

VARIAÇÕES TEMPORAIS DE NÍVEIS DE ÁGUA NA BACIA DO CONGO ESTIMADAS PELO SATÉLITE ALTIMÉTRICO ENVISAT

Tainá Sampaio Xavier Conchy¹
Phillipe Arantes Pereira²
Joecila Santos da Silva³
Stéphane Calmant⁴
Frédérique Seyler⁵

1 Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Escola Superior de Tecnologia – EST
Av. Darcy Vargas, 1200, 69065-020, Manaus - AM, Brasil
conchynha@live.com

2 Universidade do Estado do Amazonas – UEA; Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial na Amazônia – RHASA,
Av. Darcy Vargas, 1200, 69065-020, Manaus - AM, Brasil
apphillipe@gmail.com

3 Universidade do Estado do Amazonas – UEA; Centro de Estudos Superiores do Trópico Úmido – CESTU
Av. Djalma Batista 3578, Flores, 69050-010, Manaus-AM, Brasil
jsdsilva@uea.edu.br

4 Institut de Recherche pour le Développement – IRD, UMR 5566 LEGOS CNES/CNRS/IRD/UT3;
14 av. Edouard Belin, 31400, Toulouse, France
stephane.calmant@ird.fr

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

Abstract. For more than 10 years, satellite radar altimetry has been a successful technique for monitoring the variation in elevation of continental surface water bodies, such as inland seas, lakes and rivers. The surface water level is measured within a terrestrial reference frame with a repetitivity varying from 10 to 35 days depending on the orbit cycle of the satellite. With several decades of technique refinement, current data processing can be fairly simple or complex depending on the mission and the instrument tracking methods. Moreover, those data make possible to complement the gauge data information, especially in poorly gauged basins. In this study we have processed the data of ENVISAT RA2 altimeter in the Congo basin using an original 3D method to define the virtual stations. We have computed 150 time series of water stage for each individual water body. We present results of the capability of this sensor to discriminate water level in large tropical trans-boundary basin.

Palavras-chave: radar altimetry, space hydrology, Congo basin, altimetria espacial, hidrologia espacial, Bacia do Congo.

1. Introdução

Os rios são cursos de água que transportam escoamentos concentrados com superfície livre alimentados pelas águas advindas de precipitações pluviais ou da contribuição subterrânea (Silva *et al.*, 2003) apresentam a forma mais visível de escoamento superficial da bacia hidrográfica fazendo parte integrante do ciclo hidrológico (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). Essa variabilidade representada pela subida e descida das águas consideradas no decorrer de um ano civil (janeiro a dezembro) ou um ano hidrológico (ciclo de vazante-cheia-vazante) corresponde ao regime fluvial ou regime

hidrológico do rio. A delimitação dos períodos sazonais é de grande importante 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.

A bacia do Congo, em grande parte, permanece intocada. É a segunda maior do mundo tanto em termos de área de drenagem – abrange mais de 4,1 milhões de quilômetros quadrados, como em descarga líquida (Orange *et al.*, 1999; Laraque *et al.*, 2001), corresponde a 40% da vazão total do continente Africano (Crowley *et al.*, 2006). Grande parte da bacia drena uma área de baixo relevo (elevação de cerca de 400 m) centrado na linha do Equador e cercada por áreas de relevo pouco acima de 2000 m (Cardinal *et al.*, 2010). O rio Congo, abrange 25% do total de zona úmida tropical e é responsável por quase 3,4% das entradas de água doce para o Oceano Atlântico (Probst e Tardy, 1987).

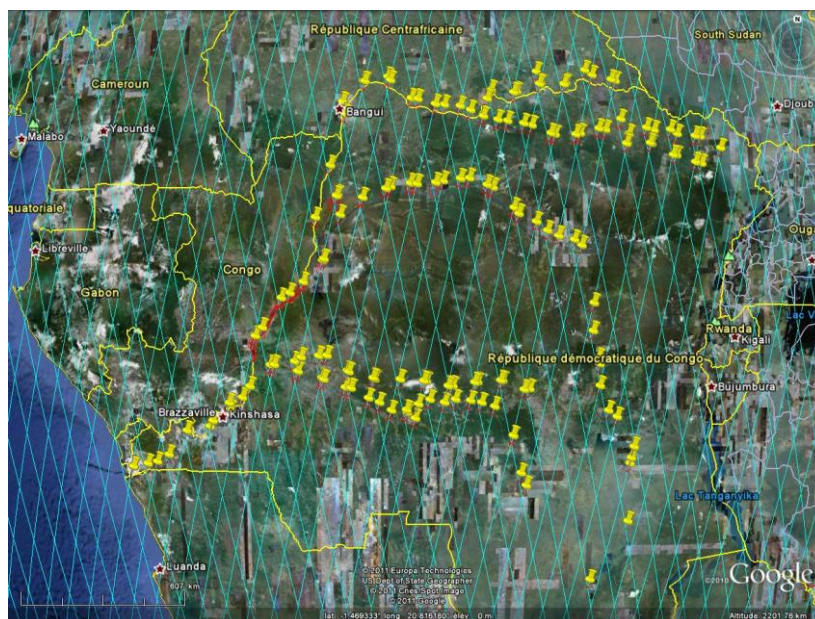


Figura 1. Bacia do rio Congo, objeto deste estudo, com as estações virtuais (pontos em amarelo) e a cobertura espacial da missão ENVISAT (traços azuis). Mosaico de imagens Google Earth em segundo plano.

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. Esses satélites possuem cobertura global, o que também possibilita que seja obtida altura da superfície da lâmina de água em hidrossistemas continentais. Devido a sua vasta resolução espacial gera resultados em locais de difícil acesso, onde não há redes de monitoramento hidrológicas convencionais ou mesmo quando tais redes existem podem complementar os dados *in situ* quando os mesmos foram interrompidos. Sendo, portanto, uma excelente técnica para obtenção de medidas de nível da água na bacia do Congo, dada a ausência de uma rede de monitoramento hidrológico na região.

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

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Dados Altimétricos do ENVISAT

O *ENVironmental SATellite* (ENVISAT) foi lançado em março de 2002 pela *Agence Spatiale Européenne* (ESA), seus dados foram utilizados para o estudo científico da Terra, análise ambiental e alterações climáticas.

O satélite contava com 10 instrumentos; estando incluso um altímetro radar (RA-2) (Silva, 2010). O RA-2 é um radar de alta precisão direcionado para o ponto nadir operando em bi-frequência na banda Ku a 13,575 GHz com comprimento de onda de 2,3 cm e na banda S a 3,2 GHz com comprimento de onda de 3,4 cm (Zelli, 1999). O ENVISAT tinha inclinação de 98,5°, se posicionado em uma órbita elíptica hélio-síncrona com uma a uma altitude média de 785 km e uma distância inter-traço no Equador de aproximadamente 80 km (Silva, 2010) e resolução temporal de 35 dias. 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 e finalizou suas operações em abril de 2012.

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-I*, foram obtidos entre as coordenadas geográficas 90°W a 40°W e 13°N a 21°S. Extraíram-se do CTOH 90 traços.

2.2. Elaboração de Estações Virtuais

Uma estação virtual consiste na interseção de um traço do satélite altimétrico com o plano de água, sendo potencialmente possível obter uma série temporal da altura do plano de água (Silva, 2010). Foi aplicada uma metodologia para criação das estações virtuais pela seleção dos dados correspondentes ao cruzamento do plano de água, adaptadas às variações no tempo e no espaço através do programa VALS (*Virtual ALtimetry Station*) (VALS, 2001), descrita em Silva *et al* (2010).

2.3. Elaboração das Séries Temporais de Nível 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 (Equação 1):

$$DAM = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |H_i - H_{med}| \quad \text{Eq. 1}$$

onde n é o número de medidas, H_i é a i ésima medidas altimétrica selecionada e H_{med} a mediana das medidas selecionadas.

3. Resultados e Discussão

3.1. Estações Virtuais

O presente estudo está fundamentado na análise dos dados altimétricos da bacia do rio Congo provenientes do satélite ENVISAT. Um conjunto de 150 estações virtuais, utilizando-se o algoritmo *Ice-I* para o satélite ENVISAT, sendo um dos algoritmos que se adapta às medições altimétricas em águas continentais (Frappart *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2010), 90

estações virtuais tiveram seus dados analisados, separadamente, para a geração das séries temporais altimétricas. A localização das estações virtuais pode ser observada na Figura 1.

A 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 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 143 do satélite ENVISAT, um exemplo de estação virtual utilizando-se o algoritmo *Ice-1*. Na Figura 3a, o satélite ENVISAT cruza o rio Congo no sentido sul-norte. 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 a um segundo. 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).

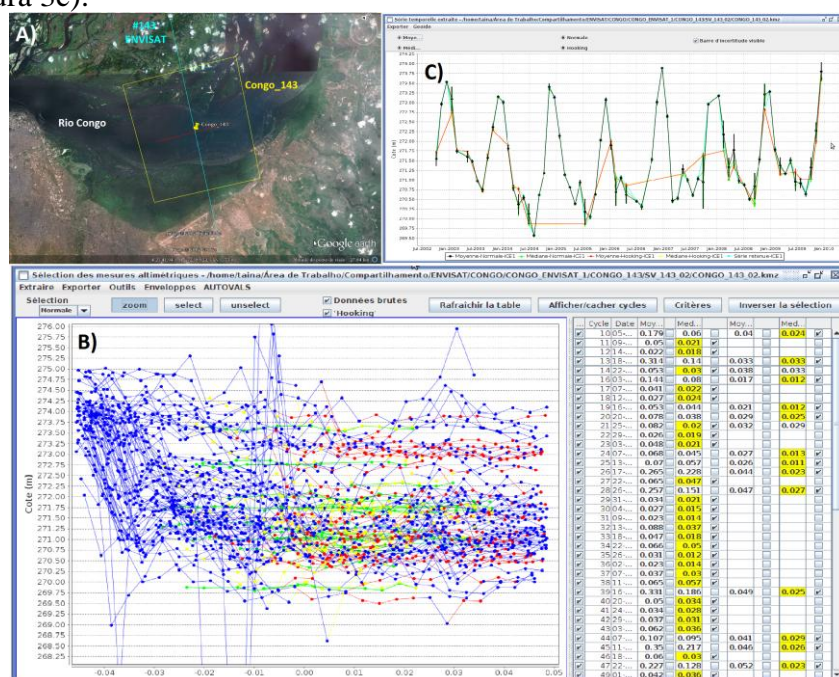


Figura 2. Criação da estação virtual sobre o traço 143 do satélite ENVISAT através do programa VALS. **a)** Trajetória do satélite ENVISAT no sentido sul-norte, traço 143 que cruza o rio Congo no polígono amarelo. Mosaico de imagens do Google Earth em segundo plano. **b)** Perfil hidrológico medido pelo 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. Caracterização do Regime Hidrológico

Inicialmente, foram elaborados 150 cotagramas em toda a bacia, incluso os afluentes, porém para análise estatística das médias mensais foram utilizadas 90 destas estações que estão localizadas nos rios Congo, Ubangui e Kasai (Figuras 3, 4 e 5). 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).

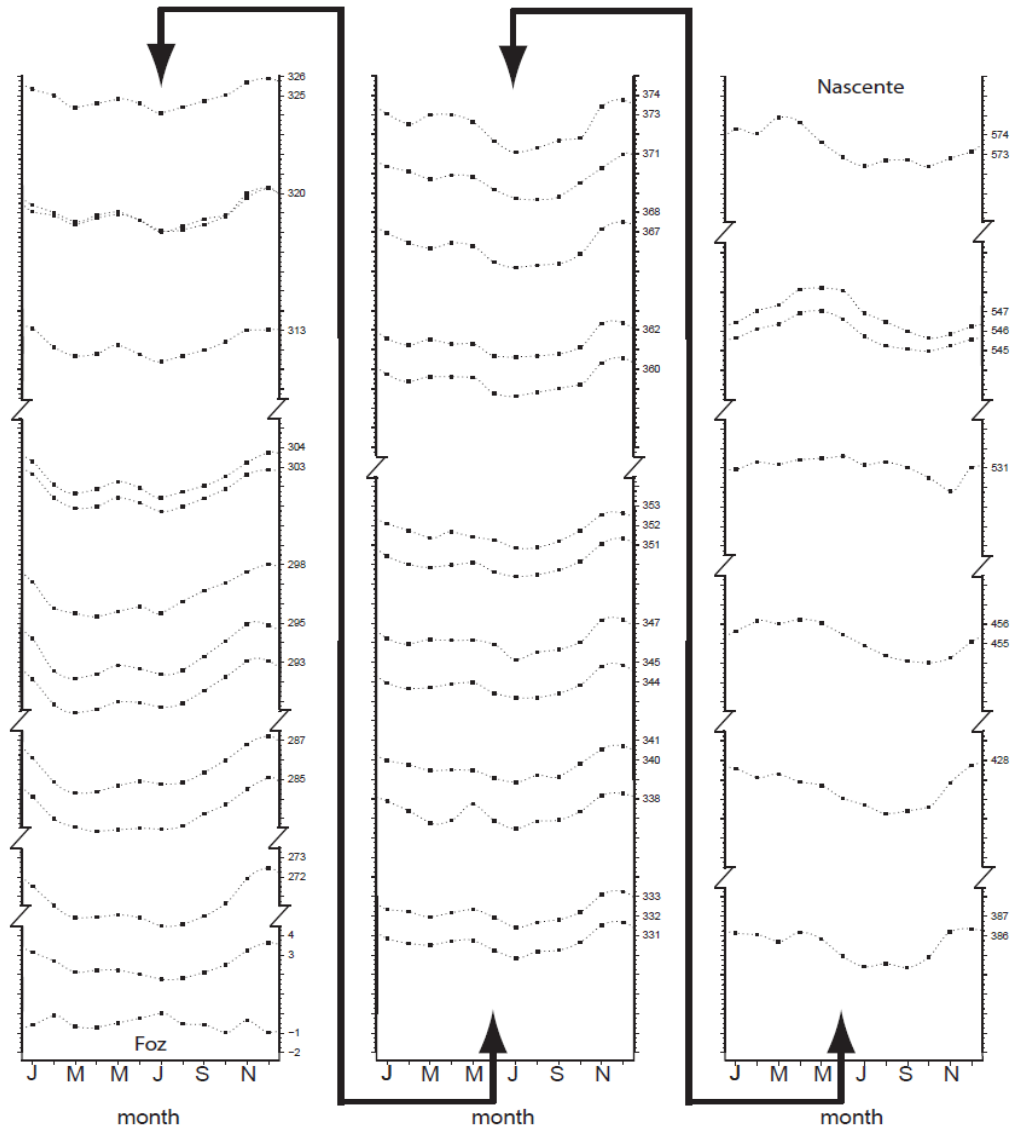


Figura 2. Cotagramas do rio Congo referentes ao período de 2002-2010 utilizando 34 estações virtuais.

O rio Congo possui extensão de 4.700 km e área de 4.014.500 km², nasce nas Montanhas do Vale Rift e tem sua foz no Oceano Atlântico. Está localizado na República Democrática do Congo, fazendo fronteira com Angola.

A caracterização do regime hidrológico do rio é bimodal em sua maior parte: na nascente (que possui largura de 120 m e está a 3600 km distante da foz) é multimodal com 3 picos de cheia – em janeiro, março e setembro, sendo o de março mais proeminente. Em seguida torna-se modal com a cheia ocorrendo preferencialmente no primeiro semestre e a estiagem no segundo. Mais à frente, passa a bimodal com o primeiro bico entre os meses de abril e maio e o segundo entre os meses de novembro e dezembro. Ao longo do percurso, o rio continua bimodal, com o primeiro pico bem suave em junho e o outro, bem mais acentuado, em

dezembro como na última estação virtual, onde o rio Congo tem aproximadamente 7 km de largura e está a 65 km da foz.

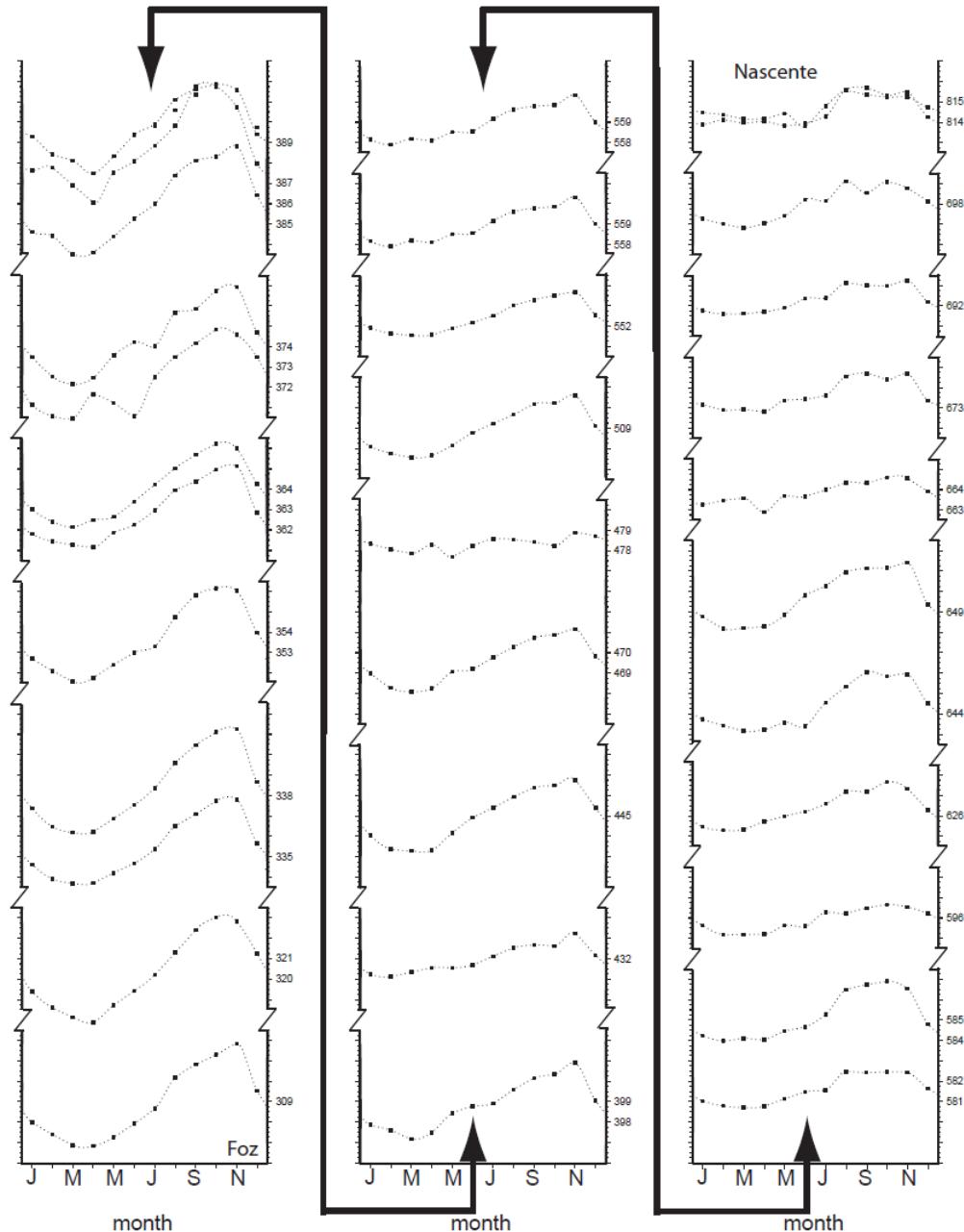


Figura 3. Cotagramas do rio Ubangui referentes ao período de 2002-2010 utilizando 33 estações virtuais.

O rio Ubangui nasce na confluência dos rios Mbomou e Uele, possui extensão de 1.120 km e 772.800 km² de área. Sua foz é no rio Congo e está no localizado entre as Repúblicas Centro-Africana e Democrática do Congo.

O regime hidrológico do rio Ubangui é multimodal, com a estiagem acontecendo preferencialmente no primeiro semestre e a cheia ocorrendo no segundo, com pico variando entre os meses de outubro e novembro, desde a estação mais próxima da nascente (que tem largura inferior a 50 m e distância de 2330 km da foz) até a mais próxima da foz (que tem largura inferior a 1650 m e distância de 197,5 km).

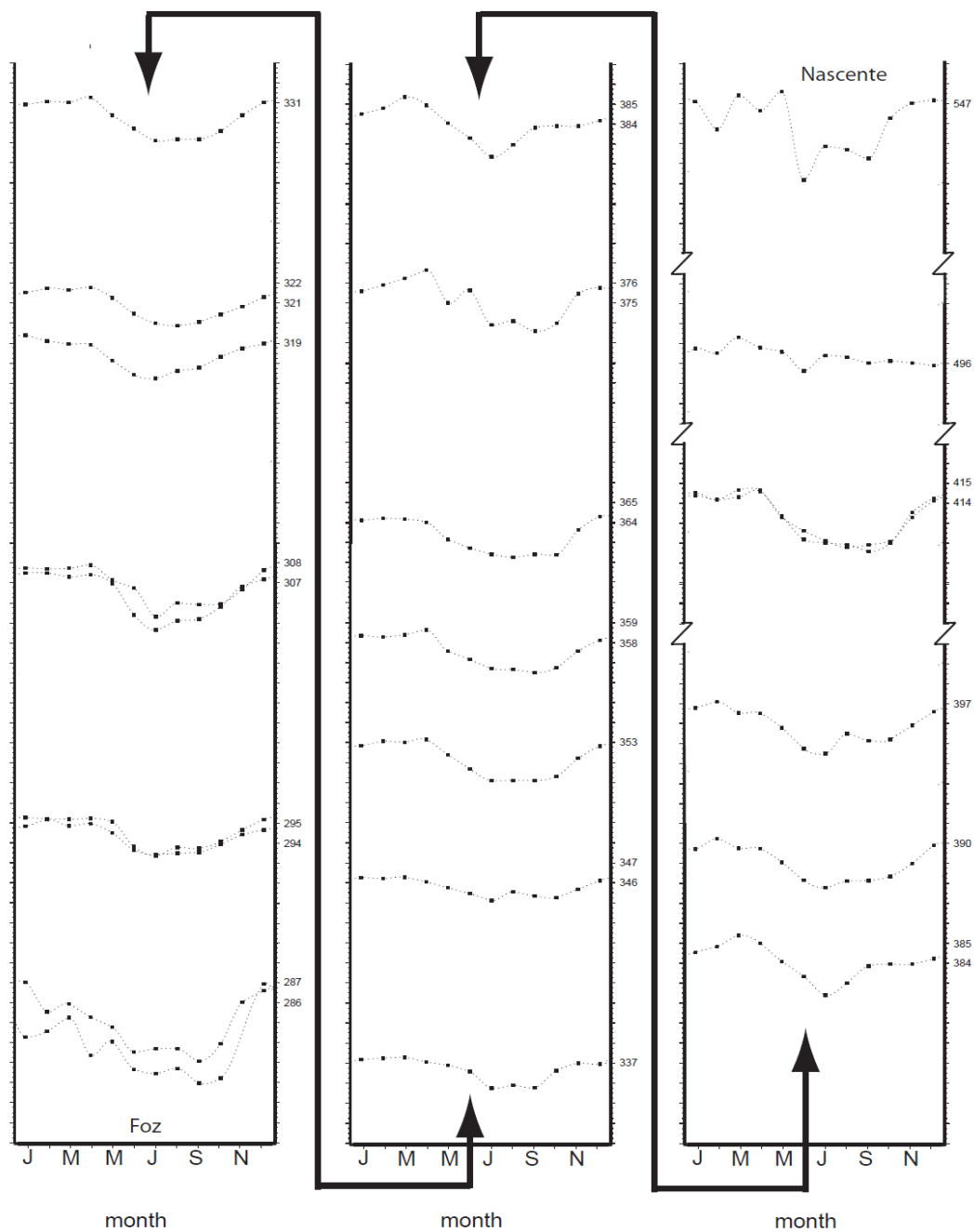


Figura 4. Cotagramas do rio Kasai referentes ao período de 2002-2010 utilizando 23 estações virtuais.

O rio Kasai nasce no Alto Chicapa, possui extensão de 2.153 km e 925.172 km² de área. Sua foz é no rio Congo a 170 km ao Norte de Kinshasa, abrangendo os países Angola e República Democrática do Congo.

Embora o regime hídrico do rio Kasai seja multimodal na estação mais próxima a nascente (com largura de 200 m e distante 1345 km da foz) e a mais próxima à foz (com largura de 1000 m e distante 54 km), é em grande parte modal, com a cheia ocorrendo preferencialmente no primeiro semestre (geralmente o pico ocorre no mês de abril) e a estiagem no segundo semestre.

4. Conclusões

Os dados altimétricos de nível de água do satélite ENVISAT, utilizando o algoritmo Ice-1, permitiram a caracterização do regime hidrológico dos rios Congo, Ubangui e Kasai. A ferramenta VALS possibilitou a elaboração de estações virtuais, obtendo-se um grande número de medidas necessárias para a quantificação dos níveis de água que subsidiaram a análise do regime hídrico dos rios. Os rios demonstram regimes hídricos distintos: o rio Congo sendo bimodal e os rios Ubangui e Kasai sendo modais, em grande parte de seus percursos, com picos de cheia em oposição. As séries temporais obtidas serão importantes em estudos futuros, como o nivelamento das estações *in situ* e para obtenção de perfis de declividades de estiagens e cheias. Por fim, concluí-se que a altimetria espacial permite instrumentar uma bacia que apresenta somente 3 réguas linimétricas, além de aumentar a amostragem espacial dos dados hidrológicos e caracterizar a sazonalidade do ciclo hidrológico dos rios Congo, Ubangui e Kasai. Obtendo-se dados altimétricos de nível de água em rios com larguras inferior a 50 m e superior a 6 km.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelos projetos de pesquisa CASAM (CNPq), Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado 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

Referências Bibliográficas

- Cardinal, D. *et al.* (2010). "Contrasting silicon isotope signatures in rivers from the Congo Basin and the specific behaviour of organic - rich waters". **Geophysical Research Letters**, VOL. 37, L12403, doi:10.1029/2010GL043413.
- Christofoletti, A. (1981). **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 150p.
- Crowley, J. W. *et al.* (2006). "Land water storage within the Congo Basin inferred from GRACE satellite gravity data". **Geophysical Research Letters**, VOL. 33, L19402, doi:10.1029/2006GL027070, 2006
- Frappart, F., *et al.* (2006). "Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon Basin". **Remote Sens. Environ.**, v. 100, n. 2, p. 252–264, doi: 10.1016/j.rse.2005.10.027
- Laraque, A., *et al.* (2001). "Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century". **Journal of Hydrology**. 245, 104–117.
- Orange, D. *et al.* (1999). "Evolution des flux de matières le long de l'Oubangui et du fleuve Congo", paper presented at Symposium International MANAUS'99, **HiBAm Program**, Manaus, Brazil.
- Probst, J. L., e Tardy, Y. (1987), "Long-range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century", **Journal of Hydrology**, 94, 289– 311.
- Roux, E. *et al.* (2010). "Producing time-series of river height by means of satellite radar altimetry – Comparison of methods". **Hydrological Sciences Journal/ Journal Des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 1, pp. 104-120 doi: 10.1080/02626660903529023
- Seyler, F. *et al.* (2008). "Monitoring water level in large trans-boundary ungauged basin with altimetry: the exemple of ENVISAT over Amazon Basin". **Journal of Applied Remote Sensing** – SPIE 7150, 715017; doi: 10.1117/12.813258.
- Silva, R. C. V. *et al.* (2003). **Hidráulica Fluvial**. v. 1, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 305p.
- 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, 2010, doi: 10.1016/j.rse.2010.04.020
- 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
- Villela, S. M. e Mattos, A. (1975). **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p.
- Zelli, C. (1999). "ENVISAT RA-2 advanced radar altimeter: Instrument design and pre-launch performance assessment review". **Acta Astronautica**, v. 44, p. 323-333.