

CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE SAZONAL DO REGIME HIDROLÓGICO DO RIO ORINOCO POR MEIO DOS DADOS ALTIMÉTRICOS DO SATÉLITE JASON-2

Data de aceite: 02/05/2023

Mateus Ferreira de Oliveira

Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia da Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Escola Superior de Tecnologia – EST
Manaus/AM, Brasil.

Vinicius dos Santos Albuquerque

Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfªÁgua, Universidade do Estado do Amazonas - UEA, Escola Normal Superior - ENS
Manaus/AM, Brasil.

Tainá Sampaio Xavier Conchy

Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia da Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Escola Superior de Tecnologia – EST
Manaus/AM, Brasil.

Luisa Gonçalves de Feitas

Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia da Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Escola Superior de Tecnologia – EST
Manaus/AM, Brasil.

Joecila Santos da Silva

Professora da Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Escola Superior de Tecnologia – EST
Manaus/AM, Brasil.

Stéphane Calmant

Institut de Recherche pour le Développement – IRD, UMR 5566 LEGOS CNES/CNRS/IRD/UT, 14
Toulouse, France.

RESUMO: Realizar o monitoramento hidrológico na bacia amazônica é uma tarefa complexa devido a suas grandes extensões hidrográficas. Somado a isso, existe a dificuldade para obtenção dos dados hidrológicos nessa região por conta da existência de áreas de difícil acesso e a baixa quantidade ou inexistência de estações físicas de monitoramento fluviométrico *in situ*. Nesse sentido, o emprego da técnica de altimetria espacial, por meio dos satélites altimétricos que possuem cobertura global e ampla resolução espacial, auxilia na celeridade e melhora na qualidade das informações hidrológicas da Rede Hidrometeorológica Nacional. Portanto, este estudo tem como

objetivo caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Orinoco através da aplicação da técnica de altimetria espacial. Para tal, serão empregados os dados altimétricos de nível de água, obtidos por meio de estações virtuais com o uso do satélite Jason-2, cujo período de funcionamento compreende aos anos de 2008 a 2016. Os resultados deste estudo mostram que as 9 séries temporais e hidrogramas anuais de nível de água do rio Orinoco possuem variabilidade no regime hidrológico, caracterizado por possuir ascensão mais rápida que recessão, onde o período de seca se deu entre janeiro e março e as cheias entre julho e setembro. Em relação à amplitude média, detectou-se valores maiores a montante, enquanto os valores mínimos estavam localizados a jusante. Tais resultados certificam a utilização dos dados altimétricos do Jason-2 como um meio de medir e monitorar a sazonalidade deste rio transfronteiriço, servindo como base para estudos hidrológicos.

PALAVRAS-CHAVE: Altimetria espacial; Regime hidrológico; Rio Orinoco.

ABSTRACT: Carrying out hydrological monitoring in the Amazon basin is a complex task due to its large hydrographic extensions. Added to this, there is a difficulty in obtaining hydrological data in this region due to the existence of areas with difficult access and the low number or inexistence of physical stations for in situ fluvimetric monitoring. In this sense, the use of the spatial altimetry technique, through altimetric satellites that have global coverage and wide spatial resolution, helps to speed up and improve the quality of hydrological information in the National Hydro-meteorological Network. Therefore, this study aims to characterize and analyze the spatial and seasonal variability of the hydrological regime of the Orinoco River through the application of the spatial altimetry technique. To this end, the altimetric data of water level will be used, obtained through virtual stations using the Jason-2 satellite, whose operating period covers the years 2008 to 2016. The results of this study show that the 9 time series and annual hydrographs of the water level of the Orinoco River show variability in the hydrological regime, characterized by having a faster rise than recession, where the dry period took place between January and March and the floods between July and September. Regarding the mean amplitude, higher values were detected upstream, while the minimum values were located downstream. These results certify the use of Jason-2 altimetric data as a means of measuring and monitoring the seasonality of this transboundary river, serving as a basis for hydrological studies.

KEYWORDS: Spatial altimetry; Hydrological regime; Orinoco River.

1 | INTRODUÇÃO

O rio Orinoco é o segundo maior rio da América do Sul e está classificado em terceiro lugar no mundo em relação ao despejo de água nos oceanos. Sua bacia cobre uma área de 990.000 km² (BERNER; BERNER, 1987), dos quais 70% dele estão na Venezuela e 30% na Colômbia (LEWIS; SAUNDERS, 1989). O comprimento do canal do rio Orinoco é de aproximadamente 2.140 km (SILVA LEÓN, 2005), enquanto a vazão média anual estimada na foz do rio é de aproximadamente 37.600 m³/s (LARAQUE *et al.*, 2013), tais valores podem ser obtidos por meio da coleta e interpretação de dados hidrometeorológicos, para então entender o regime hidrológico do rio Orinoco.

Todavia, ainda há dificuldade para a realização da coleta de dados hidrometeorológicos *in situ* em rios devido a fatores como sistema de monitoramento com custo de instalação elevado, grande quantidade de ilhas e áreas de difícil acesso, troca de dados entre os países e pouca iniciativa das agências reguladoras em instalar estações hidrométricas (MARINHO, 2019). Por conta destas condições, uma das soluções encontradas é a utilização das técnicas de sensoriamento remoto que quando associadas aos dados *in situ* permitem um melhor entendimento de processos hidrológicos (FILIZOLA *et al.*, 2011).

Com isso, a utilização da altimetria radar para medição do nível dos rios suplantou as dificuldades relacionadas à falta de informações hidrológicas nas bacias hidrográficas, tornando o estudo mais preciso e coeso, pois, permite a observação com detalhes tanto espacial quanto temporal do sistema hidrológico como um todo, em especial as localidades de difícil acesso (DAMASCENO, 2017; SILVA, 2010).

Diante do exposto, este estudo objetiva aplicar a técnica de altimetria espacial a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Orinoco com base em dados altimétricos de nível de água, obtidos através, de estações virtuais utilizando o satélite Jason-2, cujo período de funcionamento se estende de 2008 a 2016, com tempo de revisita de 10 dias e 303 ciclos temporais.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A Bacia do Orinoco está situada no Hemisfério Norte e cobre uma área de cerca de 1×10^6 km² (SILVA LEON, 2005) localizada na parte nordeste da América do Sul, entre 2° e 9° N e 75° e 62° O. A nascente do Orinoco está localizada a 1.047 m no Cerro Delgado Chalbaud (CARBONELL, 1998), o rio possui comprimento total de cerca de 2.140 km (Silva Leon, 2005), e sua bacia compreende três zonas fisiográficas principais: Cordilheira dos Andes e do Caribe; a área de planície aluvial de várzea, localmente chamada de 'Llanos'; e o escudo da Guiana Pré-cambriana (Figura 1).

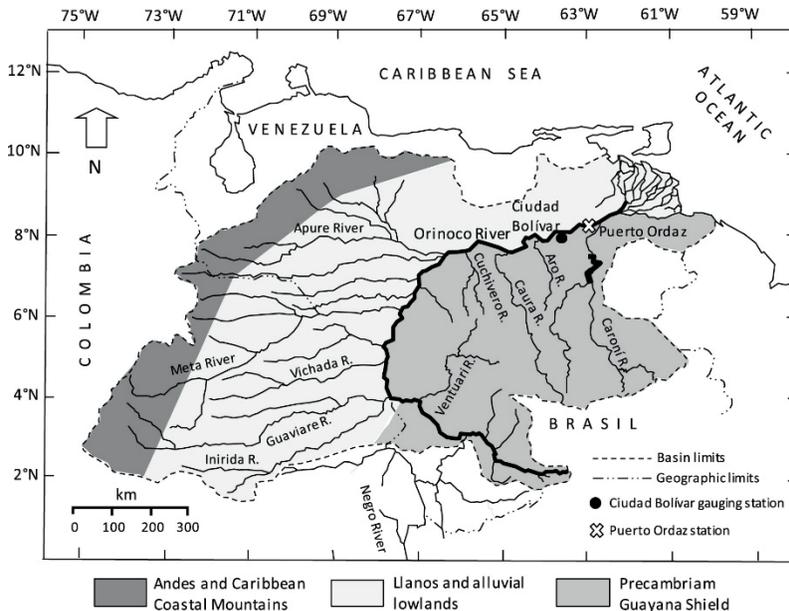


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Orinoco

Fonte: Laraque *et al.*, 2013

O rio Orinoco apresenta características mistas entre padrões traçados e levemente sinuosos. O canal principal traçado é desenvolvido em zonas de expansão de fluxo, principalmente localizadas a jusante da confluência do rio Apure, que são caracterizadas por numerosos bancos de areia e ilhas que dividem o fluxo em vários canais (LOPEZ; PEREZ, 1999).

2.2 Dados Altimétricos

Neste trabalho utilizaram-se os dados do satélite Jason-2, empregando-se o algoritmo *standard* de tratamento de FO *Ice-1*. Os dados altimétricos fazem parte da Rede de Monitoramento Altimétrico do Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHASA) disponíveis na base de dados Hydroweb, da plataforma THEIA-CNES (<http://hydroweb.theia-land.fr/?lang=en&>).

2.3 Elaboração das Estações Virtuais

A elaboração da estação virtual (EV) é fundamentada na convergência de um traço do satélite altimétrico com os corpos hídricos na superfície terrestre para assim se obter uma série temporal da altura do plano de água (SILVA, 2010; CALMANT, 2006). Para a criação das EVs foi utilizada a metodologia descrita por Silva *et al.* (2010), onde os dados altimétricos foram selecionados por meio do programa *Multi-mission Altimetry Processing Software* (MAPS, 2018) plotados através de um mosaico de imagem em segundo plano do programa *Google Earth* (Google Earth, 2020). Através do modelo de ondulação geoidal

EGM2008, desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008), as alturas elipsoidais de nível de água, foram convertidas em alturas geoidais.

2.4 Caracterização do regime hidrológico

A princípio, para a caracterização do regime hidrológico, foi obtida a representação gráfica das informações hidrológicas através de séries temporais com a altura da lâmina da água, a fim de verificar o comportamento das cotas ao decorrer dos anos de registro do satélite, examinando a presença de regularidade e estacionariedade, assim como, a possível ocorrência de anomalias. Para a montagem dos gráficos, foram elaborados cotogramas para cada série temporal por meio do cálculo das médias mensais anuais das cotas altimétricas, conforme a metodologia proposta por Bittencourt e Amadio (2007).

Obtiveram-se ainda valores de amplitude média da superfície da água calculados conforme a Equação 1. Estes resultados foram obtidos com base nos dados dos cotogramas, sendo utilizados na avaliação da variabilidade do regime hidrológico em questão.

$$\bar{A} = \bar{H}_{m\acute{a}x} - \bar{H}_{m\grave{i}n} \quad (1)$$

onde \bar{A} é a amplitude média, $\bar{H}_{m\acute{a}x}$ a cota máxima do cotograma e $\bar{H}_{m\grave{i}n}$ a cota mínima do cotograma.

3 | RESULTADOS

Os dados altimétricos procedentes do satélite Jason-2 resultaram do conjunto de 09 estações virtuais, listadas e descritas na Tabela 1 juntamente com suas respectivas cotas máximas e mínimas e amplitude média. Analisaram-se os dados, isoladamente, para a criação das séries temporais altimétricas. A localização das estações virtuais pode ser observada na Figura 1.

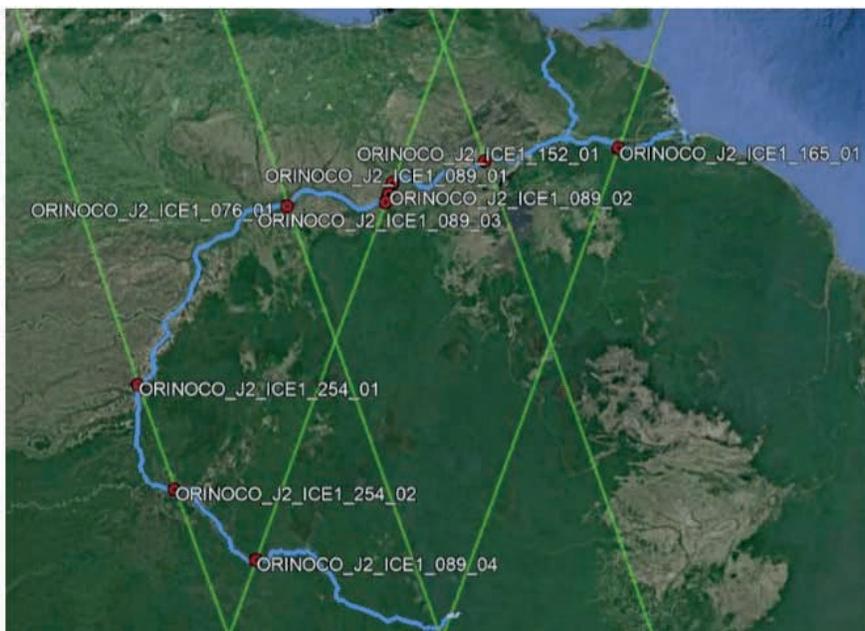


Figura 1 - Localização das Estações Virtuais no rio Orinoco. Pontos em vermelho correspondem às EVs e traços em verde representam a passagem do satélite Jason-2.

Nome da estação virtual	Latitude (°)	Longitude (°)	Total de Ciclos	Cota Mínima (m)	Cota Máxima (m)	Amplitude (m)	Distância da Foz (km)
ORINOCO_J2_ICE1_165_01	8°29'9,60"N	61°26'7,80"O	215	2,77	4,67	2,40	93
ORINOCO_J2_ICE1_152_01	8°17'59,28"N	63°13'32,16"O	90	68,06	83,23	15,17	329
ORINOCO_J2_ICE1_089_01	8°0'41,04"N	64°26'39,84"O	300	10,01	22,01	12,00	492
ORINOCO_J2_ICE1_089_02	7°51'59,76"N	64°29'50,28"O	260	11,42	23,28	11,86	526
ORINOCO_J2_ICE1_089_03	7°45'35,28"N	64°32'11,04"O	227	12,10	25,08	12,98	545
ORINOCO_J2_ICE1_076_01	7°42'7,56"N	65°50'30,48"O	284	20,39	32,44	12,05	715
ORINOCO_J2_ICE1_254_01	5°20'30,12"N	67°49'10,20"O	301	58,80	68,80	10,00	1134
ORINOCO_J2_ICE1_254_02	3°57'51,84"N	67°19'26,76"O	282	83,04	88,30	5,27	1342
ORINOCO_J2_ICE1_089_04	3°2'46,32"N	66°14'17,52"O	227	101,71	105,33	3,62	1541

Tabela 1 – Discriminação das estações virtuais e amplitudes médias calculadas.

Através dos dados da Tabela 1 pode-se observar que à medida que o curso do rio se distancia da foz, há a redução dos valores da amplitude média, onde a estação virtual

ORINOCO_J2_ICE1_152_01, distante 329 km da foz, tem amplitude de 15,17 m, enquanto a última estação, ORINOCO_J2_ICE1_089_04, distante 1541 km da foz, tem amplitude de 3,62 m.

Os cotogramas elaborados para cada EV estão ilustrados na Figura 2, eles foram gerados intencionando analisar o comportamento do nível de água ao longo do ano, procurando avaliar a sazonalidade no intervalo de atividade do Jason-2, entre os anos de 2008 e 2016.

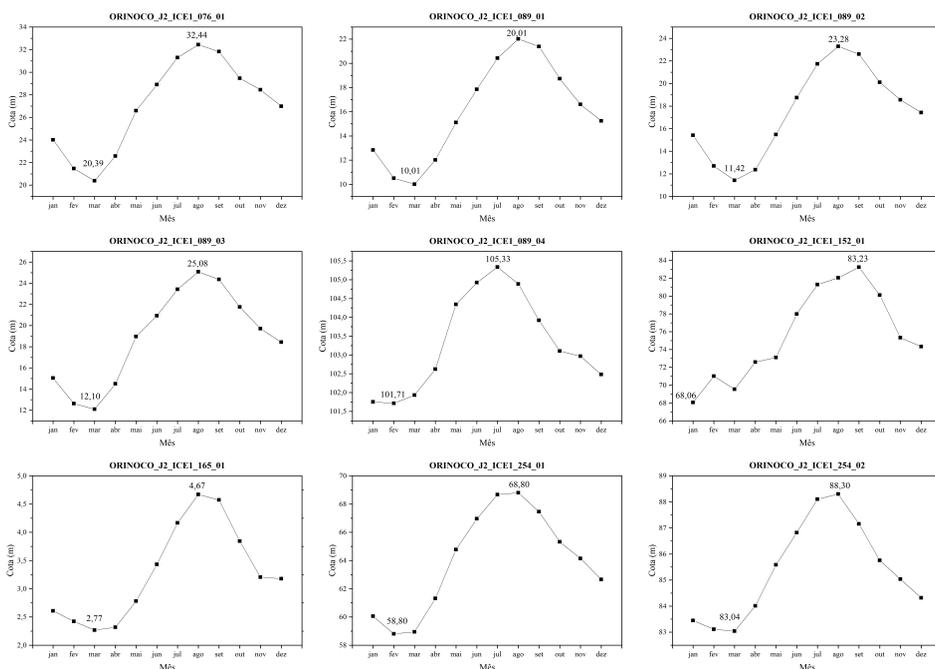


Figura 2 - Cotogramas das estações virtuais do rio Orinoco com identificação das cotas mínimas e máximas.

Na Figura acima pode-se identificar que o rio Orinoco apresenta dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: (i) um período de vazante que se inicia em setembro podendo se estender até março, apresentando regularmente as cotas mínimas no mês de março; e (ii) um período de cheia, que abrange de abril a agosto, onde as vazões máximas são encontradas com maior frequência no mês de agosto. Tais resultados corroboram com Weibezahn (1990), que declara que a oscilação da zona de convergência intertropical (ZCIT) determina o regime pluvial e o clima da bacia do Orinoco, produzindo um clima sazonalmente tropical que compreende duas estações: uma chuvosa (maio a novembro) e uma seca (dezembro a abril).

Warne *et al.* (2002) afirmam ainda que os fluxos máximos ocorrem entre julho e

setembro e o pico de inundação é comumente registrado no final de agosto ou início de setembro. Fluxos mais baixos ocorrem entre fevereiro e abril, e o fluxo mínimo é observado durante o final de março e início de abril. Em concordância aos autores, através da Figura 2, verifica-se que os dados obtidos através da montagem dos cotogramas estão de acordo com a literatura, sendo possível identificar que 77,78% dos cotogramas tiveram o valor máximo anual no mês de agosto e 11,11% em julho e setembro, enquanto que 66,67% tiveram o valor mínimo anual no mês de março, 22,22% em fevereiro e 11,11% em janeiro.

4 | CONCLUSÃO

A avaliação da variabilidade sazonal do nível de água do rio Orinoco, na bacia hidrográfica do Orinoco, foi analisada por meio da utilização dos dados do satélite altimétrico Jason-2 e do programa MAPS, que permitiu a interpretação e seleção dos dados altimétricos, obtendo-se as medidas necessárias para a montagem dos cotogramas que possibilitaram a investigação do regime hídrico do Rio Orinoco.

O regime hidrológico visualizado através dos dados coletados permitiram inferir que o rio demonstrou ser bimodal, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano, com ascensões e recessões assimétricas ao longo do rio. Ressalta-se que diferentemente dos cotogramas das outras estações virtuais, o referente ao ORINOCO_J2_ICE1_152_01 possuiu comportamento diferente das outras séries, além de terem sido obtidos uma quantidade de dados altimétricos menores devido à presença de ilha e áreas molhadas por onde passa o satélite.

Foi possível ainda evidenciar os períodos que compreendem a vazante e a cheia, cujos picos ocorrem com maior frequência nos meses março e agosto, respectivamente. Salienta-se que o uso dos dados altimétricos do satélite Jason-2 são apropriados para regiões complexas, rios transfronteiriços e de difícil acesso, bem como escassez de dados *in situ*, complementando e otimizando a rede de estudos hidrológicos.

AGRADECIMENTOS

O Presente trabalho foi realizado com apoio do Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHSA) que disponibilizou os dados das estações virtuais do satélite JASON 2. Agradecimentos à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES e do Mestrado Profissional, em Rede Nacional, em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pelo apoio financeiro em forma de bolsa, disponibilizada para os autores Mateus Ferreira de Oliveira e Vinicius dos Santos Albuquerque.

REFERÊNCIAS

BERNER, E.; BERNER, R. *The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.

BITTENCOURT, M. M.; AMADIO, S. A. Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em área de várzea do rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus. *Acta Amazônica*, v. 37, p. 303-308, 2007.

CALMANT, S.; SEYLER, F. Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*, v. 338. pp. 1113-1122, 2006.

CARBONELL LM. Expedicion 51: Descubrimiento de las fuentes del Orinoco. In: LOPEZ S. J. L.; SAAVEDRA C. I. I., DUBOIS M. M. *El Rio Orinoco Aprovechamiento Sustentable*, Instituto de Mecanica de Fluidos. Facultad de Ingenieria. Universidad Central de Venezuela, 1998.

DAMASCENO, J. A. *Monitoramento hidrológico da bacia do rio madeira por altimetria espacial*. 2017. 113p. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente). Instituto de Pesquisas da Amazônia, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2017.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J.-L.; WITTMANN, H.; MARTINEZ, J.-M.; OLIVEIRA, E. The Significance of Suspended Sediment Transport Determination on the Amazonian Hydrological Scenario. In: *Sediment Transport in Aquatic Environments*, InTech, Rijeka, 2011.

LARAQUE, A.; CASTELLANOS, B.; STEIGER, J.; LÓPEZ, J. L.; PANDI, A.; RODRIGUEZ, M.; ROSALES, J.; ADÈLE, G.; PEREZ, J.; LAGANE, C. A comparison of the suspended and dissolved matter dynamics of two large inter-tropical rivers draining into the Atlantic Ocean: the Congo and the Orinoco. *Hydrological Process*, v. 27, p. 2153–2170, 2013.

LEWIS, W. M.; SAUNDERS, J. F. Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. *Biogeochemistry*, v. 7, p. 203–240, 1989.

LÓPEZ, J. L., PEREZ-HERNANDEZ D. Some Morphological Aspects of the Orinoco River. *IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Genova, 1999.

MAPS, 2018. *Multi-mission Altimetry Processing Software*, Versão 2.2, 2018.

MARINHO, R. R. *Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no arquipélago de anavilhanas, rio Negro – Amazonas, brasil*. 2019. 160p. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente), Universidade do Estado do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente – CLIAMB, Manaus, 2019.

PAVLIS, Nikolaos. K.; HOLMES, Simon. A.; KENYON, Steve. C.; FACTOR, John. K. 2012. *An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*, 2008.

SILVA LEÓN, G. La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y balance hídrico. *Revista Geográfica Venezolana*, v. 46, p. 75–108, 2005.

SILVA, J. S. *Altimetria Espacial Aplicada aos Estudos de Processos Hídricos em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica*. 2010. 279p. Tese (Doutorado em Ciências), UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; ROTUNNO FILHO, O. C.; COCHONNEAU, G.; MANSOUR, W. J. (2010). Water levels in the Amazon Basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*. v. 114, pp. 2160-2181, 2010.

WARNE, A. G.; MEADE, R. H.; WHITE, W. A.; GUEVARA, E. H.; GIBEAUT, J.; SMYTH, R. C.; ASLAN, A.; TREMBLAY, T. Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. *Geomorphology*, v. 44, p. 273–307, 2002.

WEIBEZAHN, F. H. Water chemistry and suspended solids in the upper and middle Orinoco River. In: WEIBEZAHN, F.H., ALVAREZ, H., LEWIS, W.M. (Eds.), *The Orinoco River as an Ecosystem*. Impresos Rubel CA, Caracas, 1990.