

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

VARIABILIDADE TEMPORAL E SAZONAL DO REGIME HIDROLÓGICO NA BACIA DO RIO NAPO ESTIMADAS PELO SATÉLITE ALTIMÉTRICO ENVISAT

Leonardo Alves Vergasta¹; Liviany Pereira Viana¹; Joecila Santos da Silva²; Stéphane Calmant³;
Frédérique Seyler⁴

Resumo – Por mais de 10 anos a altimetria espacial é uma técnica utilizada para verificar as variações dos níveis das águas continentais tais como, mares interiores, lagos, rios e mais recentemente nos rios da bacia amazônica. O nível d'água é medido em relação a um referencial terrestre (elipsóide de referência) e com uma repetição de 10 a 35 dias conforme a órbita do satélite. Esses dados processados permitem complementar dados obtidos *in situ* por redes higrômétricas tradicionais. Para esse estudo foram processados os dados da missão ENVISAT. Utilizando-se um método original 3D (VALS Tool) para definir as estações virtuais, foram computadas e analisadas séries temporais de nível d'água e cotogramas de cada ponto de cruzamento da órbita do satélite com o rio individualmente. Os resultados apontam dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: a estiagem com início em dezembro e estendendo-se até março, e um período de cheia que envolve os meses de abril a junho. Os coeficientes de variação das cotas, denotam valores maiores à jusante enquanto à montante apresentam valores bem menores.

Abstract -For over 10 years, satellite radar altimetry has been a successful technique for monitoring the variation in elevation of continental surface water such as inland seas, lakes, rivers and more recently in the rivers of the Amazon basin. The surface water level is measured within a terrestrial reference frame with a repeatability varying from 10 to 35 days depending on the orbit cycle of the satellite orbit. Those data makes possible to complement the gauge data information. In this study we have processed the data of ENVISAT mission. Using an original method 3D (VALS Tool) for define the virtual stations , we computed and analyzed time series of water stage and the annual water level hydrograph for each individual water body. As result, the flood wave presents two defined periods during the year: Drought has occurred during the months of December and March, and the flood has occurred during April to June. The coefficients of variation of the water stage denote higher values downstream while the values much lower upstream.

Palavras-Chave – Altimetria Espacial, Bacia Amazônica, Rio Napo

¹ Universidade do Estado do Amazonas – UEA ; Bacharelado em Meteorologia; Escola Superior de Tecnologia – EST; Av.Darcy Vargas, 1200, 69065-020, Manaus - AM, Brasil e-mail: vergastinha@gmail.com; lpv.mtr@uea.edu.br

² Universidade do Estado do Amazonas – UEA; Centro de Estudos Superiores do Trópico Úmido – CESTU; Avenida Djalma Batista 3578, Flores, 69050-010, Manaus-AM, Brasil; e-mail: joecila.silva@ird.fr

³ 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

⁴ Institut de Recherche pour le Développement – IRD ; UMR ESPACE-DEV ; 500 rue Jean François Breton, 34093, Montpellier Cedex 5, France ; e-mail: frederique.seyler@ird.fr.

1. INTRODUÇÃO

Alimentados pelas águas advindas de precipitações pluviais ou da contribuição subterrânea os rios são cursos de água que transportam escoamentos concentrados com superfícies livres (Silva *et al*, 2003), fazendo assim, parte integrante do ciclo hidrológico por apresentarem a forma mais visível de escoamento superficial da bacia hidrográfica (Chistofolletti, 1981). A vazão é a principal grandeza que caracteriza um rio (Villela e Mattos, 1975) sendo variável no tempo e no espaço e tida como estocástica (Tucci, 2001) correspondente ao regime fluvial ou regime hidrológico do rio.

A vazão média anual na foz do rio Amazonas é de $238.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Ronchail *et al*, 2006) caracterizando assim a bacia Amazônica como a maior bacia hidrográfica do mundo que abrange uma área de drenagem de aproximadamente $6.869.000 \text{ km}^2$ (Silva *et al*, 2007). Está posicionada entre os paralelos de 5° de latitude norte e 20° de latitude sul, e entre os meridianos de 48° e 79° de longitude oeste. Por tratar-se de uma bacia transfronteiriça também está presente em território de outros países da América do Sul, ou seja, além do Brasil, ocupa a Bolívia, Peru, Equador, Venezuela, Colômbia e Guiana.

A bacia Amazônica possui um sistema de monitoramento hidrometeorológico onde é possível se obter dados pluviométricos, observações dos níveis de água em rios e medidas de vazões. Devido a sua grande extensão, a coleta de tais dados é insuficiente para se obter um estudo detalhado sobre a mesma, pois demandam um custo de instalação e manutenção altíssimo (Alsdorf, 2001a), apresentando problemas comuns na maioria das redes de monitoramento que inclui inadequado monitoramento, falhas nos dados e insuficiência crônica de financiamento, diferença de processamento e controle de qualidade e diferentes políticas de gestão de dados (WMO, 2003).

Diante do contexto a utilização de medidas estimadas por satélites altimétricos, observados sobre a superfície continental, se torna relevante, podendo estas serem obtidas em regiões extensas e remotas como as existentes na bacia Amazônica, uma vez que são caracterizadas em alcançar tais regiões de forma homogênea, contínua e freqüente, possuindo detalhamento espacial e temporal diferentes das redes de observações tradicionais (Calmant e Seyler, 2006) exemplificando na Figura 1 onde se apresenta a cobertura espacial da missão ENVISAT. É importante ressaltar também que, as medidas altimétricas complementam dados hidrológicos *in situ* em rios que não estão contidos no nível do território brasileiro, como o rio Napo, objeto deste estudo.

Neste estudo, busca-se aplicar a técnica de altimetria espacial a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Napo com base em dados altimétricos de nível de água obtidos de estações virtuais utilizando o algoritmo *Ice-1* do satélite ENVISAT.

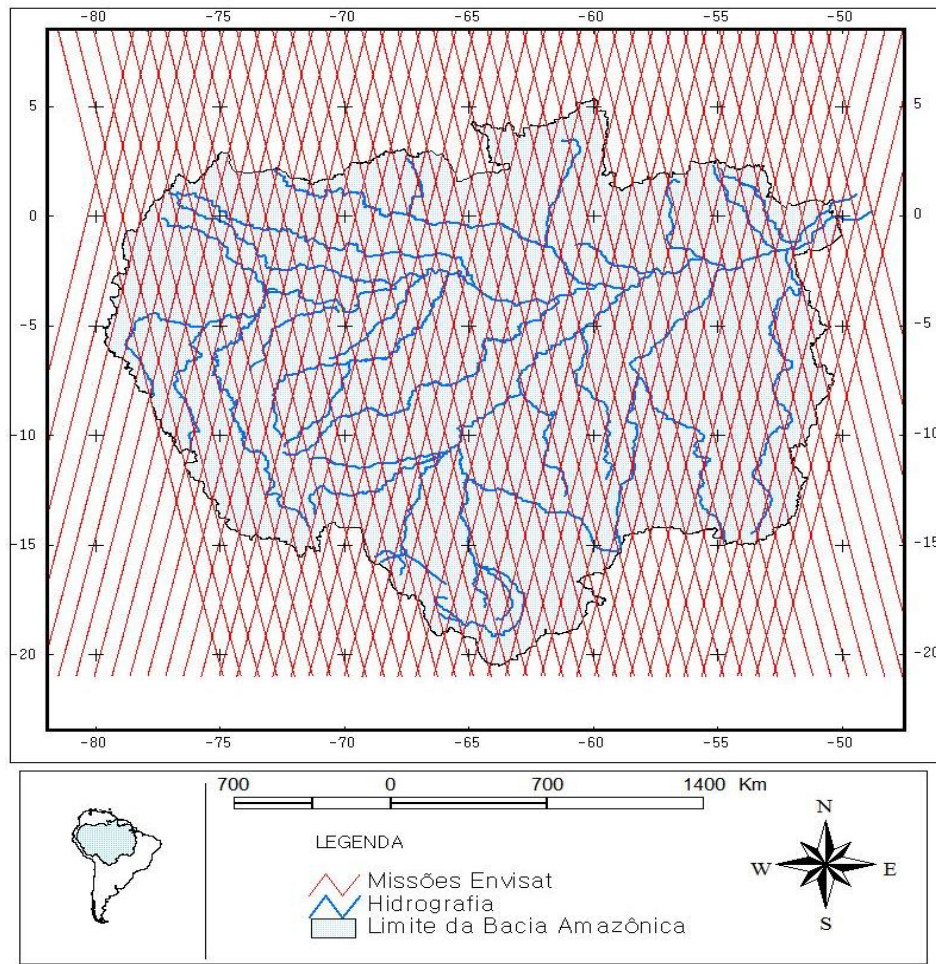


Figura 1 - Cobertura espacial da missão ENVISAT na bacia Amazônica. Mosaico de imagens JERS-1.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo envolve a bacia do rio Napo (Amazônia Peruana) que está situada entre 00° 10'N e 01°30'S, 75° 20' e 78°40'W, com uma altitude de 100 a 6.300m. (Laraque *et al.*, 2009). Envolve uma área variando entre 100 a 500 km² de extensão, distribuídos entre os países do Equador, Peru e Colômbia. A maior área da Bacia do Rio Napo pertence ao território Equatoriano que corresponde a aproximadamente 27.000 km², ou seja, equivale a 20% da parte central do país. É um afluente do Rio Amazonas, influenciando a dinâmica hidrológica do mesmo.

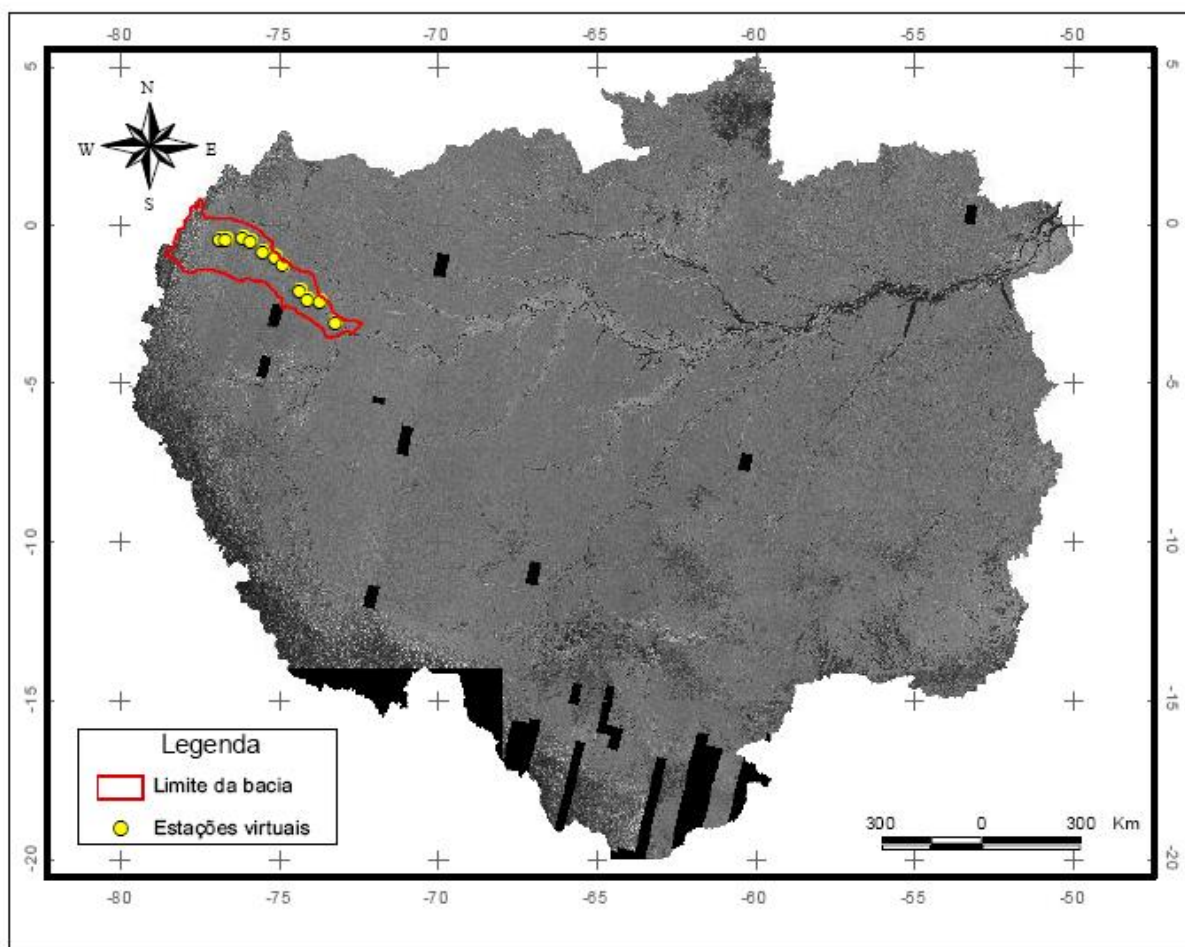


Figura 2 - Localização da bacia do rio Napo, objeto deste estudo, e estações virtuais (pontos em amarelo). Mosaico de imagens JERS-1 no período de cheia em segundo plano.

2.2. DADOS

2.2.1 Dados *in Situ*

Para este estudo utilizaram-se os dados da estação linimétrica de Bella Vista (3.487500° N, 73.084722° W), localizada próxima à foz do rio Napo, obtida no Ore-Hybam (*Observatoire de Recherche en Environnement – Contrôles géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion/altération et des transferts de matière dans le bassin de l'Amazonie*).

2.2.2 Dados Altimétricos

Os dados altimétricos foram adquiridos através do satélite *ENVironmental SATellite* (ENVISAT) lançado em março de 2002, que é considerado o maior satélite construído para observação da Terra. Seus dados facilitam o estudo de análise ambiental, mudanças climáticas

observadas e outras ciências Terrestres.

Para atender os objetivos científicos o ENVISAT é constituído por 10 instrumentos que lhe permitem uma análise rigorosa da atmosfera, continentes, oceanos e gelo do planeta (Wehr et Attema, 2001), incluindo um altímetro radar nadir (RA-2 ou *Advanced Radar Altimeter*). Objetivando assegurar um tempo de vida adicional, o satélite ENVISAT moveu-se para uma órbita a uma altitude média de 782 km em 22 de outubro de 2010, incluindo a modificação da resolução temporal que passou de 35 dias para 30 dias.

Os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records* – GDRs) são 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 padrão 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 padrão de tratamento das FOs do satélite ENVISAT (*Ocean*, *Ice-1*, *Ice-2* e *Sea-ice*) que permitem calcular a posição à 20Hz (i.e., 1/20^{ésimo} 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).

2.3 Elaboração das Estações Virtuais

Cada interseção de um traço altimétrico com o plano de água consiste numa estação virtual, sendo potencialmente possível obter uma série temporal da altura do plano de água. Para esse trabalho utilizou-se o programa VALS (*Virtual altimetry Station*) (VALS Tool, 2011), juntamente com o mosaico de imagens do *Google Earth* (Google Earth, 2010).

Uma seleção inicial dos dados altimétricos foi executada através de um polígono delimitado pelas latitudes e longitudes mínimas e máximas, utilizando-se o programa *Google Earth* com seu mosaico de imagens em segundo plano para identificação do corpo de água. Os dados selecionados são visualizados no programa VALS, mostrando o perfil hidrológico altimétrico ao longo do traço, onde cada linha corresponde a uma passagem do satélite permitindo-se refinar a seleção dos dados individualmente, excluindo-se as medidas indesejáveis.

Os dados para cada passagem do satélite permitem estimar as séries temporais de altura do nível da água, calculando-se a média e a mediana para cada ciclo. Adicionalmente, as alturas elipsoidais de nível de água das séries temporais serão convertidas em altitudes, utilizando-se o

modelo de ondulação geoidal EGM2008 desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008).

Tabela 1 – Identificação das Estações Virtuais

Estações Virtuais	Latitude (°)	Longitude (°)	Cota Mínima Média (m)	Cota Máxima Média (m)	Amplitude Média (m)
NAPO_007	-1,031	-75,089	162,11	164,53	2,41
NAPO_050	-0,433	-76,111	206,54	207,82	1,28
NAPO_0880	-2,476	-73,685	110,26	113,13	2,87
NAPO_093	-0,448	-76,654	231,22	232,39	1,17
NAPO_336	-3,434	-73,178	88,88	92,01	3,13
NAPO_422	-2,098	-74,321	126,19	128,99	2,79
NAPO_465	-2,356	-74,079	118,14	121,02	2,88
NAPO_508	-0,846	-75,483	176,05	177,71	1,66
NAPO_551	-0,579	-75,907	196,27	197,60	1,33
NAPO_594	-0,448	-76,833	239,96	240,92	0,96
NAPO_923_02	-3,483	-73,113	87,73	90,71	2,98
NAPO_923	-3,074	-73,203	95,53	98,49	2,96
NAPO_966	-1,287	-74,861	152,99	155,55	2,51

2.4 Elaboração das Séries Temporais de Níveis de Água

As séries temporais altimétricas foram obtidas utilizando-se as medianas das medidas altimétricas e associando-se uma dispersão à mediana, de forma a caracterizar a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Tal dispersão foi calculada pelo desvio absoluto da mediana:

$$DAM = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |H_i - H_{med}| \quad (1)$$

sendo n o número de medidas selecionadas, H_i a i éssima medida altimétrica selecionada, e H_{med} a mediana das medidas selecionadas.

2.5 Validação dos Dados Altimétricos

Considerando-se que nenhuma mudança hidrológica seja evidenciada entre o traço do satélite e a posição da estação linimétrica, a qualidade das séries temporais altimétricas foi analisada através da comparação direta por regressão linear das cotas altimétricas com as medidas da estação

linimétrica computando-se o valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*), definido pela Equação 2:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{1,i} - h_{2,i})^2}{n}} \quad (2)$$

sendo n o número de medidas, $H_{1,i}$ as medidas altimétricas e $H_{2,i}$ as medidas da régua linimétrica.

2.6 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 intuito de observar o comportamento das cotas ao longo do tempo de registros altimétricos (*i.e.*, 2002 a 2010) verificando-se a existência de periodicidade e estacionariedade, assim como, a possível existência de anomalias.

No sentido de facilitar a identificação de períodos sazonais foram elaborados 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 considerado 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 limítrofe para o período de estiagem.

Segundo Chow (1964) a variabilidade do regime fluvial pode ser examinada e detalhada com maior precisão atribuindo-se parâmetros estatísticos à representação gráfica. Para este estudo calculou-se a amplitude média da superfície da água obtida através dos dados resultantes do cotograma e o coeficiente de variação da cota altimétrica como parâmetro de distribuição auxiliar na avaliação da variabilidade do regime hidrológico em questão. A equação que define a amplitude média é dada por:

$$\bar{A} = \bar{H}_{\max} - \bar{H}_{\min} \quad (3)$$

sendo $\bar{A}$ a amplitude média da lâmina de água, $\bar{H}_{\max}$ a cota máxima do cotograma e $\bar{H}_{\min}$ a cota mínima do cotograma.

Para o cálculo do coeficiente de variação, primeiramente é necessário conhecer a média e o desvio padrão da série temporal. De acordo com Montgomery e Runger (2003) a medida do desvio padrão fornece informações complementares à informação contida na média avaliando a dispersão

do conjunto de valores. Para o cálculo do desvio padrão aplicou-se a Equação (4)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}} \quad (4)$$

sendo σ o desvio padrão da cota altimétrica, H_i a cota altimétrica, $\bar{H}$ a média das cotas altimétricas e n o numero de medidas.

O cálculo do coeficiente de variação por sua vez, foi expresso pelo inverso da média das cotas altimétricas pelo seu desvio padrão, obtido para cada série temporal ao longo do rio, assim tem-se a Equação (5).

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{H}} \quad (5)$$

sendo C_v o coeficiente de variação da cota altimétrica, σ o desvio padrão das cotas altimétricas e $\bar{H}$ a média das cotas altimétricas.

Visando à representação espacial da amplitude, foi confeccionado um mapa utilizando-se o sistema de informações geográficas ARCVIEW versão 3.3. Para tanto, estabeleceram-se intervalos de classe e, a estas, associadas cores que permitam uma visualização melhor dos resultados.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Estações Virtuais

Um conjunto de 13 estações virtuais (Tabela 1) fundamentado na análise dos dados altimétricos do rio Napo provenientes do satélite ENVISAT teve seus dados analisados separadamente para a geração das séries temporais altimétricas. A localização das estações virtuais pode ser observada na Figura 2.

De acordo com Roux *et al.* (2010) a metodologia para descrever a determinação de séries temporais de nível de água com dados altimétricos (*i.e.*, estação virtual) utilizadas nos estudos de hidrossistemas continentais, é uma seleção regular dos dados altimétricos cujo obedece a critério exclusivamente geográfico, isto é, um retângulo delimitado pelas latitudes e longitudes mínimas e máximas, sem qualquer critério para eliminação dos ruídos provenientes do tamanho da faixa imageada.

Uma metodologia manual descrita em Silva *et al.* (2010) e validada em Roux *et al.* (2010) e

Seyler *et al.* (2008), permite uma seleção tri-dimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade através do programa VALS (*Virtual ALtimetry Station*) utilizando o mosaico de imagens do Google Earth como segundo plano, apresentando diversos tratamentos da medida altimétrica, como a seleção individualizada de cada medida por ciclo e múltiplas correções do efeito de afastamento em relação ao nadir (*off-nadir*). A partir do emprego da ferramenta VALS, selecionam-se, com maior confiabilidade, os dados altimétricos sob qualquer plano de água para cada passagem do satélite.

Sob o traço 594 do satélite ENVISAT, é mostrado, na Figura 3, um exemplo de estação virtual utilizando-se o algoritmo *ice-1*. Na Figura 3a, o satélite ENVISAT cruza o rio Napo no sentido norte-sul. O perfil hidrológico medido pelo altímetro durante o trajeto do ENVISAT é mostrado na Figura 3b, onde cada linha representa um ciclo de passagem do satélite, e os pontos indicam as médias da medida do altímetro. 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 outro lado, 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. Na série temporal, observam-se bons resultados com pequenas dispersões nas medidas (Figura 3c).



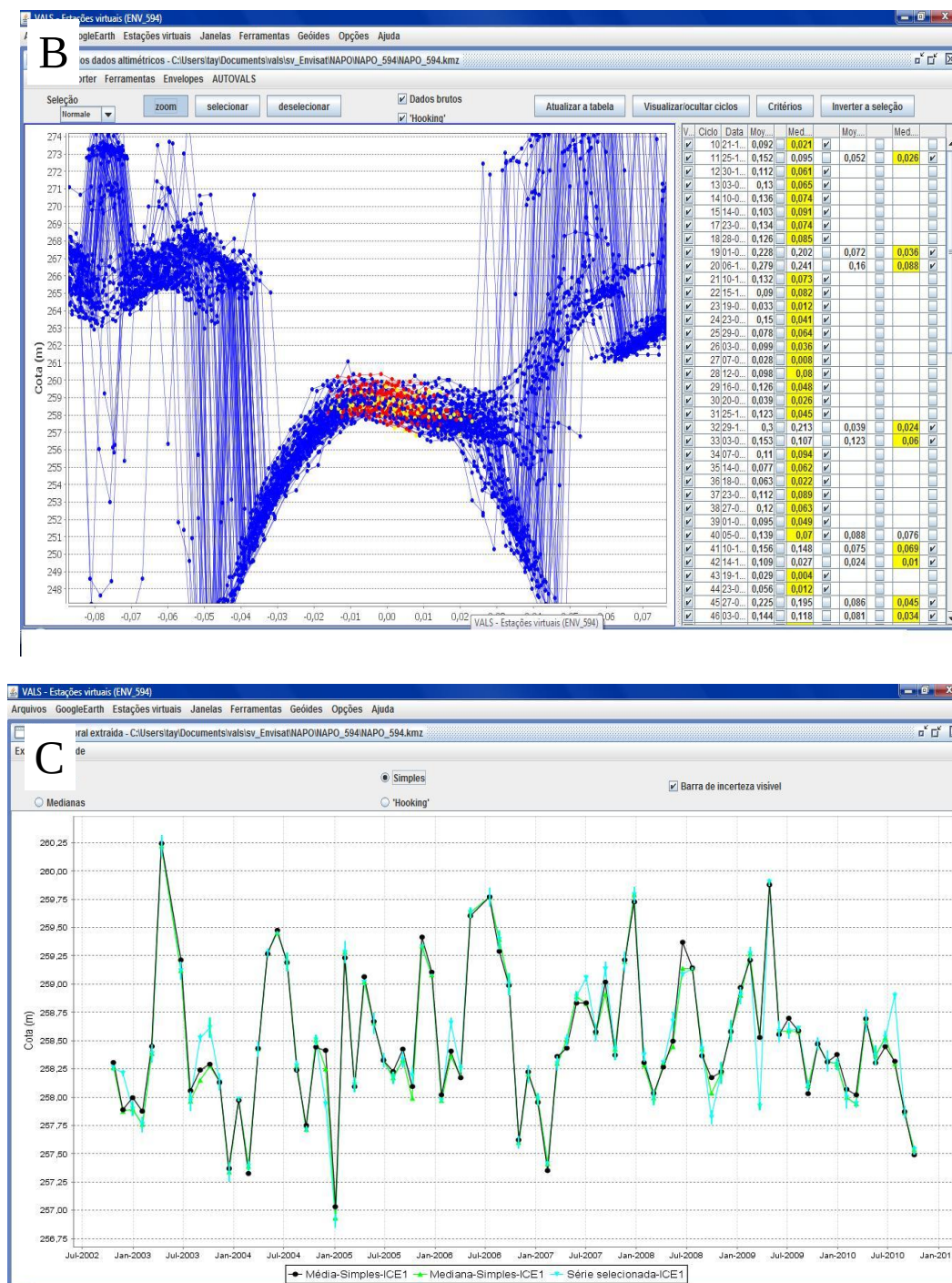


Figura 3 - Criação da estação virtual sobre o traço 594 do satélite ENVISAT através do programa VALS.

a) Trajetória do satélite ENVISAT no sentido norte-sul, traço 594 que cruza o rio Napo. Seleção dos dados altimétricos através do polígono amarelo. Mosaico de imagens do Google Earth em segundo plano.

b) Perfil hidrológico medido pelo altímetro RA-2 do satélite ENVISAT, em formato parabólico. Seleção normal dos dados altimétricos está em vermelho; seleção para aplicação da correção do efeito *off-nadir* está configurada em amarelo, enquanto as medidas com as correções efetuadas

aparecem em verde. À direita da figura, aparece o quadro com as médias e medianas para as seleções efetuadas para cada ciclo, com ou sem correção do efeito *off-nadir*, que podem ser escolhidas quando da seleção final dos dados altimétricos mostrados no Google Earth, à esquerda, em vermelho.

c) Série temporal altimétrica elaborada com o algoritmo *Ice-1*.

3.2 Validação dos Dados Altimétricos

O estudo de validação das séries temporais de nível de água foi conduzido utilizando-se a estação virtual NAPO_923_02 e a estação linimétrica Bella Vista (Figura 4). A estação linimétrica está localizada 3,2 km a jusante do traço 923 do satélite ENVISAT onde o rio Napo encontra-se anastomosado com a presença de duas ilhas. O RMS entre as diferenças de níveis de água é 39 cm, comparável com os valores encontrados nos estudos de validação em rios Amazônicos conduzidos por Silva *et al.* (2010) onde 70% das séries temporais elaboradas com dados do satélite ENVISAT apresentaram RMS inferior a 40 cm.

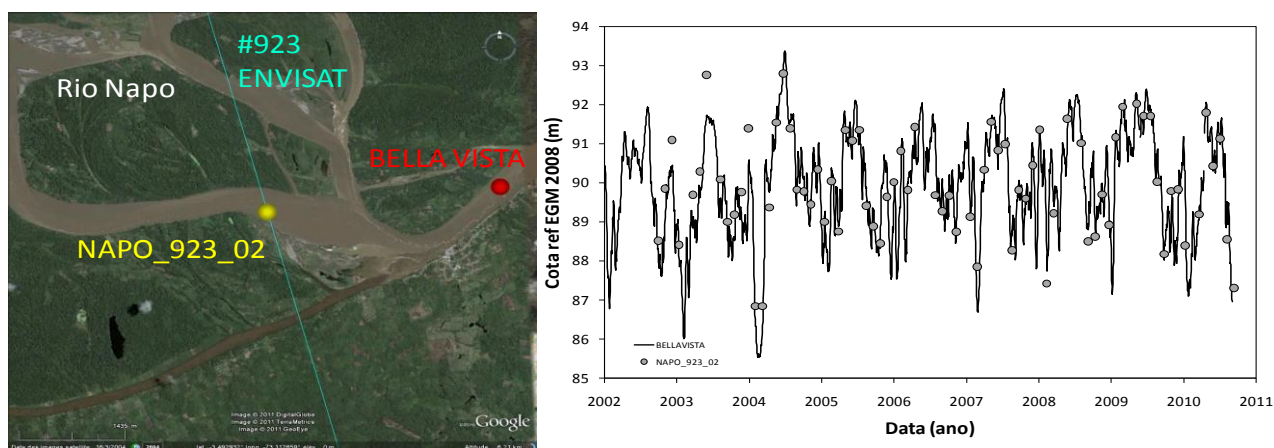
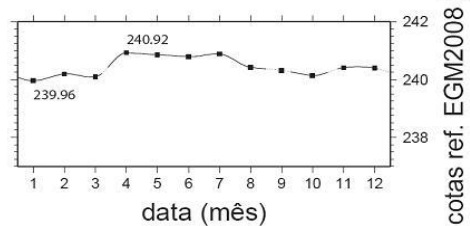


Figura 4 - Validação dos dados altimétricos para o rio Napo. Mosaico de imagens Google Earth, em segundo plano.

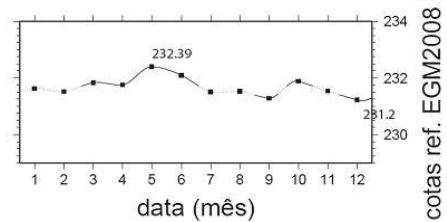
3.3 Regime Hidrológico do Rio Napo

Inicialmente, foram gerados 13 cotagramas (Figura 5), um para cada estação virtual, a partir da análise estatística das médias mensais. Os gráficos foram gerados de maneira que se tornasse possível observar o comportamento do nível de água ao longo do ano, de modo a avaliar a sazonalidade durante os oito anos selecionados para estudo (2002 a 2010). A delimitação dos períodos sazonais é de grande importância para aplicações de metodologias referentes à coleta de informações que estão relacionadas às diferenças hidrodinâmicas e hidro-morfológicas estabelecidas nos períodos de cheia e estiagem.

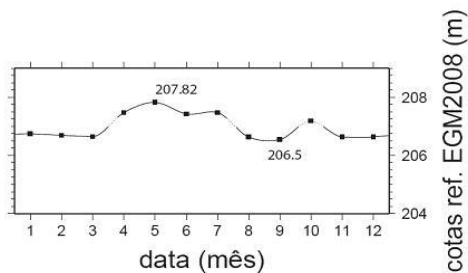
Cotagrama_Napo_594_EGM2008



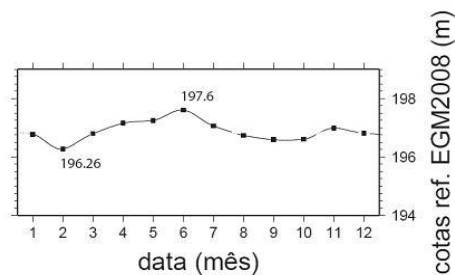
Cotagrama_Napo_093_EGM2008



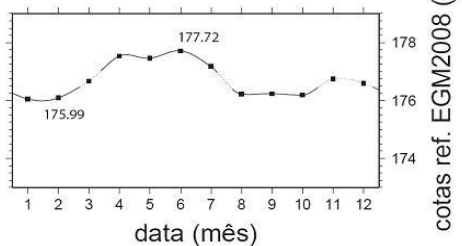
Cotagrama_Napo_050_EGM2008



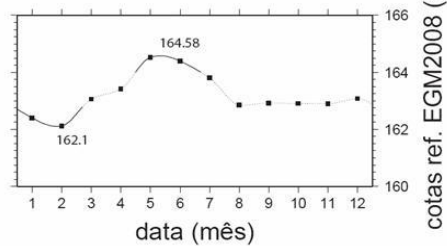
Cotagrama_Napo_551_EGM2008



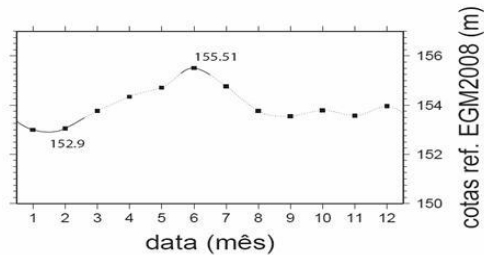
Cotagrama_Napo_508_EGM2008



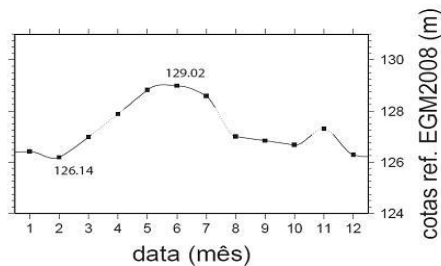
Cotagrama_Napo_007_EGM2008



Cotagrama_Napo_966_EGM2008



Cotagrama_Napo_422_EGM2008



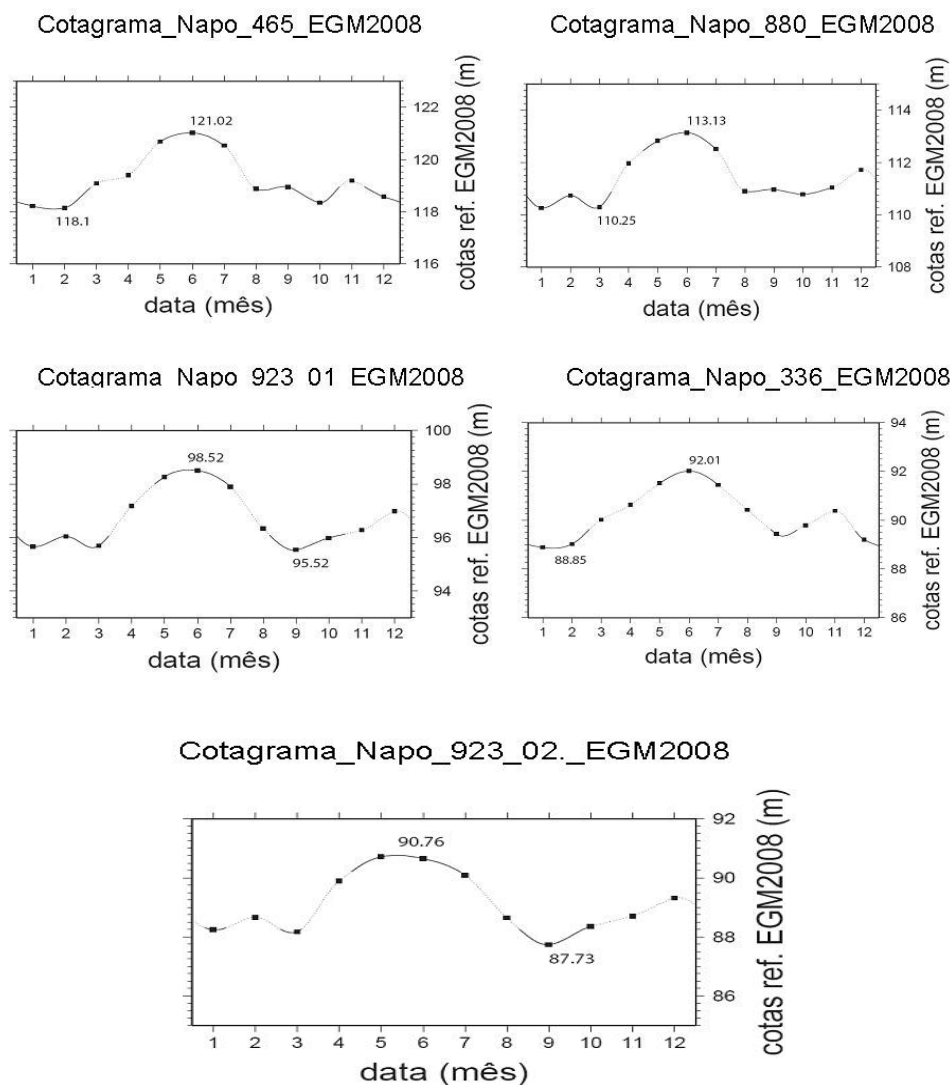


Figura 5 – Cotagrama das estações virtuais do rio Napo referentes ao período estudado onde são identificados os períodos de cheia e estiagem com um traçado contínuo e as cotas máximas e mínimas.

A partir da análise dos cotagramas foi possível observar que o rio Napo apresenta dois (2) períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: um período de estiagem que se inicia em dezembro podendo se estender até março, apresentando com mais frequência, as vazões mínimas nos meses de fevereiro e março, e um período de cheia suavizado, que abrange de abril a junho, onde as vazões máximas são encontradas mais frequentemente nos meses de maio e junho. Particularmente, pode-se observar que a ascensão do cotagrama de cheia é mais acelerada, enquanto a recessão diminui progressivamente na vazante, frequentemente com um ou mais picos de cheia menos acentuado no segundo semestre característico de regime equatorial (Rodier, 1964 e Molinier, 1997). Adicionalmente, é possível identificar que 69,23% tiveram o valor máximo anual no mês de junho, 23,07% em maio e 7,69% em abril, enquanto que 53,84% tiveram o valor mínimo anual no mês de fevereiro, 23,07% em setembro e 7,69% nos meses de janeiro, março e dezembro.

A Figura 6 mostra o mapa com distribuição da amplitude média dos cotogramas das 13 estações virtuais para o período de estudo, sendo descritas na Tabela 1. O regime hidrológico do rio Napo caracteriza-se por apresentar uma variabilidade significativa da lâmina de água (Tabela 1). Evidencia-se, na Figura 6, o crescimento da amplitude média em direção à foz, onde a primeira estação virtual NAPO_594, situada no Equador, tem amplitude média de 0,96 m, a menor dentre todas as estações, enquanto a última estação, NAPO_923_02, próximo à foz, tem amplitude média de 3,02 m, a maior dentre todas as estações situadas no rio Napo.

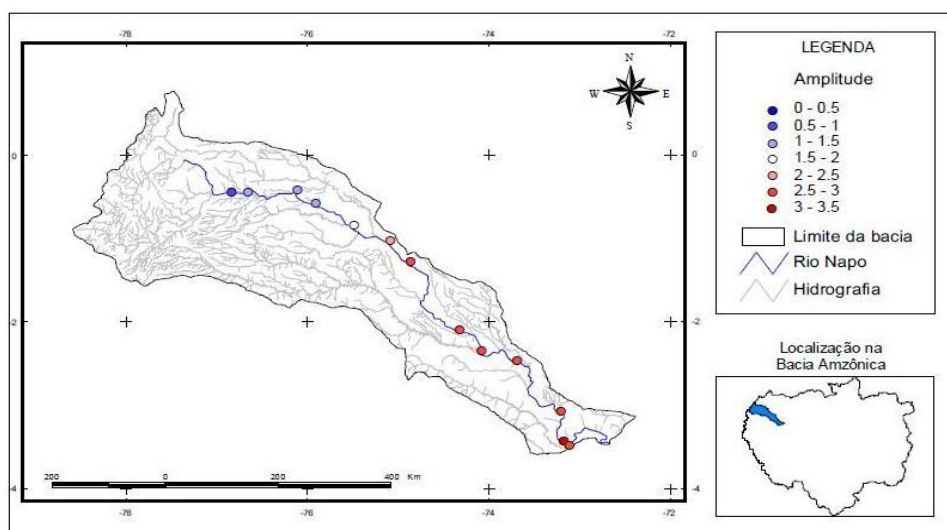


Figura 6 - Distribuição da amplitude média das estações virtuais com dados altimétricos do satélite ENVISAT no rio Napo

Na Tabela 2 apresenta-se para as 13 estações virtuais estudadas o número de ciclos selecionados, a média das cotas altimétricas, o desvio padrão das cotas e o coeficiente de variação das cotas.

Tabela 2 – Estatísticas de média, desvio padrão e coeficiente de variação das cotas para as 13 estações virtuais estudadas

Nome da Estação	Média(m)	Desvio Padrão (m)	Coeficiente de Variação
NAPO_594	241,39	0,63	0,26
NAPO_093	232,63	0,68	0,29
NAPO_050	207,95	0,73	0,35
NAPO_551	197,82	0,70	0,36
NAPO_508	177,67	0,96	0,54
NAPO_007	164,04	0,86	0,53
NAPO_966	154,90	0,92	0,60
NAPO_422	128,32	1,44	1,12
NAPO_465	120,18	1,33	1,11
NAPO_0880	112,37	1,35	1,20
NAPO_923_01	97,57	1,34	1,38
NAPO_336	91,25	1,41	1,55
NAPO_923_02	89,92	1,34	1,49

A partir da análise da Tabela 2 é possível observar que os coeficientes apresentam valores baixos à montante aumentando gradualmente em direção à jusante. Visto que, com o aumento da área de drenagem, a contribuição combinada dos diversos tributários das margens direita e esquerda e o efeito regulador das zonas de inundação, a oscilação tende a apresentar um leve amortecimento e a amplitude entre os picos de descida e subida torna-se maior.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, busca-se aplicar a técnica de altimetria espacial a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Napo com base em dados altimétricos de nível de água obtidos de estações virtuais utilizando o algoritmo *Ice-1* do satélite ENVISAT.

Com a utilização dos dados altimétricos da missão ENVISAT foi possível analisar a variação espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Napo, acrescido de inúmeras medidas que contribuíram para produzir as séries temporais e os cotagramas, mesmo não havendo a aquisição dos dados *in situ*. O rio Napo apresenta dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: um período de estiagem que se inicia em dezembro podendo se estender até março, e um período de cheia suavizado, que abrange abril a junho. A variabilidade do regime fluvial pode ser examinada e detalhada com maior precisão atribuindo-se parâmetro estatístico, neste contexto, conferiu-se que os coeficientes de variação de cotas demonstraram valores menores a montante enquanto a jusante os valores tenderam a aumentar, isto é, ocorre devido à topografia da região influenciada pelos elementos meteorológicos, hidrológicos e morfológicos predominantes. Desta forma, os dados estimados pelo satélite altimétrico ENVISAT mostraram-se eficientes para alcançar as medidas em regiões remotas e com ausência de dados *in situ*, como o rio Napo, amplificando os conhecimentos sobre o estudo dos níveis de água da bacia Amazônica, assim com suas variações espaciais e sazonais.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica concedida ao primeiro autor. Ao *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d'Études en Geophysique 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 a pesquisa. Ao observatório de pesquisa para o meio-ambiente (ORE) HYBAM (Controles geodinâmico, hidrológico e biogeoquímico da erosão/alteração e da transferência de matérias na bacia amazônica), pelos dados linimétricos. Ao *Global Rain Forest Mapping – GRFM*, pelas imagens do satélite JERS-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSDORF, D. E *et al.* (2001). Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. *Geophysical Research Letters*. 28(14):2671-2674.

ARCVIEW (2002), *ArcView GIS: Geographic Information System*, versão 3.3. Enviromental Systems Research Institute - ESRI.

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

CHOW, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology*. New York: MacGraw-Hill Book Co.

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: 85-216-1360-1

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

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: 85-216-1360-1

PAVLIS, N. K. *et al.* (2008). Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. Em: *Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union*, Vienna, Austria, 13-18/04/2008. Disponível em: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html

RONCHAIL, J., GUYOT, J. L., VILLAR, J. C. E., FRAIZY, P., COCHONNEAU, G., OLIVEIRA, E., FILIZOLA, N., ORDENEZ, J. J., 2006, Impact of the Amazon tributaries on major floods at Óbidos, Em: *Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Climate Variability and Change—Hydrological Impacts*, pp. 1-6. Cuba, November 2006. IAHS Publ. 308

ROUX, E. *et al.* (2010). Producing time-series of river water height by means of satellite radar altimetry – Comparison of methods, *Hydrological Sciences Journal/ Journal Des Sciences*

SILVA, R. C. V. *et al.* (2003). *Hidráulica Fluvial*. v. 1, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. ISBN: 85-285-0059-4

SILVA, J. S. *et al.* (2007). Variações Temporais de Níveis d'água na bacia do rio Negro Estimadas pelo Satélite Altimétrico Envisat.

SILVA, J. S. *et al.* (2008). ERS-ENVISAT Altimetry over the Amazon basin : Quality assessment, applications and perspectives. Remote Sensing of Environment. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

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

SILVA, J. S., 2010, *Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações Hidrológicas*. Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. ISBN: 978-613-1-52979-5

TUCCI, C. E. M. (org), 2001, *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2 ed., Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH.

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

VALS Tool, 2011, *Virtual ALtimetry Station*, Versão 1.0, 03/2011, COCHONNEAU, G. e CALMANT, S.

Disponível em: <http://www.ore-hybam.org/index.php/eng/Software>

VILLELA, S. M.; MATTOS, A., 1975, *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. ISBN: 75-0386

UNEP (2004). Barthem, R. B., Charvet-Almeida, P., Montag, L. F. A. and Lanna, A.E. Amazon Basin, GIWA Regional assessment 40b. University of Kalmar, Kalmar, Sweden.

WMO – World Climate Organization (2003). Report of the GCOS/GTOS/HWRP Expert Meeting

on Hydrological Data for Global Studies. K.D. Harvey and W. Grabs (Eds). Held in Toronto, Canada, 18-20 November 2002 Report GCOS 84, Report GTOS 32, WMO/TD – N°. 1156.