0,07	0,07
-17,875	-67,125	2	0,20	0,16	0,13	0,23	0,21	0,30

Tabela 3: Valor do FAR de cada SREs nos *pixels* incluindo mais de 1 pluviômetros

Latituda	Longituda	Numero de pluviometro	CMORPH	PERSIANN-RT	PERSIANN-GA	TRMM RT	TRMM GA v7	TRMM GA v6
-14,875	-69,875	2	0,79	0,87	0,89	0,69	0,68	0,67
-16,125	-68,625	2	0,83	0,84	0,83	0,69	0,66	0,62
-16,375	-68,125	5	0,84	0,81	0,82	0,89	0,87	0,79
-16,375	-68,375	3	0,71	0,84	0,85	0,83	0,84	0,69
-16,625	-68,125	2	0,84	0,75	0,75	0,87	0,86	0,75
-17,125	-69,125	2	0,62	0,81	0,82	0,53	0,52	0,52
-17,875	-67,125	2	0,50	0,75	0,72	0,60	0,61	0,50

Tabela 4: Valor do POD de cada SREs nos *pixels* incluindo mais de 1 pluviômetros

Com valores de FAR menores e do POD maiores ou próximos aos dos outros SREs, os produtos PERSIANN apresentam melhor potencialidade na detecção dos eventos de chuva.

### Conclusão

Com seis produtos avaliados, esse estudo pode servir de base aos futuros usuários de estimações de chuva a partir dos satélites nessa região. Para estudo climático os dados Anuais poderiam ser usados tais como os dados mensais da versões TMPA-v7. As deficiências dos SREs na zona do lago Titicaca podia orientar o desenvolvimento dos futuros algoritmos nas zonas de grande corpo de água que, por diferencia de emissividade parecem influenciar as estimações satélites. No caso de melhoria prevista pelos usuários, a versão PERSIANN-GA parece ser a mais adequada já que seria mais fácil corrigir o viés e o produto tem um melhor potencial na detecção das chuvas.

## **Agradecimentos**

---

O primeiro autor agradece a CAPES pelo finacamento da bolsa de Doutorado que permitiu realizar esse estudo e o SENAMHI pela liberação dos dados pluviométricas da região.

## **Referencias**

---

- Asadullah, A., McINTYRE, N., Kigobe, M., 2008. Evaluation of five satellite products for estimation of rainfall over Uganda / Evaluation de cinq produits satellitaires pour l'estimation des précipitations en Ouganda. *Hydrol. Sci. J.* 53, 1137–1150.
- Behrangi, A., Khakbaz, B., Jaw, T.C., AghaKouchak, A., Hsu, K., Sorooshian, S., 2011. Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *J. Hydrol.* 397, 225–237.
- Buarque, D.C., de Paiva, R.C.D., Clarke, R.T., Mendes, C.A.B., 2011. A comparison of Amazon rainfall characteristics derived from TRMM, CMORPH and the Brazilian national rain gauge network. *J. Geophys. Res.* 116, 1–12.
- Brown, J.E.M., 2006. An analysis of the performance of hybrid infrared and microwave satellite precipitation algorithms over India and adjacent regions. *Remote Sens. Environ.* 101, 63–81.
- Cohen Liechti, T., Matos, J.P., Boillat, J.-L., Schleiss, a. J., 2012. Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 489–500.
- Condom, T., Rau, P., Espinoza, J.C., 2010. Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998-2007. *Hydrol. Process.* 25, 1924–1933.
- Dinku, T., Connor, S.J., Ceccato, P., 2010. Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, in: Gebremichael, M., Hossain, F. (Eds.), *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 193–204.
- Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S.J., Ropelewski, C.F., 2007. Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *Int. J. Remote Sens.* 28, 1503–1526.
- Ferraro, R.R., 1997. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications. *J. Geophys. Res.* 102, 16715.
- Ferraro, R.R., Weng, F., Grody, N.C., Zhao, L., 2000. Precipitation characteristics over land from the NOAA-15 AMSU sensor. *Geophys. Res. Lett.* 27, 2669–2672.
- Franchito, S.H., Rao, V.B., Vasques, A.C., Santo, C.M.E., Conforte, J.C., 2009. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. *J. Geophys. Res.* 114, D02105.



- Gao, Y.C., Liu, M.F., 2013. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products using rain gauge observations over the Tibetan Plateau. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 837–849.
- Garcia, M., 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agric. For. Meteorol.* 125, 67–82.
- Garreaud, R., Vuille, M., Clement, A.C., 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 194, 5–22.
- Gebregiorgis, A.S., Hossain, F., 2013. Understanding the Dependence of Satellite Rainfall Uncertainty on Topography and Climate for Hydrologic Model Simulation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 51, 704–718.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Del Castillo, C., Buytaert, W., 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agric. For. Meteorol.* 139, 399–412.
- Guyot, J.L., Roche, M.A., Noriega, L., Calle, H., Quintanilla, J., 1990. Salinities and sediment transport in the Bolivian highlands. *J. Hydrol.* 113, 147–162.
- Heidinger, H., Yarlequé, C., Posadas, A., Quiroz, R., 2012. TRMM rainfall correction over the Andean Plateau using wavelet multi-resolution analysis. *Int. J. Remote Sens.* 33, 4583–4602.
- Hsu, K., Gao, X., Sorooshian, S., Gupta, H. V., 1997. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks. *J. Appl. Meteorol.* 36, 1176–1190.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P., Stocker, E.F., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeorol.* 8, 38–55.
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., Xie, P., 2004. CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *J. Hydrometeorol.* 5, 487–803.
- Katiraie-Boroujerdy, P.-S., Nasrollahi, N., Hsu, K., Sorooshian, S., 2013. Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran. *J. Arid Environ.* 97, 205–219. doi:10.1016/j.jaridenv.2013.05.013
- Kummerow, C., Hong, Y., Olson, W.S., Yang, S., Adler, R.F., McCollum, J., Ferraro, R., Petty, G., Shin, D.-B., Wilheit, T.T., 2001. The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors. *J. Appl. Meteorol.* 40, 1801–1820.
- Li, J., D.Heap, A., 2008. *Spatial Interpolation Methods: A Review for Environmental Scientists.*

- Li, X., Zhang, Q., Xu, C.-Y., 2014. Assessing the performance of satellite-based precipitation products and its dependence on topography over Poyang Lake basin. *Theor. Appl. Climatol.* 115, 713–729.
- Paiva, R.C.D., Buarque, D.C., Clarke, R.T., Collischonn, W., Allasia, D.G., 2011. Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. *Geophys. Res.*
- Pillco, R., Uvo, C.B., Bengtsson, L., 2007. Precipitation variability and regionalization over the Southern Altiplano, Bolivia. *Int. J. Climatol.* 149–164.
- Prakash, S., Sathiyamoorthy, V., Mahesh, C., Gairola, R.M., 2014. An evaluation of high-resolution multisatellite rainfall products over the Indian monsoon region. *Int. J. Remote Sens.* 35, 3018–3035.
- Roche, M.A., Bourges, J., Cortes, J., Mattos, R., 1992. *Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca*. Springer Netherlands, Boston.
- Roche, M.A., Aliaga, A., Campos, J., Pena, J., Cortes, J., Rocha, N., 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la Cordillères des Andes Boliviennes (Heterogeneity of rainfall on the Bolivian Andean Cordillera). *Hydrology in Mountainous Regions – I- Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publishers: Wallingford UK.
- Romilly, T.G., Gebremichael, M., 2010. Evaluation of satellite rainfall estimates over Ethiopian river basins. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 7, 7669–7694.
- Satgé, F., Bonnet, M-P., Timouk, F., Calmant, S., Pillco, R., Molina, J., Lavado-Camisiro, W., Arsen, A., Créteaux, J-F., Garnier, J., 2014. Accuracy assessment of SRTM v4 and GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data. *accepted*. *International Journal of Remote Sensing*.
- Scheel, M.L.M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., Huffman, G.J., 2011. Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 2649–2663.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., Levizzani, V., De roo, A., 2012. Validation of Satellite-Based Precipitation Products over Sparsely Gauged African River Basins. *J. Hydrometeorol.* 13, 1760–1783.
- Tian, Y., Peters-Lidard, C.D., Choudhury, B.J., Garcia, M., 2007. Multitemporal Analysis of TRMM-Based Satellite Precipitation Products for Land Data Assimilation Applications. *J. Hydrometeorol.* 8, 1165–1183.
- Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W., Guyot, J.-L., 2014. A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean–Amazon River Basins. *J. Hydrometeorol.* 15, 581–592.