

## **A SECA DE 2005 NA BACIA AMAZÔNICA MONITORADA PELO SATÉLITE ALTIMÉTRICO ENVISAT**

*Aline Corrêa de Sousa<sup>1\*</sup> & Joecila Santos da Silva<sup>2</sup> & Stéphane Calmant<sup>3</sup> & Frédérique Seyler<sup>4</sup> & Phillipe Arantes Pereira<sup>5</sup> & Marnilce Oliveira da Silva<sup>6</sup>*

**Resumo** – A bacia do rio Amazonas tem sido afetada por eventos climáticos extremos, como a seca excepcional de 2005. Apesar da importância do monitoramento de água doce armazenada em grandes bacias hidrográficas, apenas medições linimétricas escassas estão disponíveis e as condições extremas de seca sobre a dinâmica da água de superfície na escala da bacia ainda é pouco conhecida. Missões altimétricas fornecem um monitoramento global e contínuo dos corpos d'água continentais (*i.e.*, lagos, reservatórios, rios e várzeas) ao longo de mais de vinte anos. Neste estudo, unindo dados altimétricos do ENVISAT com dados linimétricos, apresenta-se a variabilidade espacial da amplitude do nível de água e anomalias que ocorreram na bacia Amazônica durante a seca de 2005 em mais de 500 locais no período de 2002-2010. A amplitude entre as séries do ENVISAT e as séries das réguas apresentam boas similaridades quando comparadas, mesmo sendo a amostragem fornecida pelo ENVISAT mais densa. A comparação entre os cotogramas e os picos de seca em 2005 revelam anomalias regionais significativas no Norte-Noroeste, Sudoeste e partes centrais da bacia, causadas pelo aquecimento do Atlântico Tropical Norte. Estes resultados são também de grande interesse para a gestão e estudos complexos de recursos hídricos.

**Palavras-Chave** – Evento extremo, Bacia Amazônica, altimetria espacial.

## **THE DROUGHT IN AMAZON BASIN 2005 MONITORED BY ENVISAT SATELLITE ALTIMETRIC**

**Abstract** – The Amazon river basin has been affected by extreme climatic events, such as exceptional drought of 2005. In spite of the importance of monitoring freshwater stored in large river basins, only scarce measurements of river stages are available and extreme drought conditions on surface freshwater dynamics at the basin scale are still poorly known. Radar altimetry missions provide a global and continuous monitoring of inland water bodies (*i.e.*, lakes, reservoirs, rivers and floodplains) over more than twenty years. In this study, merging ENVISAT altimetry data with in-situ data, we present the spatial variability of the amplitude of water level and level anomalies that occurred in the Amazon basin during the 2005 drought over more than 500 locations during the period 2002-2010. The stage amplitude between the ENVISAT series and the gages series present a good agreement when comparable, given that a much denser sampling is offered by the ENVISAT mission. Comparison between the annual water level hydrographs with 2005 lowest stages reveals significant regional anomalies in the North-Northwest, Southwest and Central parts of the basin, caused by warming of the Tropical Atlantic North. These results are also of great interest for the management and complex studies of water resources.

<sup>1</sup> \* Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Mestrado em Clima e Ambiente, CLIAMB, Campus II; Av. André Araújo 2936, Aleixo, 69060-001, Manaus-AM, Brasil, alinecorrea.acs@gmail.com

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

<sup>3</sup> Institut de Recherche pour Le Développement - IRD/LEGOS/CNES/CNRS/IRD/UT3 14 av. Edouard Belin, 31400 - Toulouse - França stephane.calmant@ird.fr.

<sup>4</sup> Institut de Recherche pour Le Développement - IRD/ESPACE-DEV 500 rue Jean François Breton, 34093, Montpellier Cedex 5 - França frederique.seyler@ird.fr.

<sup>5</sup> Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Bacharelado em Engenharia da Computação, Faculdade de Tecnologia, Av. General Rodrigo Otávio, 3000, Coroado - 69077-000 - Manaus - AM, Brasil apphillipe@gmail.com.

<sup>6</sup> 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: marnilcesilva@gmail.com

**Keywords** – Extreme event, Amazon Basin, radar altimetry.

## INTRODUÇÃO

O uso da altimetria espacial tem sido de grande importância para o estudo e entendimento de diversos fenômenos hidrológicos em hidrossistemas continentais, como os desenvolvidos por Calmant e Seyler (2006), Silva (2010) e Silva *et. al.* (2012), por exemplo. Essa técnica consiste na medida da altura instantânea da superfície hídrica através do envio de uma onda eletromagnética no nadir do satélite altimétrico, sendo a cota altimétrica então calculada pelo intervalo de tempo de ida e volta desse pulso do satélite (Fu e Cazenave, 2001).

Desta forma é possível obter dados de nível de água com precisões milimétricas (*i.e.*, erro de alguns centímetros), principalmente em locais remotos, como na bacia Amazônica. Este estudo apresenta a utilização dos dados da missão altimétrica ENVISAT (*ENVironmental SATellite*) para avaliar a variabilidade espacial das cotas associada a eventos hidrológicos extremos na bacia Amazônica, através da análise da amplitude média da lâmina de água para o período compreendido entre os anos de 2002 e 2010 e das anomalias de seca para o ano de 2005.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Dados

Foram utilizados dados de 69 estações linimétricas da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no site <http://hidroweb.ana.gov.br>, e dados de 7 estações linimétricas do *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* (ORE HYBAM), disponível no site <http://www.ore-hybam.org>.

Os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records* – GDRs) foram processados e disponibilizados pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère* – CTOH do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales* – LEGOS e são proveniente da missão ENVISAT, utilizando-se o algoritmo *Ice-1* (Wingham *et al.*, 1986), onde foram obtidos entre as coordenadas geográficas que compreende a área de estudo (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. E foram desenvolvidos programas na linguagem Fortran para o algoritmo de tratamento da FO do satélite ENVISAT (*Ice-1*) que permite calcular a altura do plano de água à 20Hz (*i.e.*, 1/20<sup>ésimo</sup> de segundos, ou a cada 350 m de distância) com as devidas correções instrumentais, ambientais e geofísicas, que possibilitam a criação das bases de dados para utilização no programa *Virtual ALtimetry Station* – VALS (VALS, 2013).

### Estações virtuais

Estação virtual é o ponto de cruzamento do traço de órbita do satélite com o corpo de água na superfície terrestre. Para a elaboração de uma estação virtual foi utilizado a ferramenta VALS, obtendo-se assim séries temporais de cotas altimétricas. Neste trabalho foram utilizadas 538 estações virtuais provenientes do satélite ENVISAT. Adicionalmente, as alturas elipsoidais de nível de água das séries temporais foram convertidas em alturas geóides, utilizando-se o modelo de ondulação geoidal EGM2008 (*Earth Gravity Model*) desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008).

### Validação dos dados altimétricos

A validação das séries temporais de cotas altimétricas foi analisada através da comparação direta por regressão linear entre as cotas altimétricas e as cotas linimétricas. A seleção dos dados foi executada separadamente e regressões lineares foram computadas independentemente, calculando-se o erro médio quadrático (RMS). E para que nenhuma mudança hidrológica fosse evidenciada

entre as duas estações adotou-se a distância máxima de 30 km entre a estação virtual e a estação linimétrica *in situ*.

### **Variação espacial dos níveis de água associada a eventos hidrológicos extremos**

Para verificar a existência de periodicidade e de anomalias foram elaboradas as séries temporais das cotas provenientes das medidas do satélite altimétrico ENVISAT para cada estação virtual. Adicionalmente foram elaborados cotagramas para cada série temporal altimétrica, para os períodos compreendidos entre os anos de 2002 a 2010, calculando-se as médias mensais das cotas altimétricas.

A amplitude média da cota altimétrica foi calculada utilizando a Equação 1:

$$\bar{A} = \bar{h}_{\max} - \bar{h}_{\min} \quad (1)$$

no qual  $\bar{A}$  é a amplitude média da cota altimétrica,  $\bar{h}_{\max}$  a cota altimétrica máxima e  $\bar{h}_{\min}$  a cota altimétrica mínima do cotograma.

Para identificar as áreas onde ocorreram déficit de água no ano de 2005 foi utilizada a Equação 2:

$$A_{\min 2005} = h_{\min 2005} - \bar{h}_{\min} \quad (2)$$

no qual  $A_{\min 2005}$  é a anomalia de seca do ano de 2005,  $h_{\min 2005}$  a cota altimétrica mínima da série temporal e  $\bar{h}_{\min}$  a cota altimétrica mínima do cotograma.

## **RESULTADOS E ANÁLISES**

### **Validação dos dados altimétricos**

Os estudos de validação das séries temporais de cotas altimétricas foram conduzidos em 4 rios da região Amazônica: Solimões, Amazonas, Negro e Purus. Os resultados encontram-se listados na Tabela 1, onde também são apresentadas as coordenadas da estação linimétrica *in situ* e a distância entre ambas as estações. A Figura 1 ilustra um exemplo de validação para a estação virtual localizada sob o traço 493 (66,141°W e 2,517°S) com a estação linimétrica *in situ* Fonte Boa, no rio Solimões.

Tabela 1 – Resultado da validação dos dados altimétricos proveniente do satélite ENVISAT em rios da bacia Amazônica.

Estação linimétrica <i>in situ</i> / Código da ANA	Nome do rio	LAT (°)	LONG (°)	Traço # ENVISAT	Distância entre as estações (km)	RMS (cm)
Parintins/16350002	Amazonas	-2,634	-56,753	435	2	15
Fonte Boa/12351000	Solimões	-2,6	-66,071	493	10	22
Manaus/14990000	Negro	-3,137	-60,027	564	16	16
Arumã Jusante/13962000	Purus	-4,734	-62,151	192	12	11

Os RMSs entre as diferenças de níveis de água variam de 11 cm, no rio Purus, a 22 cm, no rio Solimões, comparáveis 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.

### **Variação espacial das cotas altimétricas**

Foram elaborados 538 séries temporais de cotas altimétricas e cotagramas, referente a cada estação virtual. Um exemplo de série temporal e cotagrama está ilustrado na Figura 2, onde tem-se, na Figura 2.a, a série temporal resultante do cruzamento do traço 435 do satélite ENVISAT com o plano de água observado no rio Amazonas (56,778°W e 2,611°S). No cotagrama (Figura 2.b) observa-se que a cheia progride lentamente e a vazante é mais acelerada, resultante do regime hidrológico equatorial alterado (Silva *et al.*, 2011). Nesta estação virtual, a estiagem ocorreu durante o período compreendido entre os meses de outubro e novembro, onde o nível de água alcançou um valor médio mínimo de 6,62 m, apresentando uma amplitude de 8,02 m.

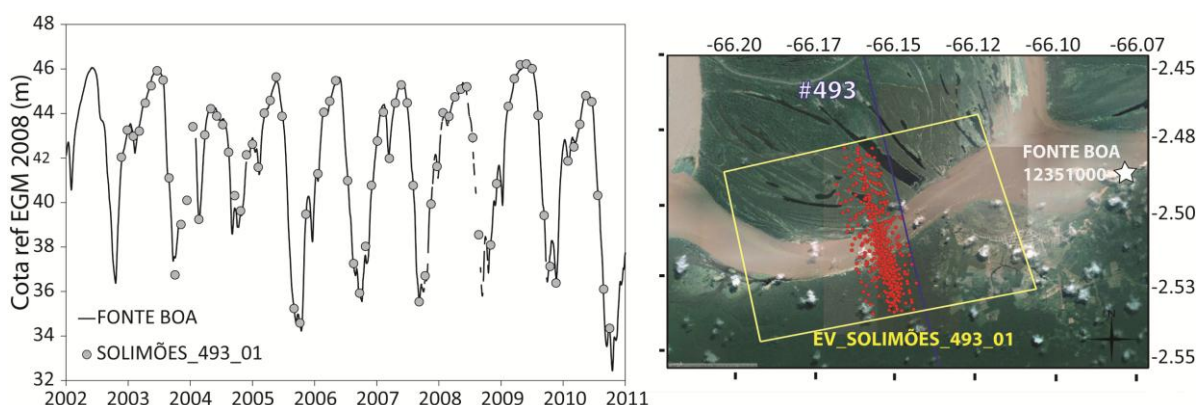


Figura 1 – Exemplo de validação da série temporal de cotas altimétricas. À esquerda, círculos e linhas contínuas correspondem às séries temporais altimétricas e linimétricas, respectivamente. À direita, apresenta-se a localização da estação linimétrica *in situ* (estrela branca), limite da estação virtual (polígono amarelo), seleção dos dados altimétricos (pontos vermelhos) e a passagem do satélite ENVISAT na direção sul-norte (linha azul). Imagens do *Google Earth* em segundo plano.

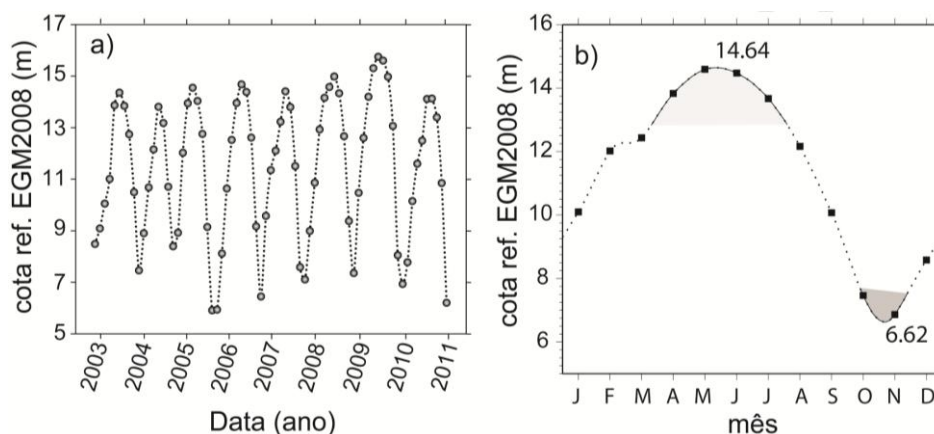


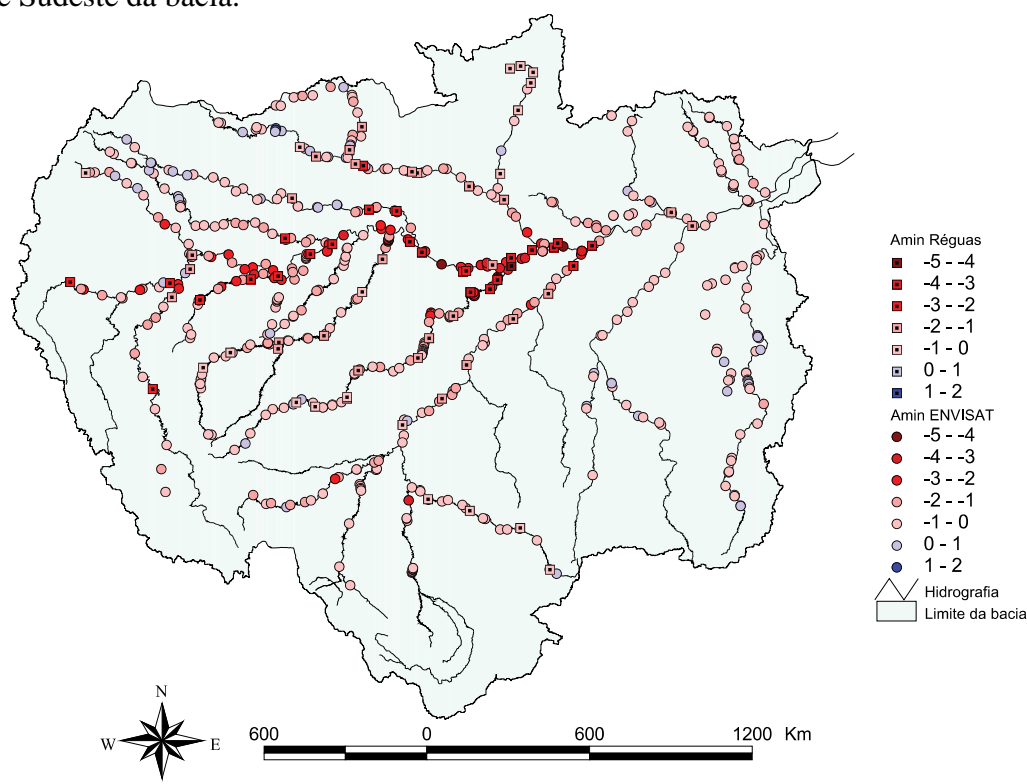
Figura 2 – Exemplo de série temporal e cotagrama elaborados com os dados das estações virtuais e das estações linimétricas *in situ*. **a)** Série temporal resultante do cruzamento do traço 435 do satélite ENVISAT no rio Amazonas. **b)** Cotagrama para os períodos compreendidos entre os anos de 2002 a 2010, com os valor máximo e mínimo de cota altimétrica.

A distribuição espacial da amplitude média das cotas altimétricas conforme ilustrado no trabalho de da Silva *et al.* (2013), ao longo dos principais rios da bacia Amazônica, mostraram valores, tanto dos dados altimétricos como dos linimétricos, similares, variando com valores máximos de até 16 m ao longo do ciclo hidrológico à jusante dos rios, enquanto que os valores mínimos são de até 2 m, observados à montante dos principais afluentes do sistema Ucayalli-Solimões-Amazonas.



### Variação espacial das anomalias de seca do ano de 2005

Da Silva *et. al.* (2013) mostraram que as anomalias de seca para o ano de 2005 (Figura 3), no qual correspondem aos desvios em relação a média do período de 2002 a 2010 para as 538 estações virtuais e 76 estações linimétricas *in situ* distribuídas ao longo dos principais rios da bacia Amazônica, apresentaram valores negativos (em vermelho) onde as cotas de 2005 foram inferiores à cota média. Destacaram também que as regiões mais afetadas foram na parte Ocidental de Oeste a Leste da bacia, cujas anomalias na cota altimétrica variaram de -2 a -5 m, e adicionalmente, anomalias moderadas, com déficit de no máximo -1 m, foram observadas nas partes Norte, Noroeste e Sudeste da bacia.



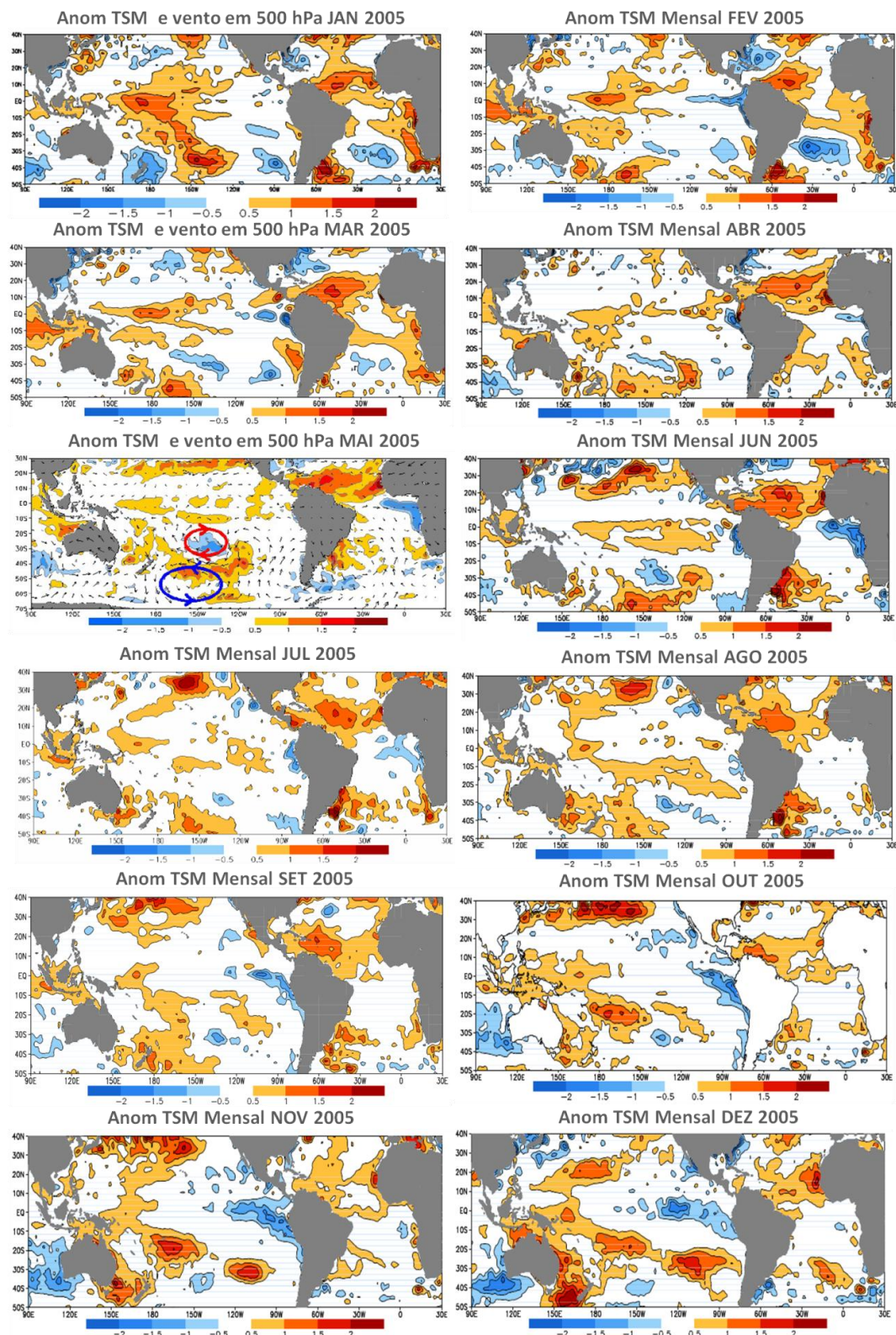
Fonte: da Silva *et. al.* (2013).

Figura 3 – Variação espacial das anomalias de seca para o ano de 2005 na bacia Amazônica Ocidental. Círculos e quadrados correspondem às séries temporais altimétricas e linimétricas, respectivamente.

É importante destacar que essas observações utilizando dados altimétricos são consistentes com as análises climatológicas da região Amazônica durante o ano de 2005, no qual concluem-se que a seca de 2005 não foi associada ao fenômeno de aquecimento anormal da temperatura da superfície do mar (TSM) do Pacífico Equatorial (*El Niño*) como na maioria das secas (Marengo e Hastenrath, 1993; Marengo *et. al.*, 2008a; Uvo *et al.*, 1998; Liebmann e Marengo, 2001), e sim devido ao aumento da TSM sobre o Atlântico Tropical Norte (ATN).

Os Boletins Climáticos da Amazônia desenvolvidos pelo Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM, 2005) para o ano de 2005 descreveram o episódio ocorrido sendo grandemente influenciado pelas elevadas TSM do ATN com anomalias positivas em torno de +1,0 a +2,0 °C no decorrer de 2005 (Figura 4), enquanto que a influência da TSM do Pacífico Equatorial era quase neutra (sem *El Niño*). Essa anomalia causou um sistema de baixa pressão sobre o ATN, no qual mudou a circulação dos ventos ao longo dos trópicos, enfraquecendo o transporte de umidade do Atlântico Tropical (AT) para a Amazônia durante a estação chuvosa de verão, influenciando o regime de precipitação, além de enfraquecer o movimento vertical e inibir a formação de nuvens,

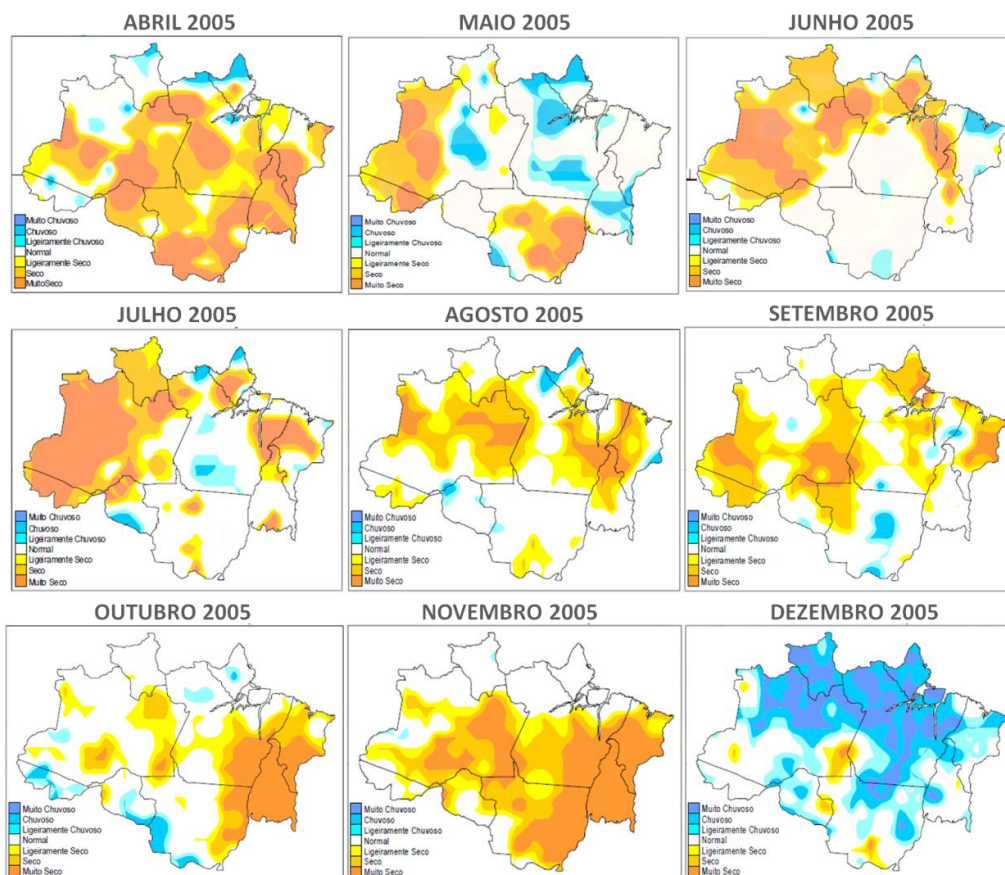
resultando em chuvas com valores abaixo dos padrões climatológicos nas regiões Sudoeste, Central e Norte-Noroeste (Figura 5), resultando neste evento extremo de seca na bacia Amazônica.



Fonte: SIPAM (2005).

Figura 4 – Anomalias de TSM entre as latitudes 30°N e 40°S sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico durante o ano de 2005. Dados do CPC/NCEP processados pelo SIPAM.





Fonte: SIPAM (2005).

Figura 5 – Anomalias de precipitação durante o meses de maio a dezembro de 2005, onde as cores tendendo ao laranja indicam locais mais secos. Dados do CPC/NCEP processados pelo SIPAM.

## CONCLUSÕES

Neste estudo foram analisadas 538 estações virtuais, apresentando RMS mínimo de 11 cm, complementadas com dados de 76 estações linimétricas *in situ*, o que permitiu a análise da variabilidade espacial dos níveis de água associada a eventos hidrológicos extremos de seca.

As anomalias de seca mostraram-se similares entre os dados utilizados, com as maiores ocorrências sendo registradas nas porções Norte-Noroeste, Central e Sudoeste da bacia denotando consistência com os estudos climatológicos da região Amazônica durante o período de estudo.

Desta forma os resultados da missão ENVISAT demonstraram singularidades em monitorar eventos hidrológicos extremos em grande escala na bacia Amazônica, o que indica a potencial contribuição da altimetria espacial na gestão e nos estudos mais complexos dos recursos hídricos.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo se insere nos projetos de pesquisa CASAM e HIDRAS (CNPq), DS BIODIVA e CLIVAR (FAPEAM), Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Mestrado cedida ao primeiro autor. À Agência Nacional de Águas - ANA, pelos dados das réguas. 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 o estudo.

## REFERÊNCIAS

- CALMANT, S., SEYLER, F. (2006). “*Continental surface water from satellite altimetry*”. Comptes Rendus Geosciences, v. 338, n. 14-15, p. 1113-1122. doi: 10.1029/2001JD000609
- CALMANT, S., SEYLER, F., CRETAUX, J-F. (2008). “*Monitoring Continental Surface Waters by Satellite Altimetry*”. Survey in Geophysics, v. 29, n. 4-5, p. 1573-0956. doi: 10.1007/10712-008-9051-1
- da SILVA, J. S., CALMANT, S., SEYLER, F. (2013). “*Variabilidade espacial do nível de água em eventos extremos da bacia amazônica observada pelo satélite altimétrico Envisat*”. Eventos Climáticos Extremos.
- FU, L.L., CAZENAVE, A. (2001). “*Satellite Altimetry and Earth Science*”. A Handbook of Techniques and Applications. London (UK). Academic press., 464p.
- LIEBMANN, B., MARENGO, J. A. (2001). “*Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazonia*”. Journal of Climate, v. 14, n. 22, p. 4308–4318.
- MARENGO, J. A. *et al.* (2008a). “*The drought of Amazonia in 2005*”. Journal of Climate, v.21, p.495-516.
- MARENGO, J. A., HASTENRATH, S. (1993). “*Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin*”. Journal of Climate, v. 6, n. 4, p. 617–627.
- PAVLIS, N. K. *et al.* (2008). “*Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*”, in: Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union. Vienna, Austria, 13-18/04/2008. Disponível em: [http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08\\_wgs84.html](http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html)
- SILVA, J. S. (2010). “*Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações Hidrológicas*”. Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. 360p. ISBN: 978-613-1-52979-5
- SILVA, J. S. *et al.* (2012). “*Water level dynamics of Amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry*”. International Journal of Remote Sensing (Online), v. 33, p. 3323-3353.
- SIPAM (2005). “*Sistema de Proteção da Amazônia. Boletim Climático*”. Disponível em <http://www.sipam.gov.br/met/clima/boletim.html>. Acesso: 15 de fevereiro de 2013.
- UVO, C. B., REPELLI, C. A., ZEBIAK, S. E., KUSHNIR, Y. (1998). “*The relationship between Tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation*”. Journal of Climate, v. 11, n. 4, p. 551–562.
- VALS (2013). “*Virtual ALtimetry Station*”, Versão 1.0.6, 05/2013, COCHONNEAU, G. CALMANT, S. Disponível em: [http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels\\_test.php](http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php)