

Caracterização do regime hidrológico do rio Beni

Fabiana Nunes Abinader Rios ¹

Jossandra Alves Damasceno ^{1,2}

Joecila Santos Da Silva ¹

Stéphane Calmant ³

¹ Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Av. Darcy Vargas, 1200 – Parque 10 de Novembro, Manaus – AM, 69050-020

fabiana.abinader@gmail.com

joba.alves@gmail.com

jsdsilva@uea.edu.br

² Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA

Av. André Araújo, 2936 – Petrópolis, Manaus – AM, 69067-375

³ Institut de Recherche pour le Développement – IRD (UMR 5566 LEGOS –
CNES/CNRS/IRD/UT3)

14 Av. Edouard Berlin, 31400, Toulouse, France.

Stephane.calmant@ird.fr

Abstract. Satellite radar altimetry has the ability to monitor changes in the variations in surface water height, providing data with precision and with a wide spatial coverage. Through this method, can be obtained as data continues, homogeneous and frequently. Two of the main objectives for the use of this type of monitoring is to generate altimetry data where there are no stations on the ground and the difficulty of the exchange of information between the countries of South America. For the characterization of the hydrological regime of the Beni River, based on altimetry data of water level obtained from virtual stations, will be using the Ice-1 algorithm ENVISAT satellite. The software that will be used in this project are Google Earth and VALS. The river Beni has two well defined hydrological periods. The hydrological regime is characterized by a period of multimodal flooding, rapid rise and slow recession. Flood happens between the months of January to March, where the maximum quotas are found more often in March. The dry season starts in July and extends until October, getting more frequent, the minimum quotas that are in September. Thus, the results of space altimetry demonstrate that ENVISAT mission was successful in remote monitoring of temporary flooding of the Beni River.

Palavras-chave: Satellite radar altimetry, hydrological regime, Beni River, ENVISAT satellite, altimetria espacial, regime hidrológico, rio Beni, satélite ENVISAT .

1. Introdução

O rio Beni nasce na Cordilheira dos Andes, ao norte da Bolívia, através dos afluentes do rio Madidi e do rio Tuichi. Após banhar todo o país boliviano e chegando na fronteira Bolívia e Brasil, deságua no rio Madeira. Tem a cerca de 1600 km de comprimento, tornando-se um dos maiores rios da América do Sul, e o mais longo dos afluentes do rio Madeira (Figura 1). Através de permanente coleta e interpretação de dados hidrometeorológicos, pode-se entender o regime hidrológico do rio Beni.

A coleta de dados hidrometeorológicos *in situ*, nas bacias transfronteiriças, é dificultada por diversos fatores como, sistema de monitoramento com custo altíssimo de instalação, áreas de difícil acesso, bem como, troca de dados entre os países. Assim, o sensoriamento remoto tornou-se uma solução viável para o estudo de tais regiões. As principais vantagens dos sensores ativos do sensoriamento remoto contam, primeiramente, com a possibilidade de

obtenção de dados em áreas cobertas por nuvens, em segundo, a capacidade de penetração na vegetação. E por fim, a capacidade de iluminação própria, possibilitando que o ângulo de iluminação seja controlado e a cobertura ser obtida em tempos específicos, até mesmo durante a noite, permitindo atingir maior resolução espacial (Jensen, 1986).

A altimetria espacial parte do princípio que os satélites altimétricos medem a altura instantânea da superfície oceânica através da emissão de uma onda eletromagnética no nadir do satélite e pela medida do intervalo de tempo que separa a emissão da onda, da recepção de um eco. Estes satélites possuem cobertura global, o que também possibilita que seja obtida altura da superfície da lâmina de água em hidrossistemas continentais. Desta forma, altimetria espacial é uma técnica que permite a aquisição de dados de níveis de água, especialmente nas regiões de difícil acesso, sendo uma fonte que alcança a bacia do rio Beni. A análise dos dados é feita de forma contínua, homogênea e frequente, além do detalhamento espacial que não ocorre nas estações *in situ*.

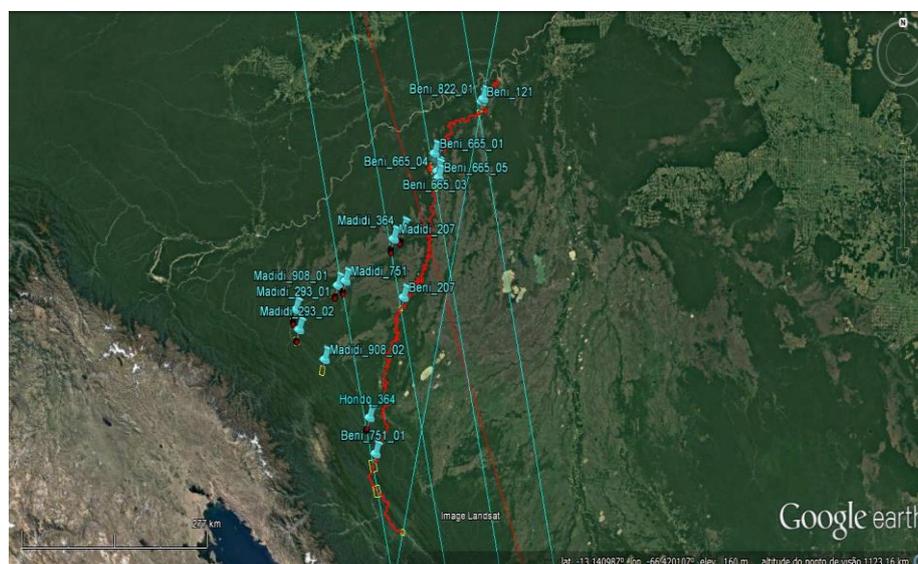


Figura 1- Localização do rio Beni, objeto deste estudo, e estações virtuais (pontos em azul). Mosaico de imagens do Google Earth em segundo plano.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Elaboração das Estações Virtuais

Os dados altimétricos utilizados no presente estudo fazem parte da Rede de Monitoramento Altimétrico do Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHASA). O Satélite utilizado foi o ENVISAT (*ENVIRONMENTAL SATellite*), com o algoritmo standard de tratamento de Forma de Onda (FO) *Ice-1*, lançado em março de 2002. 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*, 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., 1/20éssimo 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 VALS.

Os dados de níveis de água do rio Beni foram obtidos através de estações virtuais. Define-se Estação Virtual como o ponto de cruzamento dos traços de órbita do satélite altimétrico com os corpos hídricos na superfície terrestre, obtendo-se uma série temporal da altura do plano de água. Utilizou-se o método descrito em Silva *et al.* (2010), aplicado para criação das estações virtuais uma seleção dos dados correspondentes a estes cruzamentos, adaptadas às variações no tempo e no espaço através do programa *Virtual ALtimetry Station* (VALS, 2016).

A elaboração de uma estação virtual pode ser dividida em duas etapas principais e diferenciáveis pelo tipo de programa utilizado em cada uma delas. Na primeira parte utiliza-se o *Google Earth* (Google Earth, 2016) para a seleção dos pontos de cruzamento entre o corpo de água e o traço de satélite, através de um polígono, delimitando assim a área de dados a serem recolhidos (Figura 2).



Figura 2 - Criação da estação virtual Beni-121, com dados do satélite ENVISAT, através do programa VALS. Trajetória do satélite ENVISAT no sentido sul-norte, traço 121 que cruza o rio Beni (linha azul). Delimitação dos dados altimétricos através do polígono amarelo. Mosaico de imagens do Google Earth em segundo plano.

Os dados selecionados na primeira etapa são, então, visualizados no programa VALS, mostrando o perfil hidrológico altimétrico ao longo do traço, onde cada linha corresponde a uma passagem do satélite. Essa configuração permite melhorar a seleção dos dados e excluindo as medidas indesejáveis. A informação disponível, para cada passagem do satélite, permite estimar as séries temporais de altura do nível da água, assim, calculando-se a mediana para cada ciclo. Adicionalmente, as alturas elipsoidais de nível de água das séries temporais serão convertidas em alturas geoidais, utilizando-se o modelo de ondulação geoidal EGM2008 desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008).

2.2 Caracterização do regime hidrológico

Para a caracterização do regime hidrológico destaca-se, primeiramente, a representação gráfica das informações hidrológicas por meio de séries temporais de altura da lâmina da água, com o objetivo de observar o comportamento das cotas ao longo do tempo de registros

altimétricos, verificando-se a existência de periodicidade e estacionariedade, assim como, a possível existência de anomalias.

Para facilitar a identificação de períodos sazonais foram elaborados os cotagramas para cada série temporal, calculando-se as médias mensais anuais das cotas altimétricas, utilizando-se a metodologia proposta por Bittencourt e Amadio (2007). Foi conceituado para delimitar o período de cheia, o valor médio menos o desvio padrão calculado para as cotas altimétricas máximas anuais. Igualmente, utilizando a média acrescida do desvio padrão das cotas altimétricas mínimas anuais, foi definido o valor limite para o período de estiagem.

Neste estudo, calculou-se a amplitude média da superfície da água obtida através dos dados resultantes do cotagrama como parâmetro de distribuição auxiliar na avaliação da variabilidade do regime hidrológico em questão.

A amplitude média é dada por:

$$\bar{A} = \overline{H_{m\acute{a}x}} - \overline{H_{m\acute{i}n}} \quad (01)$$

sendo \bar{A} a amplitude média da lâmina de água, $\overline{H_{m\acute{a}x}}$ a cota máxima do cotagrama e $\overline{H_{m\acute{i}n}}$ a cota mínima do cotagrama.

3. Resultados e Discussão

Nome da Estação Virtual	Latitude (°)	Longitude (°)	Cota Mínima (m)	Cota Máxima (m)	Amplitude (m)	Distancia da Foz (km)
BENI_822_02	-15.583.717	-67.286.632	404,47	406,76	2,29	989,65
BENI_751_01	-14.898.562	-67.680.946	243,51	248,06	4,55	903,05
BENI_207	-13.323.047	-67.322.506	157,91	163,62	5,71	591,05
BENI_665_05	-12.116.641	-66.879.275	135,43	142,9	7,47	318,05
BENI_665_04	-12.054.202	-66.893.495	135,13	142,6	7,47	310,45
BENI_665_03	-12.025.902	-66.899.793	134,93	142,22	7,29	305,16
BENI_665_02	-11.944.847	-66.918.334	134,28	142	7,72	294,86
BENI_665_01	-11.875.435	-66.934.138	132,68	139,93	7,25	268,36
BENI_121	-11.346.656	-66.333.765	120,77	126,95	6,18	95,36
BENI_822_01	-11.316.167	-66.310.528	119,74	126,02	6,28	90

Tabela 1. Estações virtuais elaboradas no rio Beni.

3.1 Estações Virtuais

O presente estudo está fundamentado na análise dos dados altimétricos do rio Beni provenientes do satélite ENVISAT, utilizando-se o algoritmo *Ice-1*. Um conjunto de 10 estações virtuais, descritas na Tabela 1, teve seus dados analisados, separadamente, para a geração das séries temporais altimétricas. A localização das estações virtuais pode ser observada na Figura 1.

Sob o traço 121 do satélite ENVISAT, é mostrado, na Figura 2, um exemplo de estação virtual. O perfil hidrológico medido pelo altímetro durante o trajeto do ENVISAT é mostrado na Figura 3, onde cada linha representa um ciclo de passagem do satélite. Observa-se que, com uma seleção somente geográfica, podem ser selecionados dados que não são de medidas de altura de água, mas medições nas margens do rio ou no solo.

Por outra perspectiva, com a ferramenta usada para este estudo, pode-se fazer uma seleção mais refinada dos dados altimétricos, abstraindo-se, para cada traço do satélite, medidas efetivamente de altura de água, tanto na cheia como na vazante, pontos em vermelho na Figura 3.

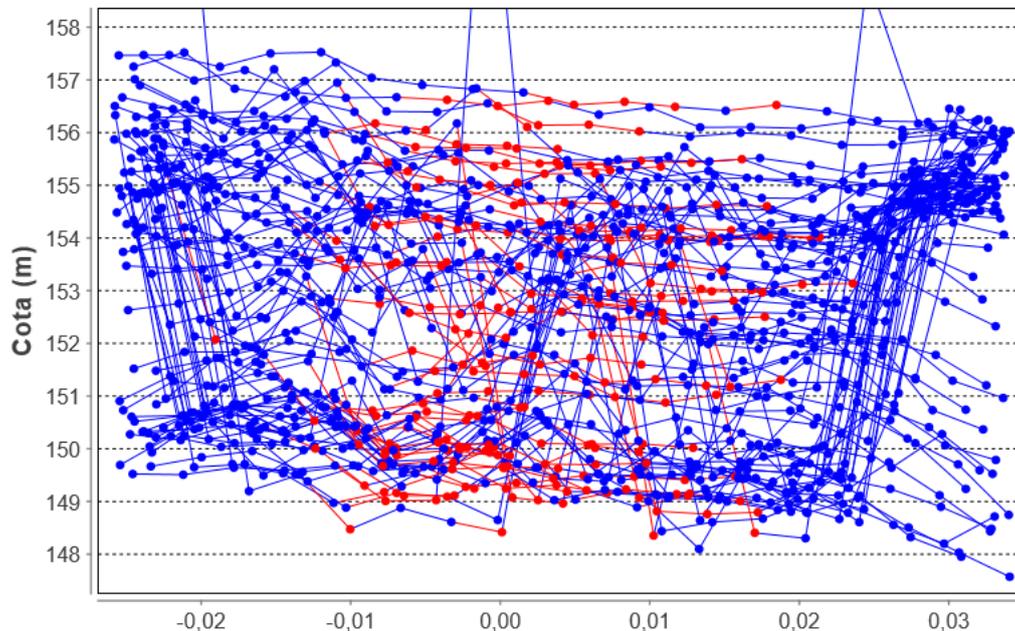


Figura 3 - Perfil hidrológico medido pelo altímetro RA-2 do satélite ENVISAT. Seleção normal dos dados altimétricos está em vermelho

3.2 Regime hidrológico do rio Beni

Primeiramente, foram gerados 10 cotagramas (Figura 4), sendo um para cada estação virtual. Os gráficos foram gerados de maneira que torna possível observar o comportamento do nível de água ao longo do ano, com finalidade de avaliar a sazonalidade durante os oito anos selecionados para o estudo, de 2002 a 2010. A delimitação dos períodos sazonais é muito importante para aplicações de metodologias referentes à coleta de informações que estão relacionadas às diferenças hidro-morfológicas e hidrodinâmicas estabelecidas nos períodos de estiagem e cheia.

Na Tabela 2 apresenta-se, para as 10 estações virtuais estudadas, as cotas altimétricas máximas e mínimas, a amplitude e a distância até a foz do rio Beni. Evidencia-se o crescimento da amplitude média em direção à foz, onde a primeira estação virtual Beni_602, situada na Bolívia a 989,65 km da foz, tem amplitude média de 2,29 m, a menor dentre todas as estações, enquanto a última estação, Beni_822_01, à 90 km da foz, tem amplitude média de 6,28 m. A maior amplitude é encontrada na estação virtual Beni_665_02, com 7,72 m.

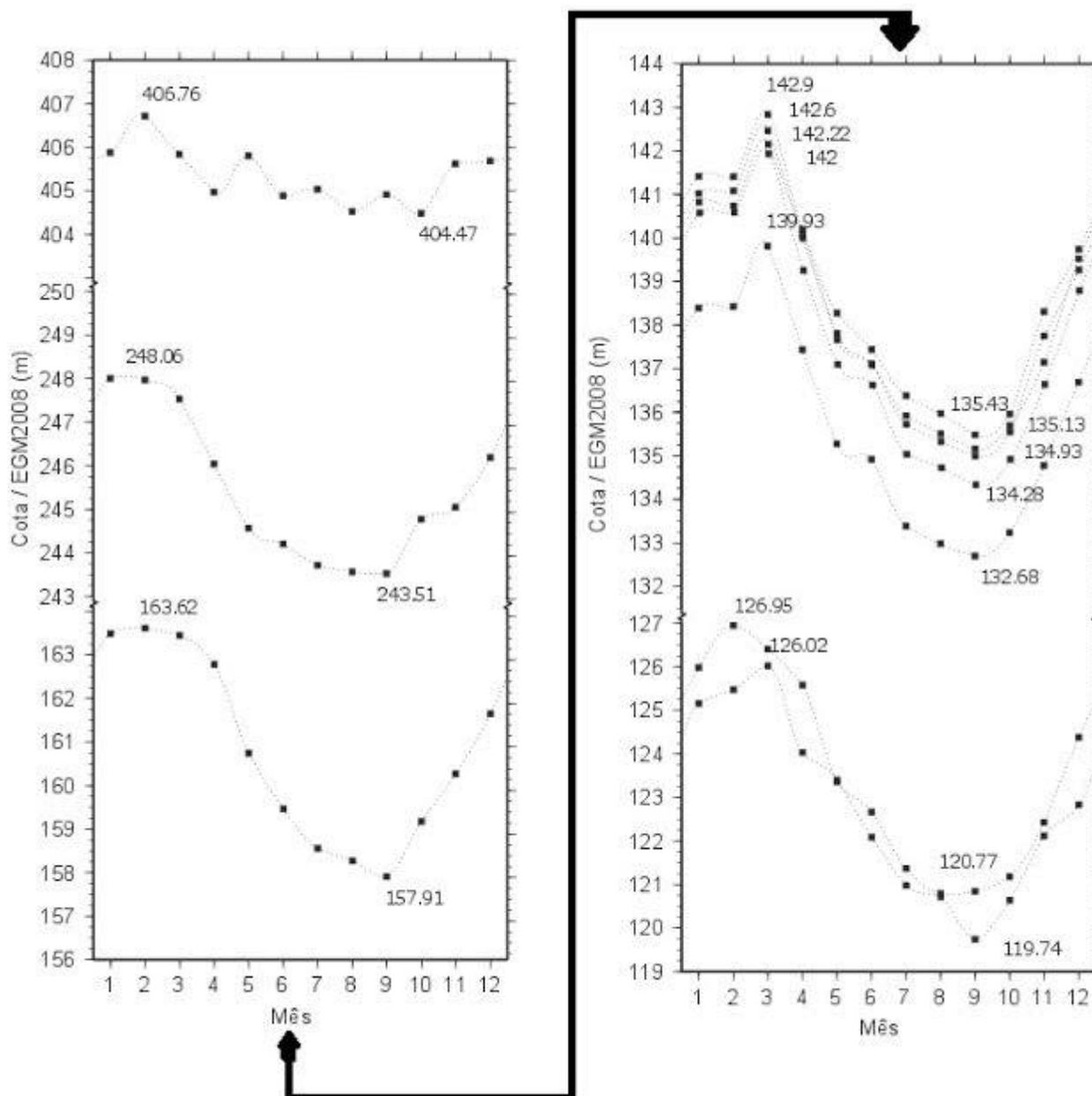


Figura 4. Cotagramas do rio Beni no período estudado onde, pode-se observar os períodos de cheia e estiagem e as cotas máximas e mínimas.

Através do cotagramas (Figura 4), percebe-se as características da sazonalidade do rio Beni, com um ou mais picos de cheia menos acentuado no primeiro semestre resultante do regime tropical boreal (Rodier, 1964 e Molinier, 1997), com dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano e ascensões e recessões assimétricas. A inundação desenvolve-se sobre alguns meses e mant m em sua superfície máxima durante algumas semanas. A cheia ocorre rapidamente e a vazante progride de forma lenta. Nas primeiras estações, à montante, quando o curso de água percorre o território boliviano, o cotagrama   multimodal, com a cheia apresentando um pico entre os meses de janeiro a março, onde as cotas máximas são encontradas com mais frequência no mês de março. Um ou mais picos de magnitude inferior   máxima são encontrados no primeiro semestre. A estiagem inicia-se em maio e se estende até

novembro, apresentando mais frequência, as cotas mínimas no mês de setembro. Após receber as contribuições do rio Mididi, na estação virtual sob o traço 665, distante 318,5 km da foz do rio Beni, o cotograma é mais regular, embora bimodal. A partir da estação virtual Beni-121 distante 95 km da foz, o cotograma apresenta-se monomodal, com uma ascensão acelerada e recessão lenta. Adicionalmente, é possível identificar que 70% tiveram o valor máximo anual no mês de março e 40% em fevereiro, enquanto que 60% tiveram o valor mínimo anual no mês de setembro e 40% em agosto.

4. Conclusões

A utilização dos dados altimétricos, obtidos através da missão ENVISAT, possibilitou a análise da variação sazonal do regime hidrológico do rio Beni através dos cotogramas, apesar de não serem utilizados dados *in situ*. O rio Beni apresenta dois períodos hidrológicos bem definidos. A cheia acontece entre os meses de janeiro a março, onde as cotas máximas são encontradas com mais frequência no mês de março. A estiagem começa em julho e se estende até outubro, obtendo maior frequência, nas cotas mínimas que estão no mês de setembro. Logo, os dados apresentados pelo satélite altimétrico ENVISAT mostraram-se apropriados para alcançar as medidas em regiões remotas e com ausência de dados *in loco*, como o rio Beni, amplificando os conhecimentos sobre o estudo dos níveis de água dos rios da América do Sul.

Agradecimentos

Este estudo se insere nos projetos de pesquisa Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão de bolsas de iniciação científica, ao primeiro autor e mestrado, ao segundo 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, à European Space Agency- ESA pela garantia do uso dos dados da missão ENVISAT disponibilizados para o estudo e aos alunos do Laboratório RHASA.

Referências Bibliográficas

- BITTENCOURT, M. M. e AMADIO, S. A. (2007). “Proposta para identificação e validação dos períodos hidrológicos em área de várzea do rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus”. *Acta Amazônica*, v. 37, p. 303-308.
- CHENG, K., CALMANT, S., KUO, C-Y., TSENG, H-G., Shum, C.K., Seyler, F., da Silva, J.S. (2009). Branco River stage gradient determination and Amazon hydrologic studies using GPS water level measurements. *Marine Geodesy* 32 (3), 267–283, Doi:10.1080/01490410903094460.
- CALMANT, S. and SEYLER, F., 2006, Continental surface water from satellite altimetry, *Comptes Rendus Geosciences*, 338(14-15):1113-1122. doi: 10.1029/2001JD000609
- CHRISTOFOLETTI, A., 1981, *Geomorfologia fluvial*. São Paulo: Edgard Blucher. MONTGOMERY, D. G. e RUNGER, G. C., 2003, *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros* 2 ed., Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. ISBN: 85-2161360-1

GETIRANA, A.C.V., BONNET, M.-P., ROTUNNO FILHO, O.C., GUYOT, J.-L., SEYLER, F., Mansur, W.J. (2010). Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data, *Hydrological Processes*, 2010, 24 (22), 3219-3236.

GOOGLE EARTH, 2010, Google Earth, Versão 5.0, Google Inc., Disponível em: http://www.google.com.br/intl/ptBR/earth/index.html#utm_source=hc_header&utm_medium=Homepage&utm_campaign=answer=40901

SILVA, J. S. (2010). Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações Hidrológicas. Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. 360p.

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*, v. 114, p. 2160-2181.

SILVA, R. C. V. et al. (2003). *Hidráulica Fluvial*. v. 1, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 305p.

TUCCI, C. E. M. (2001). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH. 952p.

VALS, 2011, Virtual ALtimetry Station, Versão 1.0.3, 05/2011, COCHONNEAU, G. CALMANT, S. Disponível em: http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php

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

VILLELA, S. M. e MATTOS, A. (1975). *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p.