

Estudo da dinâmica de inundação na várzea Amazônica através de termo-sensores de campo.

Adriana Gomes Affonso¹
Eduardo de Moraes Arraut²
Vivian Fróes Renó¹
Joaquim Antônio Dionísio Leão¹
Laura Hess³
Helder Queiroz⁴
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹

¹ Divisão de Observação da Terra - OBT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil
{affonso, vivianfr, evlyn}@dsr.inpe.br
joaquim@dpi.inpe.br

² Centro de Ciências do Sistema Terrestre - CCST
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil
eduardo.arraut@inpe.br

³ Institute for Computational Earth System Science - ICESS
University of California-Santa Barbara - UCSB
Santa Barbara, CA 93106, USA
lauralhess@gmail.com

⁴Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá
Estrada do Bexiga, 2584, FonteBoa, Tefé, AM, Brasil
helder@mamiraua.org.br

Abstract: The Amazon floodplain is a complex mosaic of forests, lakes and channels, seasonally inundated by Amazonian rivers. The flood pulse is a key factor in the ecological processes of the várzea, which transforms periodically terrestrial environments into aquatic environments. This dynamics provides habitats for many fauna and flora species and provides a suitable spawning environment and abundant food and habitat for fish larvae protection. JERS-1 radar based mapping estimates that 17% of the Amazon basin is covered by wetlands. However this estimate is based in just one high water in the 1996 hydrological year. The launch of ALOS radar based satellite in 2006 with a temporal resolution of 40 days offer a new possibility to better understand the water level annual variation in different habitats. However, these inundation maps derived from satellite images need to be validated with field information. For this it was conducted a field experiment to identify the flooding dates, from 2008 to 2009, in different regions of the floodplain, through the use of temperature sensors (thermo-sensors or iButtons). Therefore, this paper presents a methodology to detect the flooding period through the use of temperature sensors in the floodplain located in the Mamiraua Sustainable Development Reserve, and also describes the first results of the flooding dynamics of this ecosystem.

Palavras-chave: thermo sensors, inundation dynamic, ALOS images, Amazonian várzea, sensores de temperatura, dinâmica de inundação, imagens ALOS, várzea amazônica.

1. Introdução

A bacia Amazônica é a maior bacia de drenagem do mundo ocupando uma área de aproximadamente 6.869.000 km² (Neill, et al. 2006). Devido a sua evolução geológica e geomorfológica, a bacia possui uma vasta planície de inundação, também conhecida como várzea, que é formada por um complexo sistema de rios, canais, lagos, ilhas e barreiras que são modificados constantemente devido à sedimentação e ao transporte de material particulado em suspensão.

A planície de inundação é alagada sazonalmente, originada pelo regime de chuvas na região Andina, o que provoca a flutuação anual, regular, monomodal e de grande amplitude no nível da água do Rio Amazonas. Esse pulso de inundação é vital para os processos ecológicos da várzea, o qual ocasiona a transformação periódica dos ambientes terrestres em aquáticos.

Essa dinâmica fornece uma variedade de habitats para diversas espécies de animais e vegetais (Junk e Da Silva, 1997), prove fontes de alimento, nidificação e refúgio contra predadores para diversas espécies de peixes (Sanchez-Botero e Araújo-Lima, 2001). A várzea é importante ainda pela sua alta biodiversidade (Junk et al., 2000), elevada produtividade primária das florestas inundáveis (Parolin *et al.*, 2004), das macrófitas aquáticas (Piedade et al., 1994), e fornece as principais fontes de energia para a cadeia trófica aquática amazônica (Forsberg et al., 1993).

Estimativas feitas por Hess et al. (2003) com base nos mosaicos JERS-1 produzidos pelo Global Rainforest Mapping Project (GRFM) indicam que cerca de 17% da bacia amazônica é ocupada por diferentes tipos de áreas inundáveis. Entretanto essa estimativa é limitada ao nível de inundação referente à cheia de 1996, e a um dado instantâneo de aquisição da imagem na data da passagem do satélite. Com o lançamento do satélite ALOS em 2006 e a disponibilidade de dados a cada 40 dias, pode-se ter idéia mais precisa da variação interanual do nível da água nos diferentes habitats. Entretanto, esses mapas de inundação derivados de imagens precisam ser validados com informações de campo. Para isso foi realizado um experimento de campo (Hess et al. 2011) para determinar com mais precisão as datas de inundação de diferentes regiões da várzea, criando “régua fluviométrica” a partir da colocação de sensores de temperatura (termo-sensores ou iButtons) em árvores distribuídas em áreas selecionadas da várzea.

Os termo-sensores registram, em períodos predeterminados, os valores de temperatura do ambiente externo ao longo do tempo. Esses sensores já foram utilizados para monitorar a temperatura de regiões costeiras nos Estados Unidos com o objetivo de identificar as regiões termicamente estressantes para os mexilhões (Helmuth et al., 2002, Helmuth et al., 2006), e também para identificar o regime de maré em áreas inundáveis no estado do Oregon, Estados Unidos (Tully, 2007). Como a frequência de variação da temperatura do ar é muito maior do que a da água, a alternância entre estados de estabilidade e variações de alta frequência, ao longo do tempo, permite determinar as oscilações do nível da água em cada região e assim identificar o momento em que a inundação ocorreu (Harley e Helmuth, 2003).

No entanto, essa tecnologia, até o momento, só foi testada em regiões temperadas, onde as amplitudes térmicas são maiores, e, portanto, onde é mais fácil distinguir o sinal da variabilidade térmica devido à inundação, daquele relacionado à exposição do sensor à atmosfera.

Portanto, esse trabalho apresenta uma metodologia para detectar o período de inundação (de 2008 a 2009), através de “termosensores” instalados em campo, na planície de inundação do Rio Solimões, onde está localizada a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, e descreve os primeiros resultados da dinâmica de inundação desse ecossistema.

2. Área de estudo

A área de estudo está localizada na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, na região centro-oeste do estado do Amazonas, próximo à cidade de Tefé (Figura 1a). A região é formada por uma planície de inundação, com uma variação anual do nível da água de aproximadamente de 12 m. O período de água alta ou cheia inicia em maio estendendo-se até meados de julho, seguido pela vazante que se prolonga até o mês de setembro. A seca, ou água baixa, vai de setembro até novembro, quando se inicia a enchente que vai até o mês de maio (Ramalho et al., 2010) (Figura 1b).

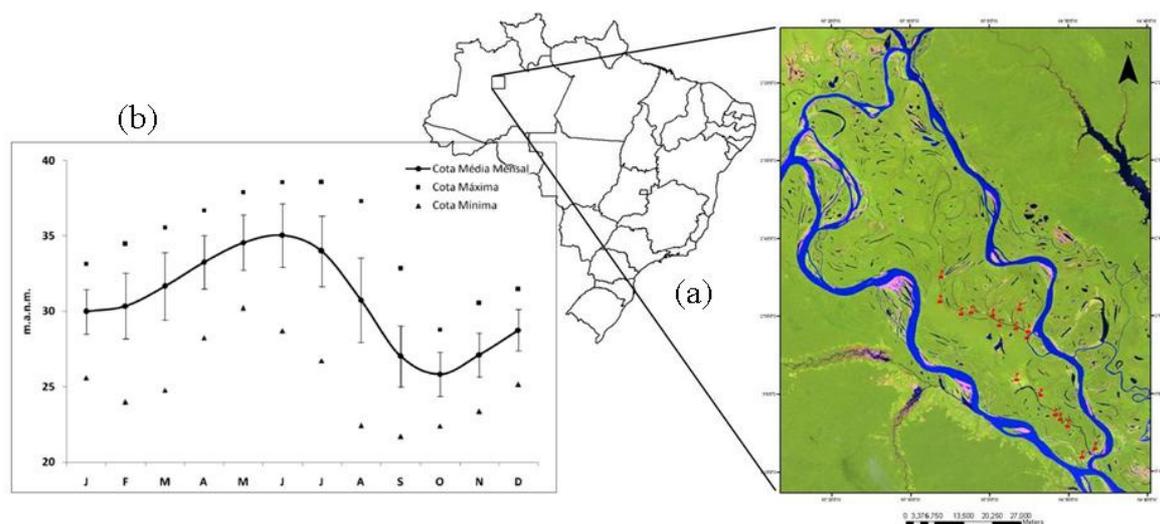


Figura 1: (a) Área de estudo na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá e as estações cujos TiBs foram recuperados e os dados de temperatura lidos (em vermelho). (b) Cota média mensal com desvio padrão, cota máxima e mínima registrada por mês do nível da água medido na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá do período de 1990 a 2008. Fonte: Ramalho et al., 2010.

3. Metodologia

Foram instalados 130 sensores de temperatura, Thermochrons iButton (TiBs) (Scanning Devices Inc.) em 23 estações (árvores na planície de inundação), em diferentes posições do tronco equidistantes de 50 centímetros no período de água baixa (novembro) do ano de 2008. Para cada estação foi registrada a altitude em relação ao nível do mar, através do equipamento GPS Trimble com recepção Omnistar, sendo que a altitude de cada TiB foi derivada a partir da altitude de cada estação e a sua altura em relação ao solo. Os TiBs, registraram a cada 4 horas, durante 1 ano a temperatura do ambiente externo e o horário de coleta. Em novembro de 2009, 94 sensores foram recuperados, 10 não foram encontrados no local, e 26 ainda não foram recuperados, pois não foi possível o acesso devido à intensidade da seca de 2009 e 2010. Desses 94, apenas 45 tiveram seus dados corretamente recuperados. Informações sobre o procedimento de colocação dos TiBs em campo, a eficácia e eficiência desse sistema são contemplados num artigo desse mesmo evento (Hess et al., 2011).

Os dados de temperatura foram extraídos através do OneWireViewer resultando em seis valores diários de temperatura no período de 1/12/2008 até 4/11/2009. Para cada TiB foram calculadas as variâncias diárias.

Para determinar a data de cada evento de inundação, (A) TiB inundado que irá caracterizar a enchente naquele ponto, e (B) TiB não inundado, caracterizando a vazante, foi necessário determinar um critério consistente, aqui chamado de limiar de corte, o qual seria usado para todos os sensores. Esse limiar foi determinado através da razão da variância diária entre os dados de temperatura do ar e da água (registradas a 0,3 e 1 metro de profundidade)

medidas pelo Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental (SIMA) (Stech et al, 2004) localizada no Lago Mmirauá. Os dados utilizados foram coletados a cada hora diariamente no período de 8/6/2009 a 25/10/2010. Foram determinados dois limiares de corte, 1,81 e 3,57, correspondentes a razão entre a variância da temperatura do ar pela água (1 e 0,3 metro, respectivamente). Os limiares foram testados com os dados da variância diária da temperatura dos TiBs localizados na régua de nível de água (6 TiBs) do Lago Mmirauá, para definir o melhor valor de corte. Dessa forma, quando os valores de variância diária da temperatura do TiB fossem continuamente menores do que 1,81 e 3,57, era considerado como evento de inundação que perduraria até o momento em que a variância ultrapassasse o valor de corte.

Como os TiBs estavam em altitudes conhecidas e no caso dos localizados na régua, compatíveis com a régua de medição (por ex, o TIB 127 estava a 33,43 metros acima do nível do mar) foi possível avaliar o grau de concordância entre o limiar de corte e o nível da água na régua correspondente a altitude do TiB. Os dois limiares apresentaram resultados semelhantes, sendo que o limiar 1,81 apresentou a maior correlação ($r^2=0.97$, $p < 0.05$).

Dessa forma, o limiar de 1,81 foi utilizado para os dados de todos os TiBs, sendo possível identificar a data de enchente e de vazante para cada estação para cada TiB, e portanto, analisar e o comportamento espacial da inundação na região de estudo. Para avaliar as datas de enchente e vazante determinados pelos TiBs eram correspondentes, as mesmas foram identificadas na hidrógrafa e correlacionadas.

4. Resultados

De uma forma geral, os dados dos sensores e a metodologia abordada possibilitaram observar o pulso de inundação na região de estudo. A figura 2 apresenta a correlação entre a altitude do nível da água na hidrógrafa no início e no final da inundação nas datas identificadas pelos TiBs.

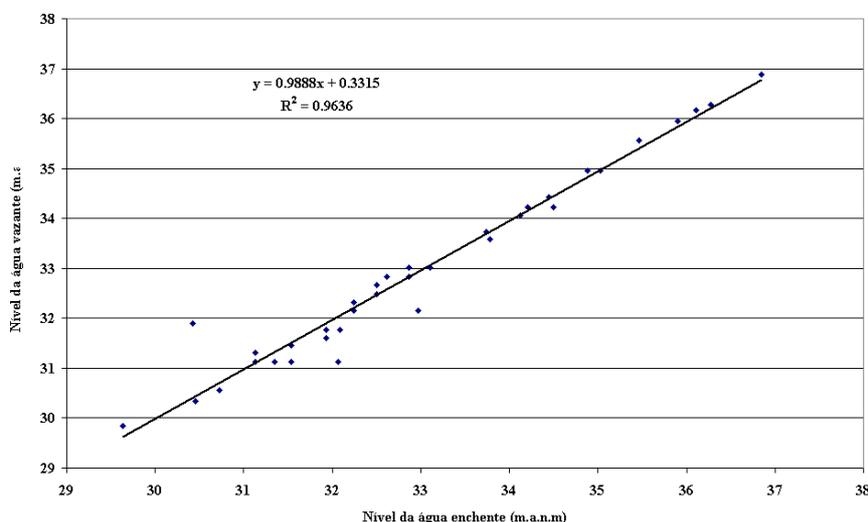


Figura 2: Correlação entre a altitude do nível da água na hidrógrafa no início e no final da inundação nas datas identificadas por cada TiB. (m.a.n.m.= metros acima do nível do mar).

Durante o período de coleta de dados para esse trabalho, ocorreu a segunda maior cheia dos últimos 50 anos (CPRM, 2009), sendo que o nível da água medido na régua da reserva atingiu a máxima de 38.33 metros acima do nível do mar nos dias 17 e 18 de Junho de 2009. A figura 3 apresenta as datas de inundação de cada TiB, sua posição na árvore, sua altitude (metros acima do nível do mar) e a localização de cada estação no mapa.

Os TiBs iniciaram o processo de gravação no dia 29 de novembro de 2008 e encerraram no dia 5 de novembro de 2009. O sensor que ficou mais tempo inundado estava localizado na estação 6 a 30,44 m.a.n.m, próximo ao canal principal da planície. Ele ficou inundado por 10 meses, de 3 de dezembro de 2008 a 19 de setembro de 2009.

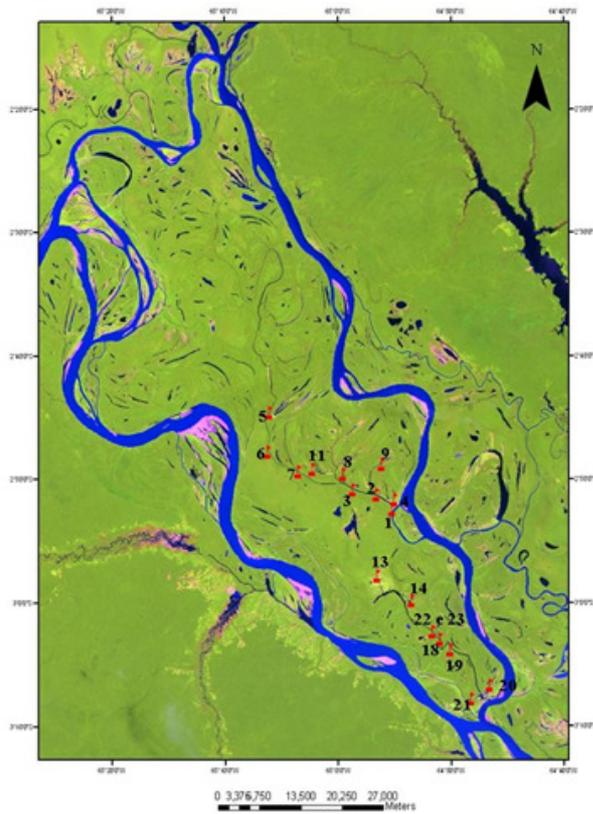
O registro da inundação pelos sensores localizados mais próximos ao solo (posição 1 na árvore), e com altitudes variando de 27,6 a 35,78 m.a.n.m., ocorreu de 3 de dezembro de 2008 a 1 de març o de 2009, sendo que 70% foi inundado no mês de janeiro de 2009.

No período que variou de 15 dias a 2 meses, a água subiu de 2,5 metros a 3,5 metros, aproximadamente, chegando a 38,29 m.a.n.m., na estac o 19.

Infelizmente, nem todos os TiBs da última posição, das estac es recuperadas, puderam ser lidos e em alguns casos nem foram recuperados. Somente 50% foram resgatados e lidos com sucesso. Como os TiBs foram presos nas árvores, estavam sujeitos às intemp rias da natureza, sendo que duas árvores caíram (estac es 13 e 14), e os dados apesar de recuperados, apresentam algumas discrepâncias quanto a data de vazante. Os Tibs colocados na posição mais elevada registraram a vazante após os localizados mais abaixo.

O último registro de inundação ocorreu no dia 15 de Abril de 2009, sendo que esse sensor permanecendo inundado por aproximadamente 4 meses, até o dia 3 de agosto de 2009, sendo este o primeiro registro da vazante.

O período de vazante registrado pelos sensores teve início em 3 de agosto e terminou em 19 de setembro de 2009. A velocidade de descida da água nas estac es em que havia os sensores na última e na primeira posição variou de 9 a 20 dias, ou seja, nesse período a água desceu entre 2,5 a 3,5 metros. Contrastando com a velocidade de alagamento que foi de 15 dias a 2 meses para subir a mesma altura. Essa diferenç a de tempo para a subida e a descida da água provavelmente   relativa   distância horizontal e vertical de cada estac o em relação ao corpo d'água mais próximo. Apesar de todas as estac es serem perto de canais ou lagos, essa distância variou de 2 a 5 metros, no caso da distância vertical, e de 1,2 a 500 metros na distância horizontal.



Posição na árvore	Estação 1												Altitude (m. a.n.m)	
6														35.60
5														35.10
4														34.60
3														34.16
2														33.63
1														33.20
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 2												Altitude (m.a.n.m)	
6														32.34
5														31.84
4														31.34
3														30.84
2														30.04
1														29.84
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 3												Altitude (m.a.n.m)	
5														37.58
4														37.08
3														36.58
2														36.08
1														35.58
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 4												Altitude (m.a.n.m)	
6														NA
5														NA
4														NA
3														NA
2														NA
1														NA
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 9												Altitude (m.a.n.m)	
6														33.10
5														32.60
4														32.10
3														31.60
2														31.10
1														30.60
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 5												Altitude (m.a.n.m)	
7														33.29
6														32.79
5														32.29
4														31.79
3														31.29
2														30.79
1														
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 11												Altitude (m.a.n.m)	
6														30.16
5														29.66
4														29.16
3														28.66
2														28.16
1														27.66
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 6												Altitude (m.a.n.m)	
7														33.44
6														32.94
5														32.44
4														31.94
3														31.44
2														30.94
1														30.44
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 13 - Árvore caída												Altitude (m.a.n.m)	
6														30.93
5														30.43
4														29.93
3														29.43
2														28.93
1														28.43
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

Posição na árvore	Estação 7												Altitude (m.a.n.m)	
6														29.76
5														29.26
4														28.76
3														28.26
2														27.76
1														27.26
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

 **TiBs não recuperados ou não lidos**
 **TiBs não recuperados ou não lidos, mas inundados**

Posição na árvore	Estação 8												Altitude (m.a.n.m)	
6														32.66
5														32.16
4														31.66
3														31.16
2														30.66
1														30.16
	dez-08	jan-09	fev-09	mar-09	abr-09	mai-09	jun-09	jul-09	ago-09	set-09	out-09	nov-09	dez-09	Mês - Ano

(cont.)

(cont.)

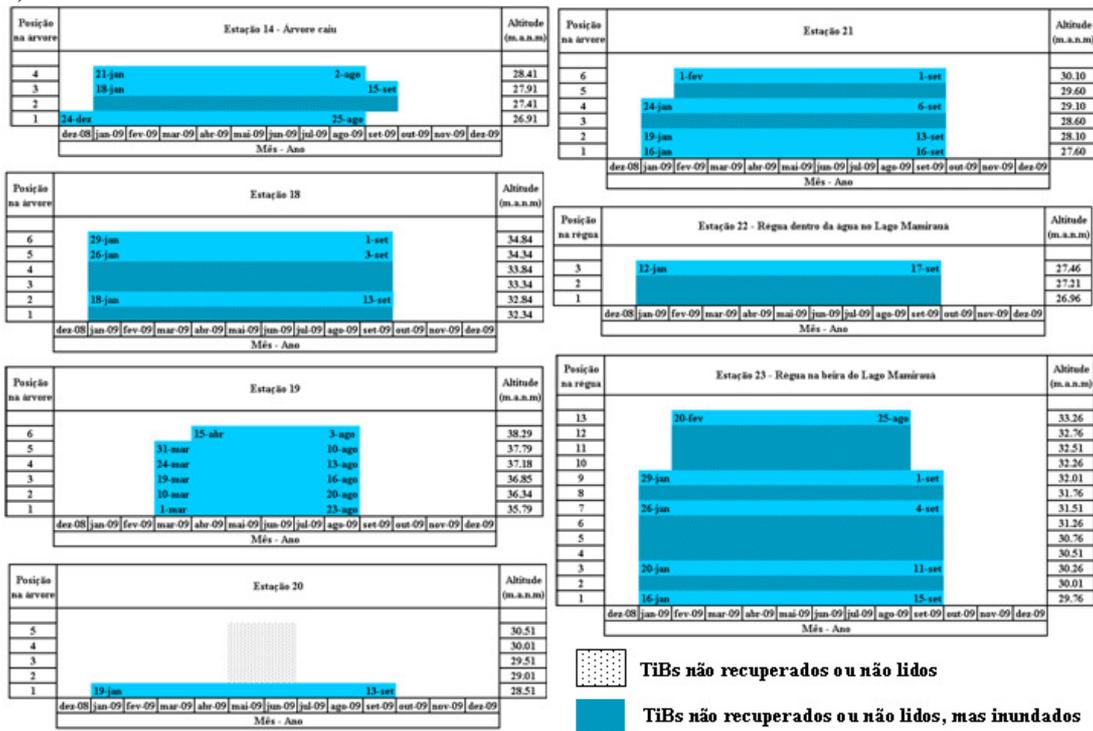


Figura 3: Data de inundação de cada TiB, sua posição na árvore, sua altitude (metros acima do nível do mar) e a localização de cada estação no mapa.

5. Conclusões

Os “termosensores” permitiram retratar a dinâmica de inundação na planície do Rio Solimões. Apesar de muitos não terem sido recuperados, foi possível observar a duração e a velocidade da enchente e da vazante na região.

A metodologia adotada permitiu identificar o período de inundação por meio da análise da variância da temperatura registrada pelos sensores. Ao analisar os dados de temperatura para cada estação, observa-se o grande desafio que é tentar modelar fenômenos da natureza. A enorme variabilidade das informações contidas, pois muitos TiBs ficaram expostos ao sol continuamente até serem cobertos pela água, outros ficaram na sombra durante todo o tempo, a temperatura variou de 14 °C a 46 °C, algumas árvores caíram. Muitos TiBs sumiram, mas os sacos plásticos onde estavam armazenados continuaram presos às árvores.

A existência da estação SIMA foi fundamental par determinar os limiares de definição das datas de alagamento. Como esse tipo de estação só se encontra disponível em um único outro lago da planície, o Lago Grande de Curuai, será necessário identificar outros métodos de análise dos dados que não dependam do cotejo entre a variabilidade da temperatura do ar e da água.

As próximas etapas nesse estudo são analisar a dinâmica de inundação por tipo de estrutura vegetal, e validar os mapas de inundação. Além disso, serão realizados testes para definir a melhor estratégia de proteção e distribuição dos iButtons na planície, de forma a melhor protegê-los da entrada da água, e da fauna local (muito sacos estavam rasgados com pequenos furos, e com formigas). Uma maneira seria a proteção com silicone, ou ainda a colocação em tubos de PVC. Em relação à informação disponibilizada pelos TiBs, como a maioria dos sensores foram inundados em datas muito próximas, e nenhum sensor localizado na última posição da estação ficou sempre fora da água, uma opção é colocar sensores em distâncias maiores. E ainda, aumentar o número de estações, para contornar os problemas da perda de estações por queda de árvores. Pretende-se também aplicar a mesma metodologia e limiares para os sensores distribuídos na Reserva de Piagaçu para testar o alcance do método.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Processo 08/07537-1), ao CNPq (Projeto 477885/2007-1; Processo 550373/2010-1), Adriana Gomes Affonso agradece a FAPESP (bolsa de doutorado, 2008/06661-0) e Laura Hess agradece à FAPESP (Bolsa Pesquisador Visitante).

6. Referências

Forsberg, B.R., Araujo-Lima, C.A.R.M., Martinelli, L.A., Victoria, R.L. and Bonassi, J.A. Autotrophic carbon sources for fish of the central Amazon. **Ecology**, v. 74, p. 643- 652, 1993.

Harley, C.D.G.; Helmuth, B.S.T. Local- and Regional-Scale Effects of Wave Exposure, Thermal Stress, and Absolute versus Effective Shore Level on Patterns of Intertidal Zonation **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 4, p. 1498-1508, 2003

Helmuth, B.S.T, Harley, C.D.G., Halpin, P.M., O'Donnell, M., Hofmann, G.E e Blanchette, C.A. Climate change and latitudinal patterns of intertidal thermal stress. **Science**, v. 298, p. 1015-1017, 2002.

Helmuth, B.S.T, Broitman, B.R., Blanchette, C.A., Gilman, S., Halpin, P., Harley, C.D.G, O'Donnell, M.J., Hofmann, G.E., Menge, B., Strickland, D. Mosaic patterns of thermal stress in the rocky intertidal zone: implications for climate change. **Ecological Monographs**, v. 76, p. 461–479, 2006.

Hess, L. L.; Melack, J. M.; Novo, E. M. L. M.; Barbosa, C. C. F.; Gastil, M. Dual season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment** v. 87, p. 404-428, 2003.

Hess, L.L., Affonso, A.G., Arraut, E.M., Novo, E.M.L.M., Gielow, R., Renó, V., Barbarisi, B. e Marioni, B. Evaluation of low-cost, tree-mounted temperature loggers for validation of satellite-based flood mapping on the Amazon floodplain. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011. Artigo submetido a este evento.

Junk W.J. e Da Silva C.J. Mammals, reptiles and amphibians. In: **The Central Amazon Floodplain, Ecology of a Pulsing System** (Ed. W.J. Junk),. Springer-Verlag, Berlin, 1997, p. 409–417.

Junk, W.J., Ohly, J.J., Piedade, M.T.F.; Soares, M.G.M. 2000 **The Central Amazon Floodplain: Actual Use and Options for a Sustainable Management.**- Backhuys Publishers b.V., Leiden, 584p.

Neil, C.; Elsenbeer, H.; Krusche, A. V.; Lehmann, J.; Markewitz; Figueiredo, R.de O. 2006. Hydrological and Biogeochemical Processes in a Changing Amazon: Results from small watershed studies and the Lage-Scale Biosphere- Atmosphere Experiment. **Hydrological Processes**. 20, 2467-2477.

Parolin, P.; Simone, O de; Haase, K; Waldhoff, D; Hottenberger, S; Kuhn, U; Kesselmeier, J; Kleiss, B; Schmidt, W; Piedade, M. T. F.; Junk, W J. **Central Amazonian floodplain forests: Botanical Review**, The New York Botanical Garden, v. 70, n. 3, p. 357-380, 2004.

Piedade, M.T.F.; Long, S.P.; Junk, W.J. Leaf and canopy photosynthetic CO₂ uptake of a stand of *Echinochloa polystachya* on the central Amazon floodplain. **Oecology**. v. 97, p. 193-201, 1994.

Ramalho, E.E., Macedo, J.,Vieira, T. M.,Valsecchi, J.,Calvimontes, J.,Marmontel, M.,Queiroz, H.L.Ciclo Hidrológico nos ambientes de várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá- Médio Solimões, período de 1990 a 2008. **Uakari**, v.5, n.1, p. 61-87, 2009

Sanchez-Botero J.I.; Araújo-Lima, C.A.R.M. As macrófitas aquáticas como berçário para a ictiofauna da várzea do Rio Amazonas. **Acta Amazônica**, v. 31, n. 3, p. 437-447, 2001.

Stech, J.L.; Novo, E.M.L.; Lima, I.B.T; Carvalho, J.C.; Assireu, A.T.; Lorenzetti, J.A.; Barbosa, C.C.; Rosa, R.R.Telemetric monitoring system for meteorological and limnological data acquisition in aquatic environments. In: Congress of the International Association of Limnology, 29, 2004, Estocolmo. **Anais: Congress of the International Association of Limnology**. Estocolmo : International Society of Limnology, 2004. p. 1-4.

Tully, R. The use of low cost “iButton” Temperature Logger Arrays to Generate High Spatial Resolution Tidal Inundation Regime Data. **Report on CICEET**, 2007, 40p.