

Primeira avaliação da acurácia absoluta e relativa do novo ALOS DEM com base na medição do ICESat em região descoberta

Frédéric Satgé¹
Álvaro Ferreira¹
Ramiro Pillco²
Jorge Molina²
Franck Timouk³
Sébastien Pinel⁴
Jérémy Garnier¹
Marie-Paule. Bonnet³

¹ Universidade de Brasília – UnB
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - DF, 70910-900
Frederic.satge@gmail.com ; alvaroxavier.f@gmail.com ; garnier@unb.br;

² Instituto de Hidrologia y Hidraulica – IHH
Calle 30 cota-cota, La Paz, Bolivia
rami_lund99@hotmail.com; amolina@umsa.bo

³ Institut de Recherche pour le Developpement – IRD
Geoscience et Environnement, Toulouse, France
marie-paule.bonnet@ird.fr; franck.timouk@ird.fr;

⁴ Universidade do Estado Amazonas –UEA
Manaus, Brasil
Sebpinel@gmail.com;

Abstract.

In May 2016, a new Digital Elevation Model (DEM) called ALOS-DEM was made available by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). With a resolution of 30 m the ALOS-DEM bring valuable information over remote regions. The ALOS-DEM is assessed for the first time and over the South American Andean Plateau considering both vertical and relative accuracy. Assessment is done at both the regional scale and considering different slopes classes. A total of 160 000 ICESat altimeter points are used as reference data. For comparison the recently released SRTM-GL1 is also considered. The relative error is generally neglected in DEMs assessment due to lack of accurate reference data. Here we used a new recent methodology based on ICESat data to assess the relative error of the DEMs considering quantitative and categorical statistics. Finally, the hydrological networks derived from the DEMs are compared to a reference hydrological network derived from Google-Earth to assess DEM potentials in hydrological application. The ALOS-DEM is found to be more accurate than SRTM-GL1 considering vertical accuracy, relative accuracy and hydrological application over the region.

Keywords: DEM, ALOS, SRTM-GL1, Vertical accuracy, Relative accuracy, South America Andean Plateau.

1. Introduction

Modelos de elevação digital (DEMs) são comumente utilizados em estudos hidrológicos e geomorfológicos para representar as características topográficas de determinado local. Numerosos estudos utilizaram técnicas de comparação para determinar o DEM mais preciso em determinada região. Pontos de referência de solo (PDRs) derivados de sistemas de posicionamento global (GPS) (Athmania and Achour, 2014) ou de altimetria de alta qualidade (Satgé et al., 2015) são utilizados como referências para calcular os erros de elevação dos DEMs. No entanto, estes estudos têm geralmente se concentrado na precisão da elevação e não considera os erros dos oito *pixels* vizinhos. Para um *pixel* específico, a elevação pode ser maior ou menor do que os *pixels* vizinhos. Devido à relação entre *pixels* vizinhos, uma falsa forma superficial da Terra (aquí após a chamada FST) pode ser observada em alguns DEMs. Assim, a elevação de DEM pode ser precisa, embora não necessariamente fornecer a FST mais precisa (El Hage et al., 2012, Satge et al., 2016). A exatidão vertical absoluta e a descrição FST são complementares, pois são relevantes para diferentes propósitos. A precisão de elevação é necessária para a ortorretificação, enquanto a qualidade da forma é utilizada para aplicações de geomorfologia e hidrologia (El Hage et al., 2012, Satgé et al., 2016). O mapeamento de redes hidrológicas ou a delimitação de bacias hidrográficas, dependem fortemente da FST porque ela direciona os fluxos de superfície (Wechsler, 2006). Esses recursos podem ser recuperados numericamente a partir do DEM através de passos computacionais sucessivos, como por meio dos algoritmos D8 (Jenson and Domingue, 1988). Os algoritmos baseiam-se nas relações de elevação ponto-a-ponto em DEMs; Assim, as inconsistências nas características derivadas de DEM dependem da representação da FST e fornecem informações indiretas sobre a precisão relativa de um DEM. Neste contexto, alguns estudos compararam características hidrológicas derivadas de DEMs com características de referência, fornecendo informações indiretas sobre a precisão relativa dos DEMs (El Hage et al., 2012; Metz et al., 2011; Paz et al., 2008). Quanto melhor for a correspondência entre as características derivadas e referências, melhor será a precisão relativa do DEM. Porém, essa abordagem é unicamente representativa da escala global e não permite avaliar a capacidade dos DEMs para representar as variações locais da FST. Recentemente, Satgé et al. 2016, introduziu uma nova metodologia para avaliar a acurácia relativa dos DEMs em base a dados de altimetria ICESat/GLAS na escala local. A metodologia foi aplicada aos conjuntos de dados ALOS sobre o Planalto Andino Sul-Americano. A precisão do ALOS-DEM foi avaliada em termos da precisão vertical e relativa sabendo que ambas as precisões são complementares. Os resultados foram comparados com os observados pelo SRTM-GL1, na mesma região. Finalmente, um as redes hidrológicas foram extraídas do ALOS-DEM e do SRTM-GL1. As redes hidrológicas derivadas foram comparadas com uma rede hidrológica de referência derivada do *Google Earth* para avaliar as eficiências dos DEMs no contexto da modelagem hidrológica.

2. Área de estudo

A bacia do Altiplano é um sistema endorreico localizado entre as latitudes 22° S e 14° S e longitudes de 71° e 66° O. A bacia hidrográfica abrange uma área total de aproximadamente 192.390 km² e é compartilhada por três países: Bolívia (70%), Peru (26%) e Chile (4%). O Altiplano pode ser considerado uma região desértica onde predominam áreas áridas e cobertura arbórea. As áreas urbanizadas, os corpos d'água e as áreas de sal representam 0,1%, 3,5% e 5,3% de toda a área, respectivamente (Satgé et al., 2015). A elevação da região varia entre 3500 e 6500 m, com uma elevação média de 4000 m. A região

compreende o sistema Titicaca Desaguadero Poopó Salar (TDPS), composto pelo Lago Titicaca, Rio Desaguadero, Lago Poopó e Bacia do Sal de Coipasa (Salar) (Figura 1).

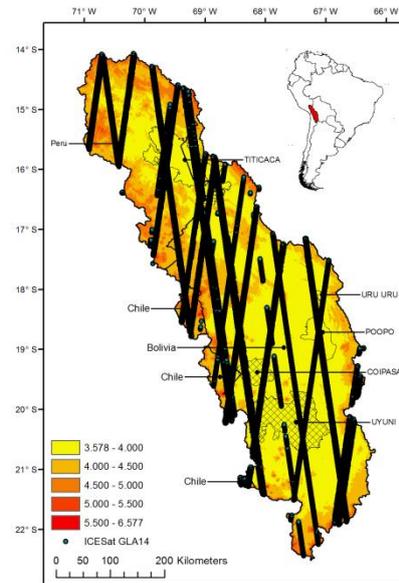


Figura 1. Modelo Digital de Elevação SRTM-GL1 da área de estudo com os PDRs (ICESat/GLAS).

3. Material

Este estudo concentrou-se no Advanced Land Observatory Satellite World 3D-30m (AW3D30) e no *Shuttle Radar Topographic Mission–Global 1* (SRTM-GL1). Os dados ALOS, são fornecidos, gratuitamente, pela Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) desde maio 2016 com uma resolução horizontal de aproximadamente 30 metros e se estende de 82°N a 82°S. Os dados SRTM-GL1 são fornecida pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) com uma resolução de 30 m e se estende de 60°N a 56°S. Estes dados estão disponíveis gratuitamente desde novembro de 2014. Os dados são fornecidos como malhas de 1° por 1° referenciadas ao geóide do elipsóide do Sistema Geodésico Mundial 84 (WGS84) e do Modelo Gravitacional da Terra 1996 (EGM96). Os termos ALOS e GL1 serão usado para referir-se ao AW3D30 e SRTM-GL1.

Os dados ICESat foram produzidos pela NASA. Os dados foram coletados pelo *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) ao bordo do *Ice Cloud and Land Elevation Satellite* (ICESat). O tamanho do píxel é de aproximadamente 70 m, com uma medida de elevação a cada 172 m e espaçamento entre trilhas de 30 km (perto do equador). A precisão vertical do ICESat na escala global é de aproximadamente 15 cm em boas condições (Zwally et al., 2002).

4. Metodologia

4.1. Precisão vertical

Foram avaliados a precisão de elevação dos DEMs com as elevações dos PDR com base no erro médio (ME) e erro médio quadrático (RMSE) (equações 1 e 2).

$$(1) ME = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}$$

$$(2) RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

$$(3) MAE = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (|x_i - y_i|)}{n}$$

Onde n é o número de valores, x é o valor PDR (metros), y é o valor DEM (metros) e ME é o erro médio. Primeiro, calculamos os parâmetros estatísticos em uma escala regional usando todo o conjunto de dados do PDR. Em seguida, foram consideradas diferentes classes de declive. As classes de declive utilizadas neste estudo são as mesmas utilizadas em Satgé et al. (2015) para permitir a comparação entre os resultados dos DEMs. As inclinações são baseadas na distribuição do histograma de 0 ° -2 °, 2 ° -5 °, 5 ° -10 °, 10 ° -20 ° e > 20 ° e correspondem a 55%, 16%, 14%, 13% e 2% do conjunto de dados do PDR, respectivamente. Os valores de ME e RMSE foram calculados para cada classe dos DEMs. O valor de inclinação em cada localização de PDR foi derivado do ICESat.

4.2. Precisão relativa

Em uma matriz DEM, a elevação do ponto poderia ser maior ou menor do que seus pontos vizinhos (Figura 2). Aqui, o termo de precisão relativa é usado para se referir à relação de elevação ponto-a-ponto e como a relação de elevação ponto a ponto observada nos DEM combina com as PDRs. O valor da inclinação entre vizinhos é função da relação de elevação ponto-a-ponto e, portanto, pode ser usado para quantificar a precisão relativa dos DEMs. Assim, as inclinações entre PDRs são calculadas para todos os pares de pontos na região usando todos os DEMs e PDRs. O valor de declive próximo entre DEMs e PDRs significa uma boa precisão relativa, enquanto o valor de declive distante significa baixa precisão relativa. Uma vez que a malha dos DEMs é de 30 m consideramos apenas as encostas calculadas entre pontos separados por pelo menos 100 m. Um valor limite máximo de distância entre pares de pontos foi arbitrariamente fixado em 500 m. Assumimos que as inclinações acima deste valor limiar são mais representativas da forma regional do que a precisão relativa do DEM. Para se ter em conta a precisão vertical absoluta global da ICESat (15 cm), consideramos apenas as encostas recuperadas a partir de PDRs com diferenças de elevação superiores ou iguais a 1 m. Em resumo, apenas PDRs horizontalmente distantes de 100 a 500m com uma diferença de elevação absoluta superior a 1m foram considerados. De acordo com este procedimento de seleção, um conjunto de dados de 475000 valores de declividade foi usado para comparar DEMs e PDRs. Ao contrário da elevação, as inclinações não são esperadas ser somente positivas. Assim, espera-se que o ME seja insignificante, com valores próximos de 0. Nesse contexto, o MAE (equação 3) foi preferido ao ME para quantificar a precisão relativa do DEM juntamente com DST. % MAE e % RMSE foram calculados dividindo MAE e RMSE por valores absolutos de média de referência obtidos de PDRs, que foram calculados na escala global e para todas as classes de declive.

Finalmente, utilizamos uma análise estatística, introduzida por Satgé et al. 2016, para avaliar a precisão relativa de cada DEM. Inclinação é considerada um valor discreto com apenas duas opções: valor positivo ou negativo. Dois resultados são possíveis (Figura 2): (a) DEMs e PDRs relatam a mesma tendência de declive ou (b) DEMs e PDRs relatam diferentes tendências de declividade.

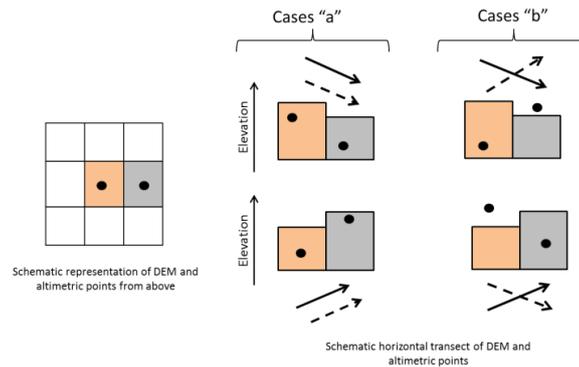


Figura 2. Abordagem estatística categórica. Pontos pretos representam PDRs, a seta preta e a pontilhada representam a orientação da inclinação de DEM e PDRs, respectivamente. Fonte: (Satgé et al.2016).

De acordo a essa caracterização, o False Slope Ratio (FSR) pode ser calculado (Equação 4).

$$(4) \quad FSR = \frac{B}{A+B} \times 100$$

Onde A e B são o total de números observados no casos “a” e “b”, respectivamente. Os valores variam de 0 a 100, com uma pontuação perfeita em 0. O FSR foi primeiramente calculado para todos os DEM considerando os dados de referência e as classes de declive separadamente.

4.3. Aplicação hidrológica

De forma avaliar a potencialidade de cada DEMs em sua aplicação hidrológica, a rede hidrológica da região foi extraída para cada DEM usando a ferramenta Hydro-Tools do Arc-Gis. Uma rede de referência foi digitalizada manualmente do *Google-Earth* já que foi considerado suficientemente preciso para extrair a rede hidrológica regional (Satgé et al. 2016). Apenas digitalizamos rios incluídos em pelo menos uma das redes derivadas dos DEMs. Para assegurar comparações significativas, o comprimento de cada rio extraído do *Google Earth* foi limitado ao comprimento máximo do rio correspondente entre as redes derivadas do ALOS e GL1. As redes derivadas do ALOS e SRTM-GL1 foram comparadas a rede de referencia considerando os índices correctness (Cr) e figure of merit (FM) (Equações. (5) e (6)).

$$(5) \quad C_r = \frac{N_{A \cap B}}{N_B}$$

$$(6) \quad FM = \frac{N_{A \cap B}}{N_{A \cup B}}$$

N_B é o numero das células que representam a rede de referência, $N_{A \cap B}$ é o numero de células da rede derivada do DEM com a rede de referencias e $N_{A \cup B}$ é o somatório de todas as células da rede derivada do DEM e da rede de referência. Um tamanho de células de 150 m foi usado para o calculo do Cr e do FM.

5. Resultados

5.1. Precisão vertical

Considerando o erro vertical, os GL1 e o ALOS apresentam uma distribuição do erro muito parecida com um valores negativo de 7.68 e 7.59 m, respetivamente (Figura 3, Tabela 1). De acordo as diferentes classes de declividades consideradas, para ambos DEMs se observa uma diminuição da acurácia com o incremento do RMSE. A acurácia dos DEMs é

muito parecida. Observa-se que em regiões muito planas (0° - 2°) o ALOS é mais preciso do que o SRTM-GL1 em quanto nas regiões de alta declividade ($>20^{\circ}$), o SRTM-GL1 é mais acurado. Porém essas variações de acurácia de um DEM para outro são muitas pequenas, na faixa de 30 cm.

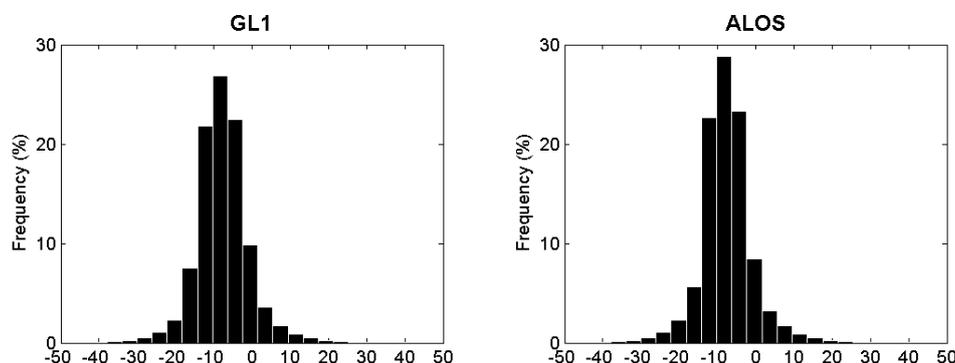


Figure 3. Distribuição do erro do GL1 e ALOS.

Tabela 1. ME e RMSE para GL1 e ALOS com base na acurácia absoluta vertical para diferentes classes de declividades.

Slope ($^{\circ}$)	GL1		Alos	
	ME (m)	RMSE (m)	ME (m)	RMSE (m)
0-2	-8.4	9.3	-8.1	9.0
2-5	-7.6	9.4	-7.5	9.5
5-10	-7.2	10.4	-7.3	10.4
10-20	-6.7	12.5	-6.9	12.6
>20	-6.0	16.2	-5.7	15.8
Total	-7.68	10.37	-7.59	10.25

5.2. Precisão relativa

De acordo a tabela 2 observa-se que ambos os DEM apresentam uma acurácia relativa bastante similar na escala global com um valor de AME de 32.5 % e 31 % nas estimações das declividades. Porém, o ALOS fica levemente mais acurado que o GL1 com menores valores de AME e RMSE (Tabela 2). Considerando diferentes classes de declividades, observa-se que o ALOS fica mais preciso em zonas muito planas (0° - 2°) com um AME de 68.9 % em quanto o GL1 tem o AME de 80.8%. Nas zonas de declividade superior a 2° o ALOS e o GL1 apresentam valores de AME e RMSE muito próximo. De maneira geral, ao contrario da acurácia vertical, a acurácia relativa de ambos DEMs aumenta com o aumento da declividade local.

Tabela 2. AME e RMSE para GL1 e ALOS com base na acurácia relativa para diferentes classes de declividades.

Slope ($^{\circ}$)	AME (%)		RMSE (%)	
	GL1	Alos	GL1	Alos
0-2	80.8	68.9	139.5	135.5
2-5	40.0	39.9	60.9	62.1
5-10	26.0	26.0	37.2	37.7
10-20	19.3	19.0	27.0	26.8
>20	22.4	20.9	28.5	26.9
Total	32.5	31.0	55.7	55.3

A figura 4 mostra os valores de FSR para cada DEMs. Os resultados do FSR confirmam os valores de AME e RMSE. Na escala global, o ALOS apresenta valor levemente menor de FSR em comparação a GL1. Na região muito plana (0° - 2°) o ALOS representa melhor a topografia com valor de FSR de aproximadamente 9% contra 14% para o GL1. Nas zonas de declividade superior a 2° , os dois DEMs apresentam valores similares de FSR. A abordagem de estatística categórica (FSR) revela que os DEMs, e, especialmente o ALOS, conseguem representar de maneira satisfatória a FST com baixos valores de FSR.

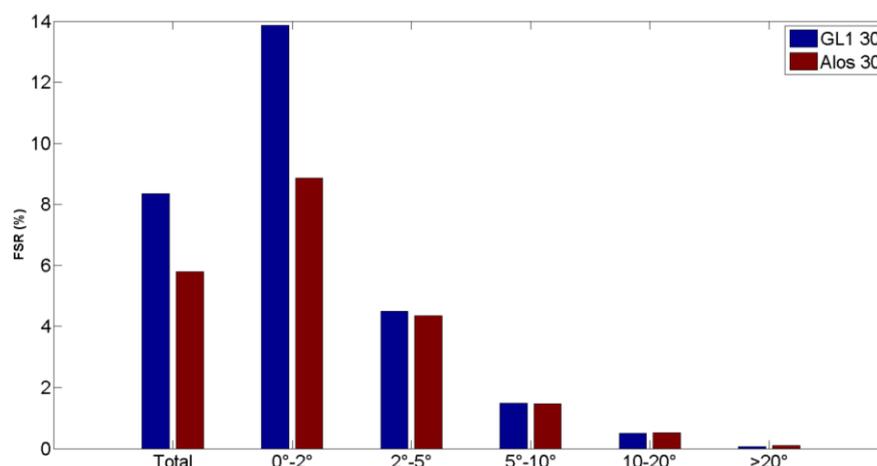


Figure 4: FSR valores de SRTM-GL1 (azul) e ALOS (vermelho) na escala global para diferentes classes de declividade.

5.3. Aplicação hidrológica

As redes extraídas a partir do ALOS apresentam valores de Cr e FM de 0.41 e 0.3 respectivamente, em quanto valores menores que 0.30 e 0.23 foram encontrados para o GL1. Esses valores confirmam os resultados do FSR. De fato, o ALOS tem menores valores de FSR o que resulta em uma maior potencialidade dele para aplicação hidrológica tal como a delimitação da rede hidrológica. Porém os valores de Cr e FM são baixos e uma calibração hidrológica torna-se necessária para poder melhorar a localização da rede hidrológica (Pinel et al., 2015).

6. Conclusão

O estudo avaliou pela primeira vez a acurácia vertical e relativa do novo ALOS DEM numa região descoberta. Na escala global, o estudo revelou uma leve melhor acurácia vertical do modelo ALOS em comparação ao modelo GL1. As diferenças são maiores considerando a acurácia relativa, especialmente em zonas planas de declividade inferior a 2° . Nessa região observa-se uma diminuição do MAE de 12 % e do RMSE de 5% considerando o ALOS em comparação ao GL1. Adicionalmente o recente índice FSR foi usado para observar a potencialidade do ALOS na representação da FST. Os resultados mostram uma melhor potencialidade do ALOS em representar a FST em comparação ao GL1 com valores menores de FSR na escala global e especialmente nas zonas planas. Finalmente, a comparação das redes hidrológicas extraída a partir do ALOS e do GL1 confirmou os resultados prévios. Observa-se uma melhor correspondência com a rede de referência da rede hidrológica derivada do ALOS do que da rede derivada do GL1. Na região, o modelo ALOS consiste no DEM mais acurado, atualmente gratuito, disponível para representar a FST.

Agradecimentos

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de doutorado, ao Centro Nacional de Pesquisa Espacial Francês pelo apoio financeiro e a Universidade de La Paz (Bolívia), pelo apoio ao trabalho.

Referências Bibliográficas

- Athmania, D., Achour, H., 2014. External validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 free access digital elevation models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sens.* 6, 4600–4620. doi:10.3390/rs6054600
- El Hage, M., Simonetto, E., Faour, G., Polidori, L., 2012. EVALUATION OF ELEVATION, SLOPE AND STREAM NETWORK QUALITY OF SPOT DEMS, in: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* pp. 63–67. doi:10.5194/isprsannals-I-2-63-2012
- Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 54, 1593–1600.
- Metz, M., Mitasova, H., Harmon, R.S., 2011. Efficient extraction of drainage networks from massive , radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 667–678. doi:10.5194/hess-15-667-2011
- Paz, A.R. da, Collischonn, W., Risso, A., Mendes, C.A.B., 2008. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. *Comput. Geosci.* 34, 1584–1596. doi:10.1016/j.cageo.2007.10.009
- Pinel, S., Bonnet, M.-P., Santos Da Silva, J., Moreira, D., Calmant, S., Satgé, F., Seyler, F., 2015. Correction of Interferometric and Vegetation Biases in the SRTMGL1 Spaceborne DEM with Hydrological Conditioning towards Improved Hydrodynamics Modeling in the Amazon Basin. *Remote Sens. Remote Sens* 7, 16108–16130. doi:10.3390/rs71215822
- Satgé, F., Bonnet, M.P., Timouk, F., Calmant, S., Pillco, R., Molina, J., Lavado-Casimiro, W., Arsen, A., Crétaux, J.F., Garnier, J., 2015. Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data. *Int. J. Remote Sens.* 36, 465–488. doi:10.1080/01431161.2014.999166
- Satgé, F., Denezine, M., Pillco, R., Timouk, F., Pinel, S., Molina, J., Garnier, J., Seyler, F., Bonnet, M.-P., 2016. Absolute and relative height-pixel accuracy of SRTM-GL1 over the South American Andean Plateau. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 121. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.09.003
- Wechsler, S., 2006. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 3, 2343–2384. doi:10.5194/hessd-3-2343-2006