

## Nivelamento das estações limimétricas dos rios Negro, Uraricoera e Branco com dados altimétricos

Guilherme Cordeiro Figliuolo<sup>1</sup>  
Rafael Gomes Barbosa<sup>1</sup>  
Frank Menezes de Freitas<sup>1</sup>  
Mylena Vieira Silva<sup>1</sup>  
Cláudio Augusto de Paula Lima<sup>1</sup>  
Joecila Santos da Silva<sup>2</sup>  
Stephane Calmant<sup>3</sup>  
Frederique Seyler<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Amazonas – UEA  
Escola Superior de Tecnologia - EST  
Av. Darcy Vargas, 1200, Parque 10, 69050-020, Manaus-AM, Brasil  
Email: guilhermecordeiro\_f@hotmail.com; rgb.barbosa@gmail.com;  
frank.meteoro@yahoo.com; mylenavieirasilva@gmail.com; cadpl.eng@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Amazonas – UEA  
Centro de Estudos do Trópico Úmido – CESTU  
Av. Djalma Batista 3578, Flores, 69050-010, Manaus-AM, Brasil  
e-mail: jsdsilva@uea.edu.br

<sup>3</sup> Institut de Recherche pour le Développement – IRD;  
UMR 5566 LEGOS (CNES/CNRS/IRD/UT3)  
14 Av. Edouard Belin, 31400, Toulouse, France  
e-mail: stephane.calmant@ird.fr

<sup>4</sup> Institut de Recherche pour le Développement – IRD;  
UMR 228 ESPACE-DEV (IRD,UM2,UR,UAG)  
Centre IRD de Guyane, 0,275 km Route de Montabo, BP 165 97323, Cayenne, cedex Guyane  
Française  
e-mail: frederique.seyler@ird.fr

**Abstract.** The basic hydrological monitoring is an activity that aims to generate information to support studies and projects that require knowledge of water availability and hydroelectric potential of the basins. In this context, the reference altitude common for gauged stations is needed to better conducting hydrological and hydrodynamic studies (Moreira, 2010). To solve these problems, in part, an alternative to complement the hydrological monitoring is the use of satellite radar altimetry (Calmant and Seyler, 2006). The present study aims to level the gauges of the Negro, Uraricoera and Branco through altimetry data space. In this study were leveled a total of thirteen gauged stations twelve of these gauges were leveled by the indirect method wich is obtained by the difference in level between two stations altimetric to get the slope of that part of the river, and this slope is calculated to zero ruler which is between those two stations, one altimetric and was leveled by the method directly, in which the gauge is imaged within the range of the satellite, then performs a simple linear regression to obtain the zero level of the ruler. The results showed that it was possible to level the rules with altimetric data, but if the distance between the station and the ruler altimetry data are too large have a bigger margin of error.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, geology, sensoriamento remoto, processamento de imagens, geologia.

### 1. Introdução

O monitoramento hidrológico básico é uma atividade que visa gerar informações para subsidiar os estudos e projetos que demandam o conhecimento da disponibilidade hídrica e

potencial hidráulico das bacias. Neste contexto, a altitude de referência comum para as estações fluviométricas é necessária para melhor condução de estudos hidrológicos e hidrodinâmicos (Moreira, 2010).

A bacia Amazônica, apesar de ser a maior bacia hidrográfica do mundo, dispõe de uma precária rede de monitoramento hidrológico. Essa carência na região Amazônica é justificada, em parte pela dificuldade e alto custo de acesso à região, com longas distancias entre as estações e os grandes centros e ausência de uma rede viária adequada, sendo a maior parte das estações amazônicas acessada por transporte fluvial e até mesmo por transporte aéreo. A ausência de informação hidrológica nessa região prejudica uma serie de trabalhos de engenharia como alertas de cheia e estudos de potenciais hidráulicos (Moreira, 2010).

Para solucionar esses problemas, em parte, uma alternativa para complementação do monitoramento hidrológico é o emprego da altimetria por satélites, também chamada de altimetria espacial (Calmant e Seyler, 2006). Neste contexto o sensoriamento remoto além de complementar os dados dessas réguas, pode corrigi-las e para tornar esses dados nivelados de acordo com um referencial comum e não arbitrário e esse é o objetivo do presente estudo, nivelar os dados das réguas linimétricas ao longo dos rios Negro, Uraricoera e Branco utilizando os dados de altimetria espacial para corrigir os dados *in situ* para referenciá-los com o nível do mar.

## 2. Área de Estudo

A bacia do rio Negro possui cerca de 700000 km<sup>2</sup> o que corresponde a cerca de 10% da bacia Amazônica, onde o rio Negro é o seu principal tributário, o segundo maior rio do mundo em volume de água (IBAMA, 2007), com uma vazão média anual de  $29 \times 10^3 \text{ m}^3 / \text{s}$ , sua precipitação varia de 3500 mm/ano perto de sua nascente a 2137 mm/ano na sua foz (Villar *et al.*, 2009). O rio Negro nasce na Colômbia com o nome de rio Chamusiqueni, em seguida recebe a denominação de rio Guainia, para finalmente receber o nome de rio Negro, após receber as águas do canal Casiquiare. Segue a direção geral sudeste até chegar ao rio Solimões onde formam o rio Amazonas.



Figura 01. Bacia do rio Negro, com as réguas linimétricas e estações altimétricas marcadas ao longo dos rios Negro, Uraricoera e Branco.

### **3. Metodologia do Trabalho**

#### **3.1 Métodos do nivelamento de réguas**

##### **3.1.1 Método Direto**

Para o nivelamento de estação fluviométrica instalada abaixo do traço do satélite, ou a menos de dois quilômetros do mesmo que corresponde à da faixa imageada, a seleção e processamento dos dados foram feitos separadamente, realizando uma regressão linear simples. O coeficiente angular fornece o fator de escala entre a amplitude das séries temporais de dados e é usado como parâmetro, representando o nível zero da régua, para nivelamento de estações fluviométricas localizadas dentro de uma estação virtual.

##### **3.1.2 Método Indireto**

Através deste método o nivelamento é obtido pela diferença das médias das séries altimétricas e das leituras das réguas, para as mesmas datas, considerando que há um deslocamento de origem. O objetivo deste método é intercalar a série temporal das réguas e as séries temporais altimétricas, a montante e a jusante da régua.

#### **3.2 Dados Altimétricos**

Em março de 2002 a ESA lançou o satélite ENVISAT que é o maior satélite construído para observação da Terra até agora. O ENVISAT está posicionado na mesma órbita do satélite ERS-2, os dados recolhidos por eles são utilizados para estudo científico da Terra, análise ambiental e alterações climáticas. Os dois grandes objetivos da missão ENVISAT são: coletar séries temporais do meio ambiente em escala global para observar suas tendências, melhorando o monitoramento e controle dos recursos naturais e contribuir para uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem na parte sólida da Terra. (Gardini et al., 1995). Esse satélite pesa mais de 8 toneladas e é constituído por 10 aparelhos que permitem uma análise rigorosa da atmosfera, continentes, oceanos e gelo do planeta. (Wehr e Attema, 2001), são eles: Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR), Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS), Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS), Radar Altimeter 2 (RA-2), Micro Wave Radiometer (MWR), 2 sistemas de posicionamento precisos DORIS e Laser RetroReflector (LRR). (Silva, 2010)

Para assegurar um tempo de vida adicional o satélite de ENVISAT moveu-se para uma órbita a uma altitude média de 782 km em 22 de outubro de 2010. A resolução temporal passou de 35 dias para 30 dias.

Os registros de dados geofísicos (Geophysical Data Records – GDRs), processados e disponibilizados pelo Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH do Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS, para uso no presente estudo proveniente da missão ENVISAT, utilizando-se o algoritmo standard de tratamento de FO Ice-1, foram obtidos entre as coordenadas geográficas 90°W a 40°W e 13°N a 21°S. Extraíram-se do CTOH 90 traços, totalizando 93 ciclos de 10/2002 a 10/2010. Foram desenvolvidos programas em linguagem Fortran para cada algoritmo standard de tratamento das FOs do satélite ENVISAT (Ocean, Ice-1, Ice-2 e Sea-ice) que permitem calcular a posição à 20Hz (i.e., 1/20ésimo de segundo) da medida altimétrica com data, latitude, longitude e altura do plano de água a partir da equação da órbita do satélite com as devidas correções ambientais e geofísicas que permitem a criação das bases de dados para utilização no programa Virtual ALtimetry Station – VALS (VALS, 2011).

#### **3.3 Dados *in situ***

As séries temporais de nível de água das estações de: Cucuí (1,215°N;66,85°W), São Gabriel da Cachoeira (0,136°N;67,884°W), Curicuriari (0,2°S;66,88°W), Tapuruquara (0,42°S;65,01°W) Serrinha (0,48°S;64,82°W) Barcelos (0,96°S;62,93°W) Moura (1,456°S;61,63°W), Uaicás (3,55,°N;63,169°W), Maracá (3,35°N;61,42°W), Fazenda Cajupiranga (3,44°N;61,04°W), Fazenda Passarão (3,2°N;60,57°W), Boa Vista (2,83°N;60,66°W), Caracará (1,82,°N;61,12°W), ao longo dos rios Negro, Uraricoera, e Branco foram obtidas através da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no site Hidroweb.

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1 Nivelamento das réguas do rio Negro

Os nivelamentos de réguas no rio Negro foram todos feitos através do método de nivelamento de declividade nula, foram feitos 6 estudos, utilizando as estações do satélite ENVISAT com o algoritmo *Ice-1*.

A primeira régua, mais a montante, é a de Cucuí (1,215°N;66,85°W), que está localizada entre as estações altimétricas NEGRO\_536\_01 e NEGRO\_493\_04 está distante aproximadamente 69 km da estação altimétrica à montante e aproximadamente 48 km da estação altimétrica à jusante, apresentando uma declividade média nesse trecho do rio Negro de 33 mm/km.

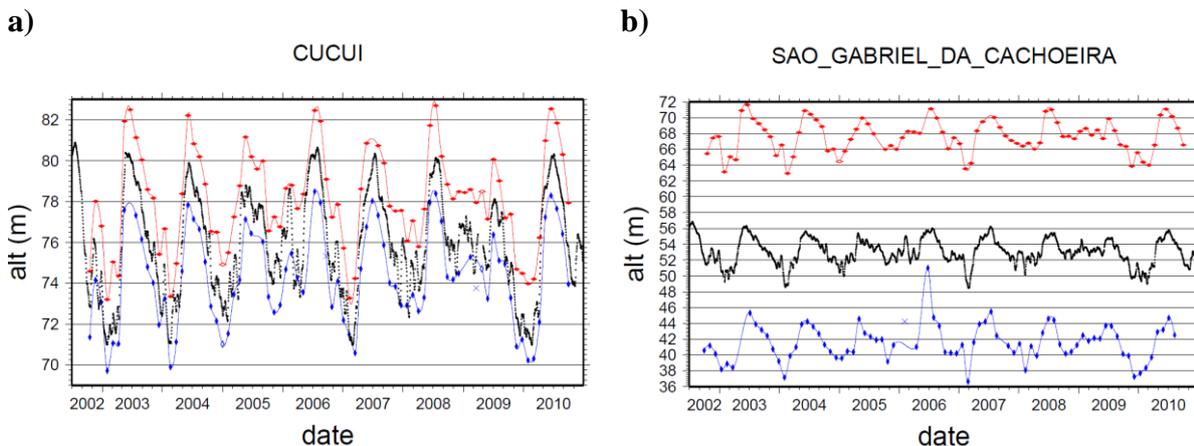


Figura 02. Nivelamento da régua de Cucuí (a) e São Gabriel da Cachoeira (b) pelo método indireto. As linhas azul, vermelha e preta representam respectivamente a estação montante, estação jusante e estação *in situ*

Em seguida foi feito nivelamento para a régua de São Gabriel da Cachoeira (0,136°N;67,884°W), que está entre as estações NEGRO\_536\_07, à montante que se localiza a aproximadamente 59 km da régua e NEGRO\_994 à jusante que está a aproximadamente 46 km da régua de São Gabriel da Cachoeira. Para este trecho do rio se apresentou uma declividade média de 251 mm/km.

A régua de Curicuriari está entre as mesmas estações da régua de São Gabriel da Cachoeira, a uma distancia de aproximadamente 96 km da estação à montante NEGRO\_536\_07 e aproximadamente 9 km da estação à jusante NEGRO\_994. Como é o mesmo trecho do rio a declividade é a mesma de 251 mm/km.

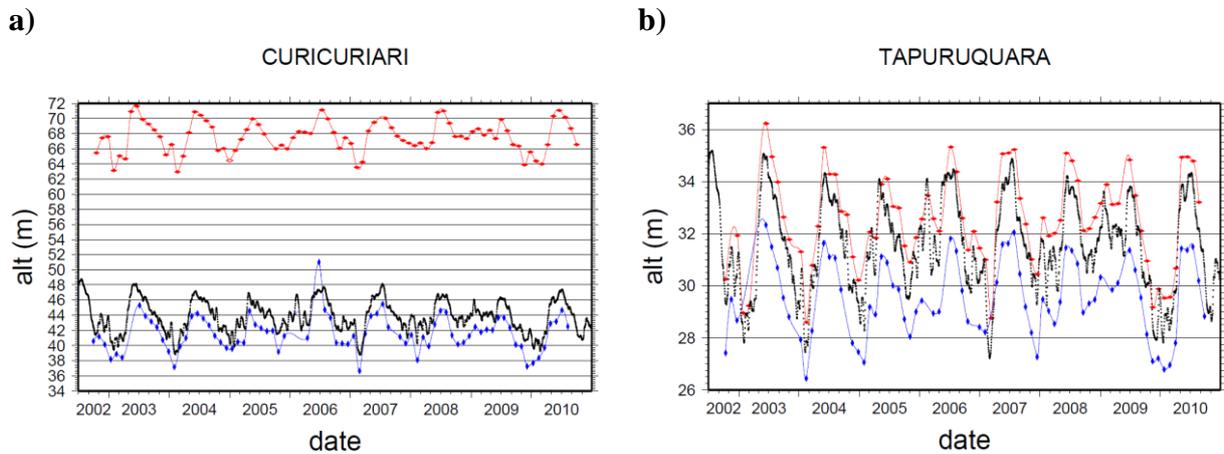


Figura 03. Nivelamento da régua de Curicuriari (a) e Tapuruquara (b) pelo método indireto. As linhas azul, vermelha e preta representam respectivamente a estação montante, estação jusante e estação *in situ*.

Na estação de Tapuruquara ( $0,42^{\circ}\text{S};65,01^{\circ}\text{W}$ ) a estação à montante é NEGRO\_407 a aproximadamente 17 km de distância da régua, e a estação à jusante NEGRO\_364 está a aproximadamente 42 km de distância da régua. A declividade média do trecho do rio é de 52 mm/km.

A estação de Serrinha ( $0,48^{\circ}\text{S};64,82^{\circ}\text{W}$ ) também está localizada entre as estações NEGRO\_407 e NEGRO\_364 a uma distancia de aproximadamente 39 km e 19 km respectivamente. Com uma declividade de 52 mm/km.

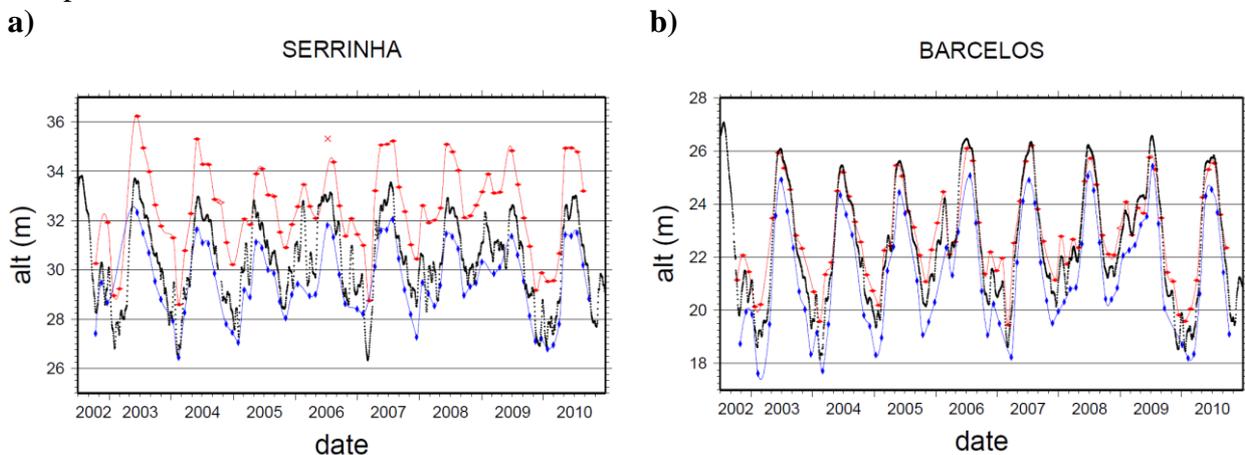


Figura 04. Nivelamento da régua de Serrinha (a) e Barcelos (b) pelo método indireto. As linhas azul, vermelha e preta representam respectivamente a estação montante, estação jusante e estação *in situ*.

A estação de Barcelos ( $0,96^{\circ}\text{S};62,93^{\circ}\text{W}$ ), se localiza entre os traços NEGRO\_278 à montante a uma distancia de aproximadamente 53 km e NEGRO\_779 à jusante, a uma distância de aproximadamente 122 km, este trecho do rio apresenta uma declividade de 9 mm/km. No nivleamento o zero da régua ficou no nível de 17.102 m.

A régua de Moura ( $1,456^{\circ}\text{S};61,63^{\circ}\text{W}$ ) está localizada entre as estações altimétricas NEGRO\_192 à montante e NEGRO\_650 à jusante, suas distâncias são respectivamente 38 km e 65 km, apresentando uma declividade de 10 mm/km. O nivelamento definiu que o zero da régua está a um nível de 10.148 m.

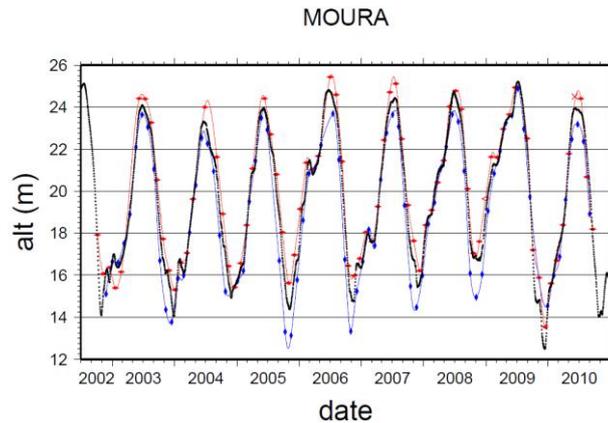


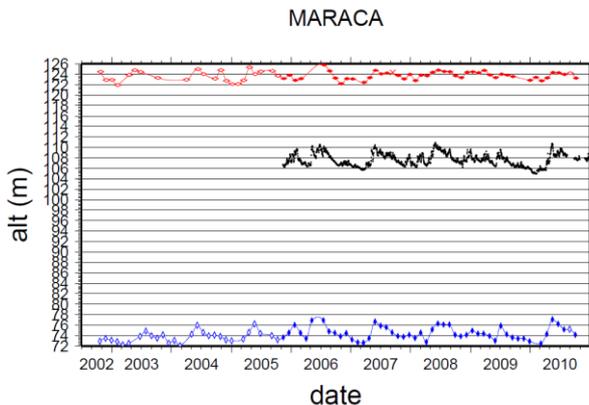
Figura 05. Nivelamento da régua de Moura pelo método indireto. As linhas azul, vermelha e preta representam respectivamente a estação montante, estação jusante e estação *in situ*.

#### 4.2 Nivelamento das régua do rio Uraricoera

A estação de Uaicás ( $3,55^{\circ}\text{N};63,169^{\circ}\text{W}$ ) foi nivelada utilizando regressão linear simples, diferentemente das demais, por se localizar a menos de 2 km da estação URARICOERA\_235\_01 ela foi nivelada pelo método direto e zero da régua obtido está a um nível de 300,08 m.

A estação de Maracá ( $3,35^{\circ}\text{N};61,42^{\circ}\text{W}$ ), está entre as estações URARICOERA\_736 a montante que está a uma distância de aproximadamente 27 km e da estação URARICOERA\_607 à jusante que está a uma distância de 55 km. O rio apresentou uma declividade de 607 mm/km e o zero da régua foi obtido a um nível de 101,9 m. Nota-se também a falta de dados *in situ* entre os anos de 2002 até 2005

a)



b)

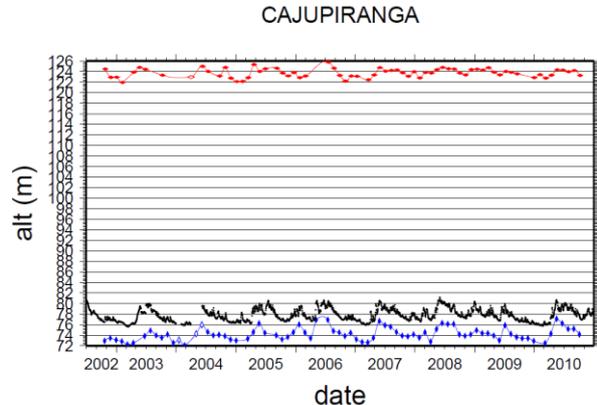


Figura 06. Nivelamento da régua de Maracá (a) e Cajupiranga (b) pelo método indireto. As linhas azul, vermelha e preta representam respectivamente a estação montante, estação jusante e estação *in situ*.

A régua de Cajupiranga ( $3,44^{\circ}\text{N};61,04^{\circ}\text{W}$ ) está localizada entre as estações URARICOERA\_736 à montante, a uma distancia de aproximadamente 76 km e a estação URARICOERA\_607 à jusante, a uma distancia de 6 km, a declividade foi de 608 mm/km. Segundo os estudos o zero da régua está a um nível de 71,4 m.

A régua de Passarão ( $3,2^{\circ}\text{N};60,57^{\circ}\text{W}$ ) está entra as estações URARICOERA\_192 à montante, a uma distancia de aproximadamente 57 km e a estação URARICOERA\_607 à jusante, a uma distancia de aproximadamente 167 km, apresentou uma declividade de 8 mm/km e o zero da régua no nível de 65,4 m.

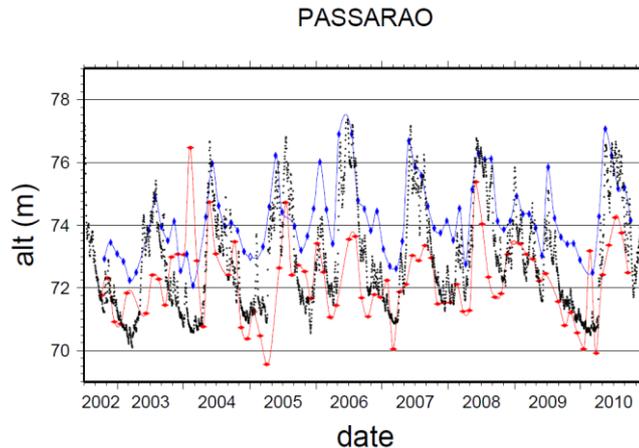


Figura 07. Nivelamento da régua de Passarão pelo método indireto. As linhas azul, vermelha e preta representam respectivamente a estação montante, estação jusante e estação *in situ*.

### 4.3 Nivelamento das réguas do rio Branco

A régua de Boa Vista está localizada entre a estação URARICOERA\_192 à montante, a uma distancia de 110 km e a estação BRANCO\_607 à jusante, a uma distancia de 29 km, apresentando uma declividade de 109 mm/km. O zero da régua encontra-se a um nível de 57,9 km.

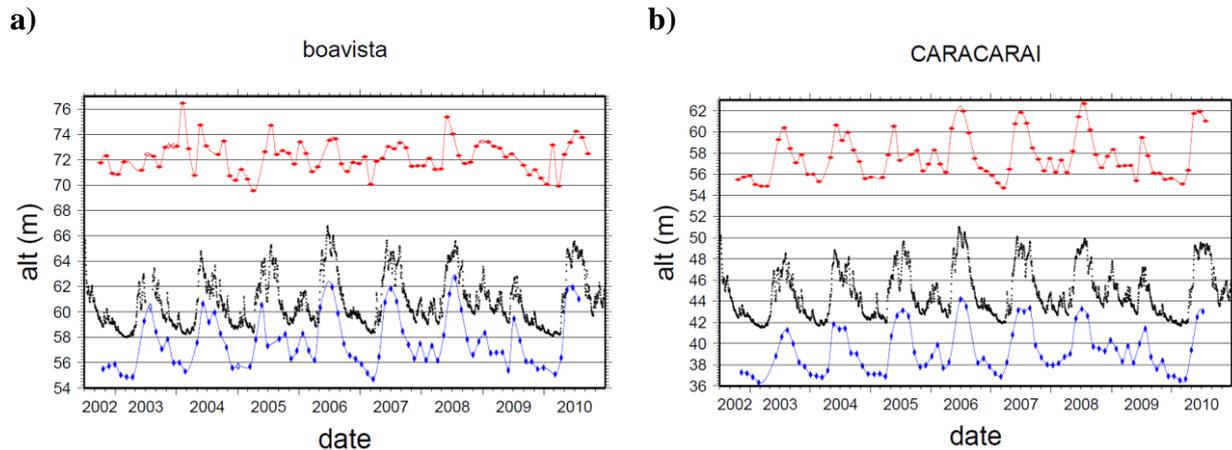


Figura 08. Nivelamento da régua de Boa Vista (a) e Caracarái (b) pelo método indireto. As linhas azul, vermelha e preta representam respectivamente a estação montante, estação jusante e estação *in situ*.

A régua de Caracarái está a entre a estação BRANCO\_607 à montante, a uma distancia de 107 km e a estação BRANCO\_149 à jusante, a uma distancia de 46 km. Apresentando uma declividade de 120 mm/km e o zero da régua a um nível de 41,3 m.

## 5. Conclusão

O método de nivelamento de réguas linimétricas utilizando dados de satélites altimétricos mostrou-se bastante satisfatório, mostrando resultados coerentes entre as estações virtuais e as réguas. É possível notar que a altitude do nível zero das réguas diminui de acordo com a aproximação da foz dos rios. Apesar disso, no caso das estações de São Gabriel da Cachoeira, Curicuriari, Maracá e Fazenda Cajupiranga a declividade média é de 251, 251, 607 e 608 mm/km, respectivamente. Estes resultados indicam que nivelamentos com essas características devem ser analisados minuciosamente, uma vez que esta declividade média indica um grande desnível de terreno impossibilitando afirmar que o zero da estação fluviométrica encontrasse próximo ao nível médio.

O trabalho também valida os dados das séries altimétricas satisfatoriamente quando comparados com as séries de estações fluviométricas, no caso de Uaicas onde a régua localiza-se dentro de uma estação virtual. O que reafirma a possibilidade da utilização de dados altimétricos para estudos hidrológicos.

### **Agradecimentos**

Este estudo se insere nos projetos de pesquisa CASAM (CNPq), DS BIODIVA e CLIVAR (FAPEAM), Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (FAPEAM) pela bolsa de Iniciação Científica cedida ao primeiro autor. Ao *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère* - CTOH do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales* - LEGOS, pelos *Geophysical Data Records* - GDRs e as correções troposféricas correspondentes e à *European Space Agency* - ESA pela garantia do uso dos dados da missão ENVISAT disponibilizados para o estudo.

### **Referencias Bibliográficas**

CALMANT, S. e SEYLER, F. (2006). Continental surface water from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*. 338(14-15), 1113-1122, doi: 10.1016/j.crte.2006.05.012.

MOREIRA, D. M. Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica, 2010. 157 p. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

SILVA, J.S. Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica – Aplicações Hidrológicas. Saarbrücken (GE): Édition Universitaires Européennes, 2010. 350 p.

SILVA, J. S. et al. (2010) Water levels in the Amazon Basin derived from the ERS 2-ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 114(10):2160-2181, doi: 10.1016/j.rse.2010.04.020

VILLAR, J. C. E. et al. (2009). “Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador)”, *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 11, pp. 1574-1594. doi: 10.1002/joc.1791