



Universidade Federal do Amapá  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação



Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical

Mestrado e Doutorado

UNIFAP / EMBRAPA-AP / IEPA / CI - Brasil

JONAS RODRIGUES NUNES FILHO

MODELAGEM DA INUNDAÇÃO DE FLORESTAS DE VÁRZEA DO  
ESTUÁRIO AMAZÔNICO

MACAPÁ, AP

2016

JONAS RODRIGUES NUNES FILHO

MODELAGEM DA INUNDAÇÃO DE FLORESTAS DE VÁRZEA DO ESTUÁRIO  
AMAZÔNICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPGBIO), sediado na Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biodiversidade Tropical.

Orientador: Dr. Marcelino Carneiro Guedes

Co-orientador: Dr. Leonardo José Gonçalves Aguiar

MACAPÁ, AP

2016

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Biblioteca da Embrapa Amapá

634.9

N972m Nunes Filho, Jonas Rodrigues.

Modelagem da inundação de florestas de várzea do estuário amazônico / Jonas Rodrigues Nunes Filho; orientador, Marcelino Carneiro Guedes. – Macapá, 2016.

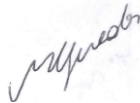
132 f.

Dissertação (mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical

1. Floresta Tropical. 2. Chuva. 3. Precipitação pluvial. 4. Modelo de Simulação. I. Guedes, Marcelino Carneiro, orientador. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

**JONAS RODRIGUES NUNES FILHO**

MODELAGEM DA INUNDAÇÃO DE FLORESTAS DE VÁRZEA DO ESTUÁRIO  
AMAZÔNICO



---

Orientador: Dr. Marcelino Carneiro Guedes  
Embrapa Amapá



---

Co-Orientador: Dr. Leonardo José Gonçalves Aguiar  
Universidade Federal de Pelotas (UFPEL)



---

Examinador: Dr. Alan Cavalcanti da Cunha  
Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)



---

Examinadora: Dra. Valdenira Ferreira dos Santos  
Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Amapá (IEPA)

Aprovada em 30 de maio de 2016, Macapá, AP, Brasil

*À Deus, que nos criou. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.*

*Aos meus pais, Jonas Rodrigues e M<sup>a</sup> Lúcia Trindade, pelos ensinamentos e exemplos de vida.*

*À todos meus familiares e amigos que fazem parte da minha vida e se alegrarão juntamente comigo por mais essa conquista.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, minha fortaleza.

Aos meus pais, Jonas Rodrigues e Maria Lúcia Trindade, que com muito amor e dignidade educaram, brilhantemente, a mim e a meus irmãos.

Aos meus familiares, irmãos, sobrinhos, tios, tias, avós, que de maneira direta e indireta me incentivaram nesse processo.

Aos meus orientadores Marcelino Guedes e Leonardo Aguiar, que com muita sabedoria, paciência e amizade me conduziram nesse processo que não foi nada fácil. Muito obrigado mesmo! Além da orientação, participaram com companheirismo e incentivo, algo fundamental para além de formar um excelente profissional, contribuir na formação de excelentes pessoas para a sociedade.

À pesquisadora Ana Cláudia, pelo seu carinho e atenção comigo em todos os níveis de formação que venho, a cada dia, percorrendo junto com essa equipe que é excelente.

À Karen Mustin, pela amizade e enormes contribuições na realização desse trabalho.

À Hellen Santos, pelo amor, companheirismo e ajuda ao longo desse processo árduo, mas gratificante.

A todos que fazem parte da competente equipe do LASA-IEPA, liderada pela Dra. Valdenira Santos. Pelas contribuições diversas, como disponibilização do laboratório, ajuda em campo, orientações na execução do trabalho, sou muito grato!

Ao Chico, do laboratório de saneamento de água-IEPA, pela ajuda fundamental na execução desse trabalho.

À Embrapa Amapá, por toda estrutura fornecida para realização da pesquisa; bem como pelo pessoal de apoio, especialmente, os técnicos do Campo experimental de Mazagão: Adjard, Adinomar, Jonas, Enoque, Carlos, Barbosa. Em especial ao meu amigo Adjalma, que me deu preciosos conselhos durante as viagens de campo. Um dia eu chego lá!

Ao Centro de Hidrografia da Marinha - Banco Nacional de Dados Oceanográficos, pela disponibilização dos dados usados para a previsão das marés no Porto de Santana-AP.

Ao seu Jura e família, morador da foz do Mazagão, que por diversas vezes nos hospedou em sua casa, sempre com enorme generosidade, característica comum às famílias ribeirinhas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oferta da bolsa de mestrado ao longo desses 24 meses.

Aos professores que fazem parte do quadro de docentes do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, por repassarem seus conhecimentos acerca da rica diversidade do nosso ecossistema amazônico.

A todos meus amigos que fazem parte da família FLORESTAM, que contribuíram significativamente para a realização desse projeto de pesquisa, em especial ao Edy, Breno, Dani, Jeff, Zenaide, Jadson, Ezaquiel, Luiz, Maysa, Elaine, Isaí.

Aos meus amigos/colegas da turma do PPGGIO-2014, Adriano, Adriele, Águeda, Flavinha, Chico, Diego, Geison, Luany, Luiz, Maíria, Marcus, Celeste (peito frio), Rafael, Telma e Wellinson.

Enfim, obrigado a todos que de alguma forma participaram dessa pesquisa.

*“O conhecimento serve para  
encantar as pessoas, não  
para humilhá-las.”*

*Cortella, M. S.*

## RESUMO

A bacia amazônica é formada pela mais extensa rede hidrográfica do mundo, produzindo, aproximadamente, 20% da descarga de água doce da Terra. A disponibilidade e os níveis de água na bacia amazônica afetam tanto a biodiversidade, quanto os meios de subsistência humanos. A inundação da floresta de várzea estuarina é afetada pela precipitação dentro da área de captação da bacia, mas também pelas marés semidiurnas originadas do oceano. Com isso, ocorrem variações com o tempo, desde variações diárias até ao longo do ano, e também segundo um gradiente espacial formado pela posição dos tributários em relação à região costeira do rio Amazonas. Para analisar esse gradiente, foram coletados dados de variação no nível da água no porto de Santana e em três sensores de pressão instalados em diferentes tributários (rios Mazagão, Maracá e Ajuruxi) do canal norte do Amazonas. As variações das marés em afluentes do estuário do Amazonas estão fortemente relacionadas às marés previstas no Porto de Santana, com possibilidades de extrapolação das previsões oficiais para outros rios ao longo do estuário. Nos três tributários foram observados efeitos sazonais e de maré. A variação média nas amplitudes do nível da água foi de 2,1 m a 2,4 m, identificando as várzeas do município de Mazagão como região de "mesomaré". Os resultados mostram ainda que as amplitudes diminuem com a distância da costa e que o tempo de parada da maré (estofa) ocorre mais tardiamente, quanto mais para o interior. Esses resultados têm implicações importantes para a gestão das várzea de marés, e para o planejamento de transporte fluvial no estuário do Amazonas. Para melhor entendimento de como as condições de inundação afetam as comunidades humanas e de plantas em regiões específicas, é necessária a determinação da área e do número de horas em que essa região encontra-se alagada, segundo os ciclos diários e mensais de variação das marés, ao longo do ano. Para atender essa demanda, o segundo capítulo desta dissertação, teve como objetivo desenvolver um modelo de inundação, usando a plataforma de modelagem espacial Dinâmica EGO, que simule o tempo e a área inundada, em função do nível do relevo. Tal modelo tem como principais variáveis de entradas o microrelevo, juntamente com as informações dos canais de drenagem, e a variação dos níveis de inundação pelas marés. Com os resultados obtidos com a simulação do modelo desenvolvido, foram confirmados os padrões encontrados com o monitoramento da maré ao longo do estuário, verificados no capítulo 1. O mês de junho, representando o semestre com níveis superiores de precipitação, foi o que teve maior área inundada por maior período, em todas as fases da lua. Já em novembro, representando o semestre com baixos níveis de precipitação, a área e tempo de



inundação foi bem inferior. Portanto, foi possível desenvolver um modelo coerente com as realidades das florestas de várzea estuarina utilizando o software Dinamica Ego.

**Palavras-chave:** rio Amazonas; marés semidiurnas; áreas inundadas; modelagem; dinamica Ego.

### ABSTRACT

The Amazon Basin is composed of the most extensive hydrographic basin in the world, producing approximately 20% of global freshwater discharge. Both biodiversity and human livelihoods are affected by water levels in the basin, which vary throughout the year and along the spatial gradient of the river system. Water levels in the Amazon Estuary are affected not only by precipitation levels, but also by semi-diurnal tides. Analysing data from three tidal gauges installed along the estuary at increasing distance from the coast shows that the tidal variations in tributaries of the Amazon estuary are strongly related to predicted tides at the coast, meaning that these predictions could be extrapolated throughout the estuary. Seasonal and tidal effects are apparent in all three tributaries and the tidal ranges are, on average, between 2.1 and 2.4m which identifies the region as one of “meso-tides”. The data show that tidal ranges decrease with increasing distance from the coast, and that the high and low tide peaks occur later further inland. These results have important implications for management of tidal várzea, and for planning of fluvial transport of all types in the Amazon estuary. In order to better understand how the inundations affect human and plant communities in specific regions it is necessary to determine the duration of the period of inundation in this region throughout the year. The second part of this study therefore had the objective of developing a model of inundation, using the spatial modelling platform Dinâmica EGO, to simulate the time for which each area would be flooded, according to its elevation. The inputs to the model include micro-elevation, information regarding drainage canals, and variation in tidal levels. The model results conform with the findings of chapter one in relation to tidal patterns along the estuary. The results show that in the month of June, chosen to represent the period of highest precipitation, the area flooded is larger and the duration of flooding is longer, in all lunar phases, in comparison with the month of November. Indeed, in November the flooded area was substantially less than in June, and the duration of flooding was also less. Therefore, it was possible to develop a model that represents the realities of várzea forests using the software Dinâmica Ego.

**Keywords:** Amazon River; semi-diurnal tides; flooded areas; modeling; Dinamica Ego.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Fig. 1.</b> Marés de Sizígia e marés de Quadraturas. Fonte: Miguens (1996) .....	15
<b>Fig. 2.</b> Elementos da maré. Fonte: Miguens (1996) .....	16
<b>Fig. 3.</b> Mapa da área de estudo mostrando as localizações dos sensores de pressão instalados. Fonte: Jonas Rodrigues.....	31
<b>Fig. 4.</b> Amplitude das marés (m) nos três locais onde foram instalados os sensores de pressão, em relação à amplitude de maré no Porto de Santana, entre março de 2014 e Fevereiro de 2015, ao longo da costa - (a) Mazagão, (b) Maracá e (c) Ajuruxi.....	36
<b>Fig. 5.</b> Nível de água (m) medidos pelos sensores de pressão entre março 2014 e fevereiro de 2015, ao longo da costa - (a) Mazagão, (b) Maracá e (c) Ajuruxi.....	38
<b>Fig. 6.</b> Níveis de água (m) registrados pelos sensores de pressão no mês de abril de 2014 (níveis anuais mais elevados) e outubro de 2014 (níveis anuais mais baixos) ao longo da costa - (a, b) Mazagão, (c, d) Maracá e (e, f) Ajuruxi .....	39
<b>Fig. 7.</b> Duração (em minutos) das marés enchentes (círculos vazios) e das vazantes (círculos cheios) nos meses de abril (a, c, e) e outubro (b, d, f) de 2014, nos três locais dos sensores ao diminuir a distância para a costa - Mazagão (a, b), Maracá (c, d) e Ajuruxi (e, f).....	40
<b>Fig. 8.</b> Amplitude das marés (m) calculadas subtraindo-se os mínimos das marés semidiurnas de cada valor de nível de água, durante os dois dias representativos, para o mês com maiores níveis de água e para o mês com níveis mais baixos (16 de Abril de 2014 (a) e 09 de outubro de 2014 (b), respectivamente) .....	43
<b>Fig. 9.</b> Distribuição da frequência das amplitudes de maré (m) ao longo do período de 12 meses entre março de 2014 e fevereiro 2015 nos três locais monitorados - (a) Mazagão, (b) Maracá e (c) Ajuruxi .....	44
<b>Fig. 10.</b> Tempo (em minutos) entre os estofos de baixamar e preamar no Porto de Santana e os estofos de maré nos três locais instalados os sensores, ao diminuir a distância para o oceano. As linhas em negrito representam a mediana entre março 2014 - fevereiro de 2015, as linhas tracejadas mostram o intervalo de confiança de 95% em torno da mediana, as caixas representam os limites dos primeiro e terceiro quartis, as linhas tracejadas representam 1,5 vezes o intervalo interquartil, e os pontos a gama completa dos dados .....	45
<b>Fig. 11.</b> Localização da área de estudo, na foz do rio Mazagão, situada no município de Mazagão-AP. Fonte: Jonas Rodrigues.....	59

<b>Fig. 12.</b> Ilustração do processo de caracterização do relevo por meio da metodologia de mangueira de nível, pelo princípio dos vasos comunicantes.....	60
<b>Fig. 13.</b> Ilustração de como o marégrafo está instalado na área de estudo. O sensor do marégrafo está conectado numa régua de madeira e a mesma está acoplada a um mastro. ....	63
<b>Fig. 14.</b> Temas dos dados de entrada inseridos no modelo. Relevo aumentado em 10 metros (a), profundidade canais de drenagem em cm (b), distância dos canais de drenagem (c), distância do Rio Amazonas (d) e mapa com horas de alagamento inicial (e). ....	65
<b>Fig. 15.</b> Fluxograma do funcionamento do modelo desenvolvido nesse trabalho. ....	67
<b>Fig. 16.</b> Relações adotadas no modelo para a determinação da porcentagem média da vazão para cada célula, no caso da maré enchente. Sendo em função da distância para os canais (a), distância para o rio Amazonas (b) e a altura da coluna d'água (c). ....	68
<b>Fig. 17.</b> Relações adotadas no modelo para a determinação da porcentagem média de vazão para cada célula, em caso da maré vazante, quando existem canais de drenagem dentro das massas de água. Sendo em função da distância para os canais (a), distância para o rio Amazonas (b) e a altura da coluna d'água (c). ....	70
<b>Fig. 18.</b> Relações adotadas no modelo para a determinação da porcentagem média de vazão para cada célula, em caso da maré vazante, quando não existem canais de drenagem dentro das massas de água. Sendo em função da distância para o rio Amazonas (a), altura do relevo (b) e a altura da coluna d'água (c). ....	71
<b>Fig. 19.</b> Mapas de inundação da área de estudo durante o dia de virada da lua para o mês de junho. Sendo lua cheia (a); lua minguante (b), lua nova (c) e lua crescente (d). ....	73
<b>Fig. 20.</b> Mapas de inundação da área de estudo durante o dia de virada de cada fase da lua, para o mês de novembro. Sendo lua cheia (a); lua minguante (b), lua nova (c) e lua crescente (d). ....	76

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Médias anuais das amplitudes das marés, da duração da enchente e vazante, da duração do estofo da preamar e da baixamar, e o tempo de diferença entre o estofo da preamar e baixamar no Porto de Santana e nos três locais dos sensores entre março de 2014 e fevereiro 2015. Entre parênteses podem ser observados o tamanho da amostra (n - medida em dias), e o intervalo de confiança (com 95% de certeza).....	41
<b>Tabela 2:</b> Exemplo demonstrando o procedimento usado no processamento dos dados do levantamento do microrelevo da área de estudo.....	61
<b>Tabela 3</b> Simulação do tamanho da área (m <sup>2</sup> ) inundada a cada hora, segundo cada dia de mudança da fase lunar ao longo do mês de junho .....	72
<b>Tabela 4</b> Simulação do tamanho da área (m <sup>2</sup> ) inundada a cada hora, segundo cada dia de mudança da fase lunar ao longo do mês de novembro .....	74

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. As florestas de várzea .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Conceitos básicos sobre Maré .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.1. Marés de Sizígia e marés de quadratura.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2. Alguns conceitos relacionados com marés .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3. Dinâmica das marés em áreas de várzea e sua interação com a floresta.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4. Modelos hidrológicos .....</b>	<b>18</b>
<b>2. HIPÓTESES .....</b>	<b>20</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Geral.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Específicos.....</b>	<b>21</b>
<b>4. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 1: PADRÕES DO PULSO DE INUNDAÇÃO POR MARÉS EM FLORESTA DE VÁRZEA DO ESTUÁRIO AMAZÔNICO .....</b>	<b>25</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>26</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>28</b>
<b>Material e Métodos .....</b>	<b>31</b>
<b>Área de Estudo .....</b>	<b>31</b>
<b>Coleta dos dados.....</b>	<b>32</b>
<b>Análise dos dados .....</b>	<b>33</b>
<b>Relação entre as variações das marés nos afluentes e no Porto de Santana.....</b>	<b>33</b>
<b>Padrão da variação temporal do nível da água ao longo do ano .....</b>	<b>34</b>
<b>Variação espacial nos padrões de maré entre os três afluentes .....</b>	<b>34</b>
<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>36</b>
<b>Relação entre as variações das marés nos afluentes e no Porto de Santana.....</b>	<b>36</b>
<b>Padrão de variação temporal nos níveis de água ao longo do ano.....</b>	<b>38</b>
<b>Variação espacial nos padrões de maré entre os três afluentes .....</b>	<b>43</b>
<b>Conclusão.....</b>	<b>47</b>
<b>Considerações acerca dos Próximos passos e das Implicações desse trabalho.....</b>	<b>48</b>
<b>Referências .....</b>	<b>50</b>
<b>CAPÍTULO 2: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE INUNDAÇÃO PARA FLORESTAS DE VÁRZEA ESTUARINAS .....</b>	<b>55</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>56</b>

<b>Introdução .....</b>	<b>57</b>
<b>Material e métodos.....</b>	<b>58</b>
<b>Área de Estudo .....</b>	<b>58</b>
<b>Coleta dos Dados .....</b>	<b>60</b>
<b>Determinação do microrelevo e mapeamento dos canais de drenagem.....</b>	<b>60</b>
<b>Uso do DGPS para determinar a altitude do ponto inicial e do sensor.....</b>	<b>62</b>
<b>Dados de Maré.....</b>	<b>62</b>
<b>Desenvolvimento do Modelo.....</b>	<b>64</b>
<b>Dados de entrada.....</b>	<b>64</b>
<b>Processamento do modelo.....</b>	<b>65</b>
<b>Processo da enchente.....</b>	<b>68</b>
<b>Maré da vazante .....</b>	<b>69</b>
<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>72</b>
<b>Áreas inundadas por período lunar em função da sazonalidade.....</b>	<b>72</b>
<b>Primeiro semestre do ano-Inverno (junho).....</b>	<b>72</b>
<b>Segundo semestre do ano – Verão (novembro) .....</b>	<b>74</b>
<b>Conclusão.....</b>	<b>78</b>
<b>Referências .....</b>	<b>79</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE 2 .....</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE 3 .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE 4 .....</b>	<b>109</b>

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo, abrangendo uma área de aproximadamente 5,1 milhões de km<sup>2</sup> (Costa Neto e Rosário 2008). É considerada o maior reservatório natural de diversidade vegetal do planeta, em que cada um de seus distintos ambientes florestais possui um contingente florístico rico e variado, muitas vezes exclusivo desse determinado ambiente (Oliveira e Amaral 2004). A floresta de várzea é um desses ambientes que possui elementos exclusivos e várias espécies endêmicas, que desenvolveram mecanismos de adaptação ao ambiente inundado.

Em geral, a literatura apresenta duas classificações para a várzea: a primeira quanto ao tipo de água existente nos rios, e a outra quanto à posição topográfica. A classificação quanto ao tipo de água foi proposta por Sioli (1964), em função da transparência e da cor da água dos rios amazônicos: várzeas de rios de água branca ou barrenta, de rios de água limpa e de rios de água preta. Quanto ao relevo, a várzea é classificada em várzea alta, baixa e igapó, conforme descrição proposta por Lima et al. (2001).

As várzeas do baixo Amazonas são planícies com cobertura vegetal que sofrem periódicas inundações por águas barrentas, seguindo dois ciclos diários de enchente e vazante devido às marés oceânicas, ricas em sedimentos e nutrientes. A vegetação arbórea que faz parte desses ambientes é denominada floresta de várzea de maré, ou floresta de várzea estuarina.

### **1.1. As florestas de várzea**

As florestas tropicais da Amazônia podem ser classificadas como florestas não alagáveis (florestas de terra firme), que ocorrem em terrenos relativamente mais elevados, e florestas alagáveis (florestas aluviais), que ocorrem nas planícies de inundação às margens dos grandes rios (Pires e Prance 1985). As florestas aluviais estão sujeitas a alagamentos sazonais ocasionados por um pulso de inundação devido ao transbordamento marginal dos grandes rios da Amazônia (Junk 1989). De acordo com Prance (1979), as florestas aluviais que ocorrem nas margens dos grandes rios de águas barrentas originados nos Andes, são conhecidas como florestas de várzea.

As florestas de várzea estão nos terrenos da bacia Amazônica e os rios que passam por estas planícies carregam grande quantidade de sedimentos provenientes do processo de erosão de seus leitos (Luize 2010).

As áreas de várzea existentes na foz do rio Amazonas, em toda a região que se encontra sob a influência das marés, fazem parte da composição do ambiente conhecido como estuário amazônico, região estuarina, ecossistemas estuarinos, entre outros (Queiroz 2004).

Rabelo (1999) afirma que o ciclo de inundação das áreas de várzea estuarina está sob influência diária do ciclo de inundação das marés. Diferenciando-se assim da várzea “comum”, sob influência do ciclo de inundação apenas das cheias dos rios, que ocorre no médio Amazonas. As várzeas do médio Amazonas são alagadas sazonalmente, por precipitação originada pelo regime de chuvas na região Andina, o que provoca a flutuação anual, regular e de grande amplitude no nível da água do Rio Amazonas (Affonso et al. 2011).

A área de abrangência e maior concentração das várzeas estuarinas ocorre principalmente em margens de rios de águas barrentas e passa a ser regulada pelos regimes de marés. As maiores florestas de várzea estuarina do Estado do Amapá ocorrem ao longo da orla amazônica, adentrando pelos estuários e baixos cursos dos inúmeros rios que aí deságuam (Zoneamento Ecológico-Econômico 2008).

Os solos existentes nessas florestas tiveram origem a partir dos sedimentos pelíticos e areias finas contidos nas águas do rio Amazonas. Ao longo da época holocênica precipitaram, constituindo os solos formados no período quaternário na região da sua foz (Queiroz 2004).

Dentre as diferenças entre as várzeas Amazônicas, destaca-se que as mesmas são submetidas basicamente a dois regimes de inundações, que são as enchentes periódicas dos rios, e as enchentes diárias resultantes das marés (Lima and Tourinho 1996). Para Piedade et al. (2006), as plantas desse ambiente evitam a perda do solo e da sua fertilidade, pois as mesmas diminuem a erosão provocada pela correnteza, e ainda fornecem madeira e diversos produtos não madeireiros para as populações ribeirinhas e o mercado regional.

## **1.2. Conceitos básicos sobre Maré**

As definições apresentadas a seguir foram obtidas no livro do Miguens (1996), chamado “Navegação: A ciência e a Arte”.

### **1.2.1. Marés de sizígia e marés de quadratura**

As forças de atração da Lua e do Sol se somam duas vezes em cada lunação (intervalo de tempo entre duas conjunções ou oposições da lua, que é em média 29,530588 dias). Isso ocorre por ocasião da lua nova e da lua Cheia, produzindo marés de sizígia (ou de águas vivas), com maiores amplitudes entre preamares (PM-período de parada da maré alta) e baixamares (BM-período de parada da maré baixa). Por ocasião da lua quarto crescente e quarto minguante,



ocorrem marés de quadratura (ou de águas mortas), com preamares mais baixas e baixamares mais altas, e, portanto, menores amplitudes, conforme Fig. 1.

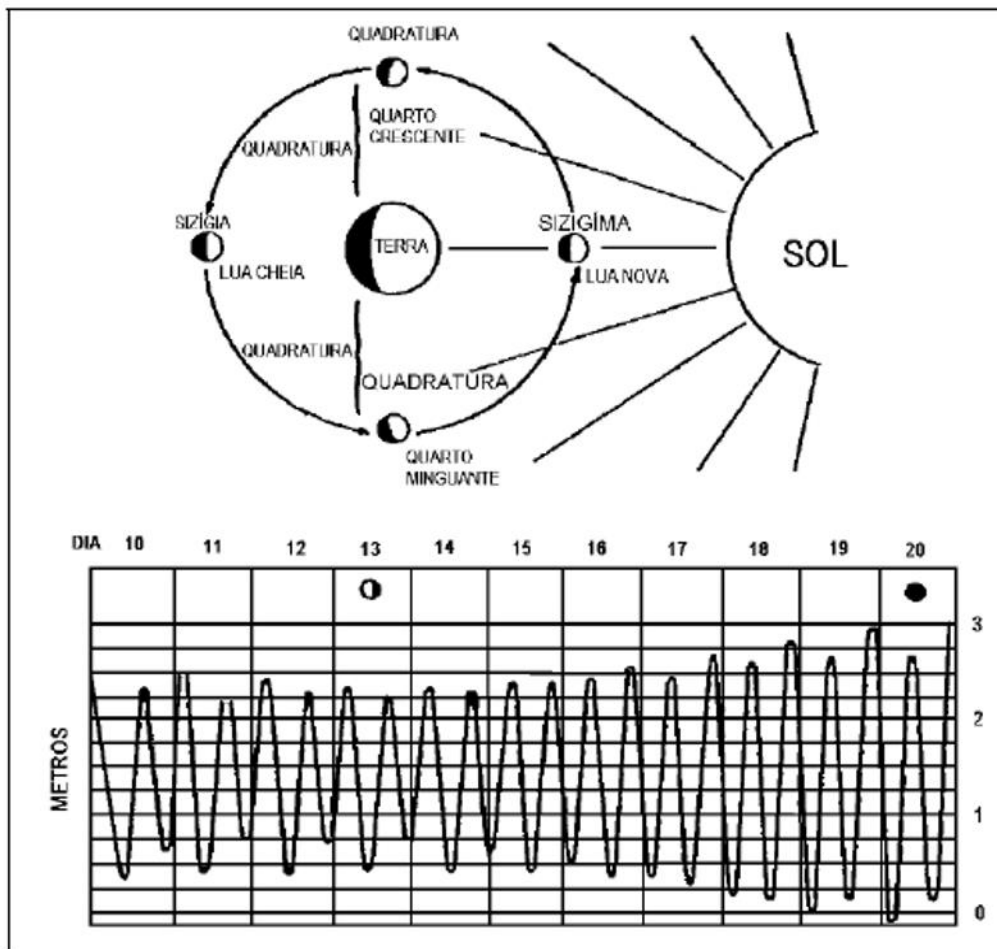


Fig. 1. Marés de Sizígia e marés de Quadraturas. Fonte: Miguens (1996)

### 1.2.2. Alguns conceitos relacionados com marés

O movimento rítmico do nível das águas é uma função periódica do tempo e pode ser representado segundo dois eixos ortogonais, onde o eixo vertical indicará a altura da maré ( $h$ ) e o eixo horizontal o instante em que ocorre aquela altura ( $t$ ), conforme Fig. 2.

- Preamar (PM): maior altura que as águas alcançam em uma oscilação; igual a  $h_{PM}$  e acontece nos instantes  $t_c$  e  $t_i$ .
- Baixamar (BM): menor altura que as águas alcançam em uma oscilação; igual a  $h_{PM}$  e acontece no instante  $t_e$ .
- Amplitude de maré: distância vertical entre uma PM e uma BM consecutivas, igual a  $h_{PM} - h_{BM}$ .

- Enchente: intervalo de tempo durante o qual o nível de água se eleva; duração da enchente =  $t_i - t_e$ .
- Vazante: intervalo de tempo durante o qual o nível de água baixa; duração da vazante =  $t_e - t_c$ .
- Estofo de maré: período durante o qual o nível de água fica praticamente estacionado. Pode ser estofo de enchente ( $t_d - t_b$ ) ou de vazante ( $t_g - t_f$ ).
- Ciclo de maré: período de tempo entre uma PM e a BM que lhe segue.
- Altura da maré: distância vertical entre o nível de água em um determinado instante e o nível de redução (plano de referência que constitui a origem de contagem das profundidades e das alturas da maré).
- Nível médio (NM): altura média da superfície do mar em todos os estágios de oscilação da maré, observados em um longo período de tempo (superior a 18,6 anos) e considerado como equivalente ao nível que existiria na ausência das forças geradoras das marés. O nível médio é normalmente adotado como plano de referência para a medida das altitudes.

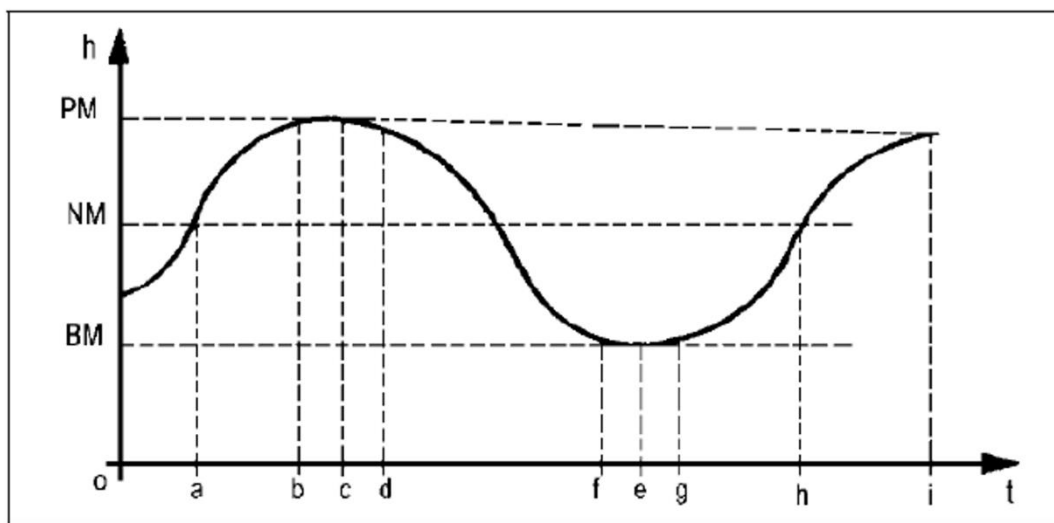


Fig. 2. Elementos da maré. Fonte: Miguens (1996)

### 1.3. Dinâmica das marés em áreas de várzea e sua interação com a floresta

É constatado a existência de dois diferentes tipos de várzeas que ocorrem na região Norte. Uma é a várzea do médio Amazonas que sofre dois ciclos de inundações anuais e a outra é a várzea estuarina, que recebe diariamente dois ciclos de inundações pelas marés.

A constante interação que ocorre entre os solos e a floresta de várzea junto com a água e sua rede de drenagem, depende do embate de forças entre a água do Amazonas que sobe os

afluentes com a enchente das marés e a água das bacias de drenagem dos afluentes que atinge o Amazonas durante a vazante (Pinto 2014)

O rio Amazonas desloca sedimentos que totalizam cerca de 800 milhões de toneladas por ano. Esses sedimentos são originados das bacias hidrográficas de seus quase 7.000 afluentes, e também dos Andes. Existem fragmentos pelíticos das montanhas andinas que são carregados pela correnteza do Amazonas até 200 km dentro do oceano Atlântico (Portal Amazônia, 2005).

Devido as florestas de várzea serem cortadas por elevadas quantidades de canais, sendo rios secundários, terciários e canais de marés, mais ou menos extensos e profundos, a mistura de águas do Amazonas e do afluente adentra nos mesmos, formando uma vasta rede de drenagem. No período de maré alta, principalmente durante as luas nova e cheia, e nas temporadas de chuvas mais intensas, a força do Amazonas aumenta, os canais enchem mais e o rio principal transborda, inundando toda a floresta com água barrenta. É devido a constante entrada e saída de água com as marés, que são formados os canais de maré dentro da floresta, pois não existem nascentes nessas áreas. A força das águas permite, tanto a entrada, quanto a saída de sedimentos, e, conseqüentemente, o solo sedimentar dessas florestas está em constante formação (Pinto 2014).

As plantas que se desenvolvem em solos sujeitos a inundações se beneficiam da ação de mecanismos adaptativos envolvendo estruturas que propiciam a tolerância das plantas a esses ambientes. As respostas da floresta à inundação podem variar intensamente de acordo com as espécies, a sua constituição genética e a duração da inundação (Rogge et al. 1998). Existem espécies que possuem preferências por regiões mais inundadas e espécies que se desenvolvem melhor em ambientes menos inundados.

Interações, como essas, são a base da ecologia, pois asseguram o funcionamento dos ecossistemas (Dias et al. 2015; Ward et al. 2015; Cunha et al. 2005; Barbara et al. 2010; Laut et al. 2010). De acordo com a teoria dos ecossistemas, os sistemas vivos são controlados mais por relações dinâmicas do que por rígidas estruturas mecânicas, sendo que as taxas de trocas ou transformações são mais importantes do que os estoques (Guedes 2005). Portanto, estudos que abordam as interações entre a estrutura e do funcionamento da floresta com fatores abióticos, como a dinâmica da maré, necessitam de estudos mais aprofundados.

#### 1.4. Modelos hidrológicos

Os modelos de simulação, de um modo geral, podem ser definidos como a representação de um sistema com equações matemáticas, tentando simular o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real. O objetivo da modelagem é, então, compreender melhor o sistema e prever situações futuras, algumas vezes também reproduzir o passado, para direcionar as ações de decisão (Machado 2002).

A principal vantagem da aplicação de modelos reside na possibilidade do estudo de vários cenários diferentes de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais. Outra importante vantagem da utilização de simulação de cenários está associada a seu baixo custo. Na maioria das aplicações, o custo de executar um programa computacional é em ordens de magnitude menor do que o correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fator adquire maior importância à medida que o problema real estudado, apresenta maiores dimensões e complexidade (como uma bacia hidrográfica), além dos custos operacionais mais elevados relativos às pesquisas de campo (Pessoa et al. 1997).

Tucci et al. (1998) define modelo hidrológico como uma ferramenta empregada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados. Segundo Mendes (1996), os modelos hidrológicos lidam com fenômenos contínuos e dinâmicos, enquanto os SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) tratam apenas de dados estáticos e discretos. No campo conceitual, a análise é feita por meio da simulação do movimento da água e de seus constituintes, usando equações que representam leis físicas.

Uma das propriedades mais importantes de um modelo hidrológico é o grau de representação das variações espaciais e temporais nos parâmetros de entrada e saída. Pode-se, então, diferenciar entre um modelo concentrado e um modelo distribuído. Enquanto, nos modelos concentrados, assume-se que os parâmetros e variáveis variam somente com o tempo, define-se modelos distribuídos como aqueles em que os parâmetros e variáveis variam tanto no espaço quanto no tempo (Santos 2002).

Um dos modelos computacionais desenvolvidos para simulação de paisagens é o Dinamica – *Landscape Dynamic System*. Trata-se de um *software freeware* criado e mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

O Dinamica EGO é uma plataforma de modelagem desenvolvida para modelos espacialmente explícitos, também conhecidos como modelos de paisagem, modelos espaciais, ou mesmo modelos distribuídos. A sigla EGO significa *Environment for Geoprocessing Objects* (Ambiente para Geoprocessamento) (Soares-Filho et al. 2002).

## **2. HIPÓTESES**

Os padrões de variação dos níveis das mesomarés semidiurnas medidas no estuário do rio Amazonas podem ser relacionados com as previsões oficiais da Marinha, permitindo extrapolar essas previsões em função das variações espaciais e temporais.

É possível modelar a altura e o tempo de inundação da floresta de várzea usando o modelo Dinamica EGO, a partir da determinação do microrelevo da área e da variação nos níveis das marés.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Geral**

Estudar padrões de variação espacial e temporal das mesomarés no estuário do rio Amazonas e desenvolver um modelo de inundação próprio para a floresta de várzea estuarina, o qual possa prever a altura e o tempo de inundação de uma determinada área localizada em região com condições semelhantes.

#### **3.2. Específicos**

1) verificar as relações entre as medidas de níveis de maré e as previsões oficiais da Marinha, caracterizando a variação temporal e espacial do pulso de inundação por marés.

2) desenvolver um modelo preditivo de inundação em área de floresta de várzea na zona estuarina.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Affonso, A. G; Arraut, E. de. M; Renó, V. F; Leão, J. A. D; Hess, L; Queiroz, H; Novo, E. M. L. de. M. Estudo da dinâmica de inundação na várzea Amazônica através de termossensores de campo. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba-PR. 2011. INPE. p 5093.
- Barbara, V. F. ; Cunha, A. C. ; Rodrigues, A. S. L. ; Siqueira . Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari/AP. Revista Biociências. v. **16**, p. 57-72, 2010
- Costa Neto, S. V and Rosário, C. S. Análise fitossociológica das várzeas da RDS Itatupã e Baquia, Gurupá, Pará, Brasil. In: V Seminário de Iniciação Científica do IEPA Amapá. Revista: Pesquisa e Iniciação Científica Amapá. n.1. p.50. 2008.
- Cunha, A. C.; Nazare, A. S. ; Pantoja, S. ; Cunha, H. F. A. ; Souza, J. Monitoramento de Águas Superficiais em Rios Estuarinos do Estado do Amapá sob Poluição Microbiológica. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais, Belém - PA, v. **1**, n.1, p. 191-199, 2005.
- Dias, M. T.; Dias-Júnior, M. B. F.; Florentino, A. C.; Silva, L. M. A.; Cunha, A. L. Distribution pattern of crustacean ectoparasites of freshwater fish from Brazil. Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária. v. **24**, p. 136-147, 2015.
- Guedes, M. C. Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com *Eucalyptus Grandis*. Piracicaba, tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005, 154 p.
- Junk W. J. 1989. Flood tolerance and tree distribution in Central Amazonian floodplains. - In Nielsen L. B. et al. (eds) Tropical forests: botanical dynamics, speciation and diversity. Academic Press, pp. 47–64.
- Laut, L. L. M. ; Ferreira, D. E. S. ; Santos, V. F. dos ; Figueiredo JR, A. G. ; Carvalho, M. A.; Silveira, O. F. M. Foraminifera, Thecamoebians and Palynomorphs as Hydrodynamic Indicators in Araguari Estuary, Amazonian Coast, Amapá State ? Brazil. Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso), v. **33**, p. 52-65, 2010.
- Lima, R.R.; Tourinho, M.M.; Costa, J.P.C. da. Várzeas flúvio-marinhas da Amazônia brasileira: características e possibilidades agropecuárias. Belém: FCAP. Serviço de Documentação e Informação, 2001. 342 p.
- Lima, R. R. e Tourinho, M. M. Várzeas do Rio Pará, principais características e possibilidades agropecuárias. FCAP. Serviço de Documentação e Informação, Belém. 124p. 1996.



- Luize, B. G. A estrutura da floresta de várzea do baixo purus e sua relação com a duração da inundação. 2010. Dissertação de mestrado – Mestre em Biologia (Ecologia) – INPE. Manaus – AM, 2010. 56p.
- Machado, R. E., 2002. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo/SP.
- Mendes, C. A. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. (1996).
- Miguens, A. P. Marés e correntes de maré; correntes oceânicas. In: *Navegação: a ciência e a arte – navegação costeira, estimada e em águas restritas*. Niterói: DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação, órgão da Marinha do Brasil. 1996. Volume I, cap. 10, p. 227-2274.
- Oliveira, A. N. e Amaral, I. L. 2004. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. *Acta Amazônica* **34**:21- 34.
- Pessoa, M.C.P.Y.; Luchiari, A.J.; Fernandes, E.N. e Lima, M.A. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Jaguariúna, EMBRAPA/CNPMA, 1997. 83p. (EMBRAPA.CNPMA. Documentos, 8).
- Piedade, M. T. F. et al. Influência do pulso de inundação sobre várzeas e igapós na Amazônia. In: *Os avanços da Botânica no início do século XXI: morfologia, fisiologia, taxonomia, ecologia e genética*. 57º Congresso Nacional de Botânica. Porto Alegre: Sociedade Botânica do Brasil, 2006. 752 p.
- Pinto, E. R. Solos, hidrologia e estrutura populacional de prachuibeiras em florestas de várzea do Estuário Amazônico. 2014. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Amapá - UNIFAP. Amapá, Macapá. 2014.
- Pires, J. M. e Prance, G. T. 1985. The vegetation types of the Brazilian Amazon. – In Prance, G. T. and Lovejoy, T. E. (eds.) *Key environments: Amazonia*. Pergamon Press, pp. 109-145.
- Portal Amazônia. Enciclopédia Encarta, 2005. Disponível em: <http://www.portalamazonia.com.br/secao/amazoniadeaz/interna.php?id=40>. Acesso em: 20.dez. 2014.

- Prance G. T. 1979. Notes on the vegetation of Amazonia III. The terminology of Amazonian forest types subject to inundation - *Brittonia* **31**:26-38.
- Queiroz, J. A. L. de. Fitossociologia e Distribuição Diamétrica em Floresta de Várzea do Estuário do Rio Amazonas no Estado do Amapá. 2004. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Florestal – UFPR. Curitiba, 2004. 101p.
- Rabelo, F. G. Composição florística, estrutura e regeneração de ecossistemas florestais na região estuarina do rio Amazonas-Amapá-Brasil. 1999. Dissertação (Mestrado em Silvicultura e Manejo Florestal) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém. 1999.
- Rogge, G. D. et al. Metabolismo respiratório de raízes de espécies arbóreas tropicais submetidas à inundação. *Revista Brasileira de Botânica*, **v.21**, n.2, 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br>. Acesso em: 15. jan. 2015.
- Santos, R. C. Classificação textual aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- Silva, S. B. Avaliação da disponibilidade de nutrientes em várzea inundada do Rio Guamá. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém, 1993.
- Sioli, H. 1964. General features of the limnology of Amazonia. *Verh Internat. Verein, limnol.*, **15**:1053:1058.
- Soares Filho, B. S.; Pennachin, C. L.; Cerqueira, G. Dinamica. 2002. A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, **154**:217-235.
- Tucci, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.
- Ward, N. D. ; Krusche, A. V. ; Sawakuchi, H. O. ; Brito, D. C. ; Cunha, A. C. ; Moura, J. M. S.; da Silva, R.; Yager, P. L.; Keil, R. G.; Richey, J. E. The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River-Óbidos to the ocean. *Marine Chemistry*. **v. 177**, p. 244-256, 2015.
- Zoneamento Ecológico-Econômico (2008) Macrodiagnóstico do estado do Amapá primeira aproximação do ZEE. Macapá: IEPA, 2008. 3ª edição. 142p. URL <http://www.iepa.ap.gov.br/arquivopdf/macrodiagnostico.pdf>.

**CAPÍTULO 1: PADRÕES DO PULSO DE INUNDAÇÃO POR MARÉS EM  
FLORESTA DE VÁRZEA DO ESTUÁRIO AMAZÔNICO**

*Artigo submetido ao periódico "Wetlands Ecology and Management"*

## **Padrões do pulso de inundação em floresta de várzea do estuário amazônico**

### **Resumo**

A bacia amazônica é formada pela mais extensa rede hidrográfica do mundo, produzindo, aproximadamente, 20% da descarga de água doce da Terra. A disponibilidade e os níveis de água na bacia amazônica afetam tanto a biodiversidade, quanto os meios de subsistência humanos. A inundação da floresta de várzea estuarina é afetada pela precipitação dentro da área de captação da bacia, mas também pelas marés semidiurnas originadas do oceano. Com isso, ocorrem variações com o tempo, desde variações diárias até ao longo do ano, e também segundo um gradiente espacial formado pela posição dos tributários em relação à região costeira do rio Amazonas. Para analisar esse gradiente, foram coletados dados de variação no nível da água no porto de Santana e em três sensores de pressão instalados em diferentes tributários (rios Mazagão, Maracá e Ajuruxi) do canal norte do Amazonas. As variações das marés em afluentes do estuário do Amazonas estão fortemente relacionadas às marés previstas no Porto de Santana, com possibilidades de extrapolação das previsões oficiais para outros rios ao longo do estuário. Nos três tributários foram observados efeitos sazonais e de maré. A variação média nas amplitudes do nível da água foi de 2,1 m a 2,4 m, identificando as várzeas do município de Mazagão como região de "mesomaré". Os resultados mostram ainda que as amplitudes diminuem com a distância da costa e que o tempo de parada da maré (estofo) ocorre mais tardiamente, quanto mais para o interior. Esses resultados têm implicações importantes para a gestão das várzea de marés, e para o planejamento de transporte fluvial no estuário do Amazonas.

**Palavras-chave:** Várzea estuarina. mesomarés. estofo de maré. amplitude de maré.

**Abstrat:**

The Amazon Basin is formed by the most extensive hydrographic network in the world producing approximately 20% of the world's freshwater discharge. Both biodiversity and human livelihoods in the Amazon Basin are affected by water levels, which vary throughout the year and along the spatial gradient of the river system, with those in the estuary affected not only by precipitation upstream but also by semi-diurnal tides. Here we present data from three tidal gauges at increasing distances from the coast and show that tidal ranges in tributaries of the Amazon estuary are strongly related to predicted tides at the coast, presenting possibilities to extrapolate coastal tidal predictions throughout the estuary. We present both seasonal and tidal effects in all three tributaries and show that the tidal ranges are, on average between 2.1 and 2.4m, identifying the region as one of "mesotides". The results further show that tidal ranges decrease with distance from the coast and high and low tide peaks occur later further inland. These results have important implications for management of tidal várzea, and for the planning of fluvial transport of all types in the Amazon estuary.

**Keywords:** Estuarine floodplain. mesotides. tidal estofo. tidal amplitude.

## Introdução

A bacia amazônica é formada pela mais extensa rede hidrográfica do mundo, ocupando área total de 6.110.000 km<sup>2</sup>. Estende-se ao longo de sete países da América do Sul (Brasil, Peru, Bolívia, Colômbia, Equador, Venezuela e Guiana) e produz, aproximadamente, 20% da descarga de água doce do mundo (Agência Nacional de Águas 2016; Salati and Vose 1984). O estuário do Amazonas é um importante ponto de monitoramento, pois o que acontece em toda a bacia vai afetar o estuário, principalmente em períodos com variações climáticas extremas, como durante a seca de 2005 (Tomasella et al. 2011) e inundações de 2009 (Marengo et al. 2011). A região é o habitat de cerca de um quarto das espécies terrestres do planeta (Dirzo e Raven 2003) e suas florestas são responsáveis por, aproximadamente, 15% da fotossíntese terrestre mundial (Field et al. 1998).

A Amazônia é também o lar de um número estimado de 38 milhões de habitantes, sendo que mais de 60% vivem em grandes cidades (Programa Ambiental das Nações Unidas de 2008). Fora destas grandes cidades, a vida da população está intimamente ligada às florestas e rios da Amazônia, tanto nos ecossistemas de terra firme, quanto, e, principalmente, nas áreas úmidas. As florestas de zonas inundadas da Amazônia (conhecidas como várzea), são caracterizadas por uma fase aquática e outra terrestre, com variação anual e sazonal na Amazônia Central, e com variação diária na região do estuário Amazônico. Nessa condição de enchente e vazante dos rios estuarinos durante todos os dias, os meios de vida são ainda mais dependentes dos recursos hídricos e florestais.

O canal Norte do Amazonas serve como corredor para o transporte de madeira (Schöngart 2008), de peixes, frutas e legumes que se originaram nas florestas (Junk et al. 2000). Espécies madeireiras e não madeireiras como *Euterpe oleracea*, *Carapa guianensis*, *Virola surinamensis*, *Mora paraensis*, *Platymiscium filipes* (Queiroz 2004), além de espécies de camarão como *Macrobrachium amazonicum* e *Macrobrachium carcinus* (Lima e Santos 2014) são de interesse econômico e suas produções e transporte dependem do canal Norte do Amazonas.

Assim, a biodiversidade e os meios de subsistência humanos na Bacia Amazônica são afetados pelas variações nos níveis de água, que variam ao longo do ano e ao longo do gradiente espacial do sistema fluvial (Hida et al. 1998). A variação de larga escala geográfica ao longo dos rios reflete-se na diversidade e estrutura da várzea (Wittmann et al. 2006). Em geral, as florestas de várzea tem diversidade de espécies inferior à floresta de terra firme, uma vez que é caracterizada por espécies adaptadas às inundações periódicas (Rogge et al. 1998). Embora não

haja uma rede de estudos investigando como os pulsos de inundação das marés variam ao longo dos rios que descarregam no Oceano Pacífico (e.g. Devlin et al. 2014; Jay et al. 2015; Matte et al. 2013; Moftakhari et al. 2013; Moftakhari et al. 2015; Zaron and Jay 2014), esses fenômenos foram examinados na região amazônica (Beardsley et al. 1995; Gabioux 2002; Gabioux et al. 2005; Gallo and Vinzon 2005; Kosuth et al. 2009; Ribeiro 2013, Santos 2006). No entanto, ainda há uma lacuna de conhecimento existente em relação aos padrões dos pulsos de inundação das marés, em escala local, e suas influências nos ecossistemas de várzea.

Esses ecossistemas são influenciados por inundações periódicas de águas brancas, que transportam sedimentos concentrados em nutrientes, propiciando a formação de um solo fértil (Prance 1979). Os pulsos de inundação, juntamente com o transporte de sedimentos, são controlados por dois mecanismos diferentes. O pulsos de inundação à montante de Óbidos (Amazônia Central), a cerca de 870 km acima da foz do rio, são controlados, principalmente, pela variação no regime de precipitação, que é fortemente sazonal (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1977). A jusante de Óbidos (Estuário Amazônico), eles são influenciados também pelas marés semidiurnas que empurram a água com carga de sedimentos ainda mais para a várzea (National Geospatial-Intelligence Agency 2014). Acima de Óbidos a floresta é conhecida como várzea "sazonal", e abaixo de Óbidos como várzea de "maré" (Prance 1979).

As inundações duas vezes por dia causadas por marés semidiurnas tendem a diminuir a diversidade de espécies na várzea de maré, em comparação com a várzea sazonal (Widdows and Brinsley 2002; Wittmann et al. 2006). Além disso, os diásporos da maioria das espécies de árvores de várzea têm tecidos específicos ou outras adaptações para fornecer a flutuabilidade, de tal modo que eles são capazes de flutuar durante longos períodos de tempo, facilitando a sua dispersão por água (hidrocoria) (Kubitzki and Ziburski 1994). A Dispersão de sementes por peixes (ictiocoria) também é comum (Kubitzki and Ziburski 1994; Cunha et al. 2013).

As inundações por marés nos afluentes do Amazonas e, conseqüentemente, das florestas de várzeas de maré, ocorrem quando, durante a maré enchente, as águas do rio Amazonas e seus afluentes são represados pela água do Oceano Atlântico, e o nível de água do rio começa a subir. Esse fenômeno resulta da combinação de níveis de água variáveis sazonalmente devido ao regime de precipitação, e os efeitos de maré. Entre as enchentes e vazantes das marés, há altos e baixos da maré, chamados de "estofos"- períodos em que o nível de água permanece constante.

A amplitude da maré diminui com a distância para o oceano, começando com regime de macromaré (amplitude > 4m), na foz do rio Amazonas a um regime de mesomaré (amplitude de 2-4 m) mais para o interior (Beardsley et al. 1995). Na Amazônia, como em outros rios de maré, a própria maré, e, portanto, o nível do rio, são influenciados por variações na força gravitacional exercida durante o ciclo lunar. Marés de sizígia ocorrem durante as luas nova e cheia, e representam os períodos em que o nível de água da maré está no seu nível mais elevado, enquanto que quando a lua está crescente e minguante ocorrem os mais baixos níveis de água, denominada maré de quadratura (Kosuth et al. 2009).

A penetração da maré em um estuário é o resultado da interação do escoamento fluvial e do movimento oscilatório gerado pela maré na sua embocadura, onde essas ondas longas são geralmente amortecidas e progressivamente distorcidas pelas forças do atrito no fundo e a vazão fluvial (Godin 1999), sendo também influenciadas pela geometria do canal (Ippen e Harleman, 1966). Em qualquer local ao longo do rio Amazonas, e em qualquer época do ano, o controle dos níveis de água depende de um sistema complexo, relacionado com a profundidade do rio, fisiografia da desembocadura do rio, morfologia do leito do rio e vazão do rio (Gabioux 2002; The Open University 1999).

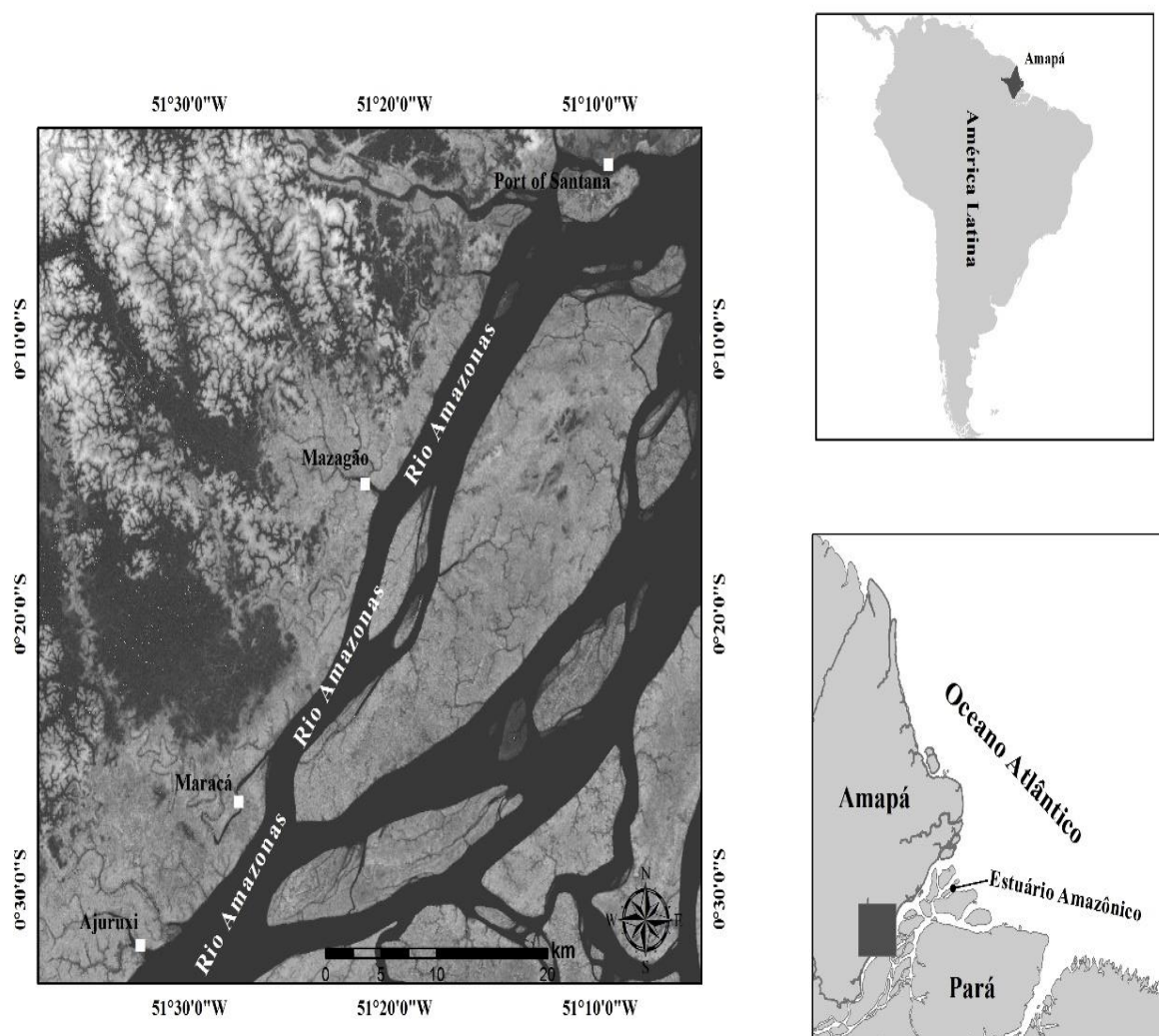
A Amazônia é a região de maior biodiversidade do planeta, e os meios de vida de milhões de pessoas dependem diretamente dos recursos fornecidos pelos rios e florestas. O estuário Amazônico é influenciado pelas marés, mas ainda é preciso intensificar o número de estudos sobre como essa influência afeta a diversidade ecológica e a comunidade humana que depende do maior rio de água doce do mundo. Para isso torna-se necessário compreender essa dinâmica em nível local. Diante disso, o objetivo desse estudo foi monitorar os níveis de maré em três tributários distintos do rio Amazonas, e especificamente 1) verificar as relações das previsões oficiais de marés no porto mais próximo da área de estudo com as medidas de níveis de marés nos afluentes; 2) caracterizar os padrões de variação temporal da amplitude das marés ao longo do ano; 3) caracterizar a variação espacial no pulso de inundação de maré entre os três afluentes, que cria um gradiente de distância em relação à costa atlântica.



## Material e Métodos

### Área de Estudo

O estudo foi realizado no município de Mazagão, Estado do Amapá, na Amazônia brasileira. Os sensores de pressão para monitoramento da maré foram instalados em três locais (Mazagão Velho -  $0^{\circ}15'18.59''\text{S}$  e  $51^{\circ}21'27.60''\text{W}$ ; Maracá -  $0^{\circ}26'50.12''\text{S}$  e  $51^{\circ}27'36.60''\text{W}$  e Ajuruxi -  $0^{\circ}32'3.41''\text{S}$  e  $51^{\circ}32'24.08''\text{W}$ ; Fig. 3) dentro da zona estuarina, onde os rios tributários Mazagão, Maracá e Ajuruxi deságuam no canal Norte do rio Amazonas.



**Fig. 3.** Mapa da área de estudo mostrando as localizações dos sensores de pressão instalados no município de Mazagão e a localização do porto de Santana. Fonte: Jonas Rodrigues

A região de estudo tem um clima tropical quente e úmido, classificado como um clima tropical de monção (tipo Am (i) na classificação de Köppen), recebendo uma grande quantidade

de energia solar durante todo o ano, devido sua posição próxima do equador. A região tem uma precipitação pluviométrica média anual de 2.423 mm, distribuída irregularmente ao longo do ano, com meses de maior precipitação pluviométrica no primeiro semestre, entre janeiro e junho, e estação pouco chuvosa no segundo semestre, principalmente de setembro a novembro. Essa grande variação sazonal da precipitação deve-se à migração anual da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que está associada com a confluência dos ventos alísios, a baixa pressão atmosférica sobre o equador, e as áreas de temperatura de superfície máxima do mar (Melo et al. 2009). A variação bimodal na precipitação também é influenciada pelo *El-Niño-Southern Oscillation* – ENSO (Richey et al. 1989) e influencia os níveis de água do ciclo hidrológico da região que são também afetados pelas marés semidiurnas de meso e macromarés (Salomão et al. 2007). Os níveis máximos e mínimos são atingidos em março e setembro, durante os períodos de equinócio (Santos 2006). A temperatura anual média é de 27,66°C (Instituto Nacional de Meteorologia 2015). O solo possui textura silte-argilosa, podendo ser classificado como Gleissolo (Pinedo-Vasquez 1999). A vegetação predominante é a floresta de várzea de alto porte, com grande frequência de palmeiras (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2012). A região é relativamente plana, com pequenas oscilações de altitude e áreas de relevo mais rebaixado, o que limita a drenagem do solo, uma limitação ainda mais intensificada pela superficialidade do lençol freático (Zoneamento Ecológico-Econômico 2008).

### **Coleta dos dados**

Os dados sobre a pressão e temperatura da água foram coletados a cada cinco minutos em um período de janeiro de 2013 a fevereiro 2015, usando sensor de pressão Hobo (water level logger U20) instalado próximo à floresta de várzea em cada um dos três tributários do rio Amazonas – Mazagão (distante ~30,67 km do Porto de Santana), Maracá (distante ~54,15 km do Porto de Santana) e Ajuruxi (distante ~ 67,23 km do Porto de Santana). Essas distâncias foram calculadas ao longo da costa do canal Norte do rio Amazonas, no ArcGIS versão 10.1 (ESRI 2012). Os sensores instalados nos afluentes estão distantes da margem esquerda do canal Norte no Amazonas, aproximadamente, 32, 59 e 69 km, respectivamente, e conseqüentemente as distâncias dos sensores para o oceano segue esse mesmo padrão. O sensor de Mazagão é o mais próximo do porto de Santana e do oceano, e o sensor de Ajuruxi o mais distante.

Os sensores foram acoplados a mastros de madeira, para que os mesmos permanecessem fixos para registrar corretamente a pressão da água, em uma posição escolhida para facilitar a

leitura e com base na profundidade da água. O sensor de pressão tem de estar sempre submerso a uma profundidade mínima de 60 cm, para o seu correto funcionamento. Por isso, os sensores foram instalados durante a baixamar de quadratura do período de verão (quando o nível do rio é mais baixo), em locais com uma profundidade de pelo menos 1 m, de tal modo que o sensor ficaria sempre submerso a uma profundidade mínima de 60 centímetros.

Os dados foram coletados mensalmente a partir dos sensores, com auxílio do software específico do sensor (Onset 2016). Os dados de pressão de água foram convertidos em nível da água acima do sensor, usando a relação entre o último valor de pressão de água registrado pelo sensor e o nível de água no momento da coleta dos dados, que foi verificado usando a régua de madeira sobre a qual os sensores foram instalados. A régua, que era graduada a cada cm, foi mantida fixa, sempre na mesma posição durante todo o período de estudo. O cálculo foi feito automaticamente pelo software do sensor, utilizando as leituras de pressão a cada cinco minutos ao longo do período de coleta. Depois de cada leitura de dados dos sensores, os mesmos foram recolocados nas mesmas posições, usando marcações feitas nas régua fixas.

Os sensores instalados nas áreas operam em uma faixa de até 30,6 m de profundidade da água ao nível do mar, e tem um erro de  $\pm 1,5$  cm na medição do nível de água (Onset 2016). Validações foram realizadas em campo por monitoramento manual, quando foram observados os níveis de água usando a régua graduada de madeira, com leitura a cada cinco minutos, durante 4 horas em torno do estofa de maré.

### **Análise dos dados**

Devido a problemas técnicos com os sensores e dificuldades logísticas para manutenção das viagens, aconteceram algumas lacunas durante o período de coleta de dados. Assim, o período entre março de 2014 e fevereiro 2015 foi selecionado para as análises, uma vez que representou o período mais completo de 12 meses, e foi, portanto, mais adequado para captar a variação sazonal do nível da água devido aos efeitos das marés e da precipitação. Todas as análises de dados foram realizadas usando scripts escritos no R version 3.2.2 e no Microsoft Excel 2016 (R Core Team 2015 – Apêndice 1).

### **Relação entre as variações das marés nos afluentes e no Porto de Santana**

A maré na região estuarina é semidiurna, caracterizada por duas marés altas e duas marés baixas durante um dia. Os tempos e os níveis dos dois estofos de preamar e dois estofos de baixamar foram identificados para cada dia que havia dados disponíveis, para cada sensor.

A amplitude total de cada maré foi encontrada calculando a diferença absoluta entre o nível de água das baixamars e preamars em cada ciclo de maré. Estes foram então modelados em relação às variações das marés previstas na costa no Porto de Santana (dados disponibilizados pelo Centro de Hidrografia da Marinha - Banco Nacional de Dados Oceanográficos), utilizando modelos lineares generalizados, para confirmar se a amplitude da maré prevista no porto é um forte preditor de amplitude de maré mais para o interior do rio Amazonas.

Como os dados disponibilizados pela Marinha faziam a previsão da maré com intervalos de uma hora, os dados de monitoramento da maré, nos três afluentes estudados nessa presente pesquisa, obtidos pelos sensores de pressão, foram reorganizados para manter o mesmo intervalo de uma hora que os dados da Marinha. Para isso, foram selecionados do banco de dados dos sensores de pressão, os valores de leitura a cada hora cheia, a partir de 0:00h de cada dia, para parear com os dados de previsão da Marinha, que seguem esse padrão.

### **Padrão da variação temporal do nível da água ao longo do ano**

Os dados da amplitude de variação do nível de água foram plotados para cada sensor ao longo do período de doze meses. A amplitude de cada ciclo semidiurno de maré, foi calculada subtraindo a leitura mínima da máxima, para cada ciclo de 12 horas. Foram escolhidos dois meses representativos das variações sazonais ao longo do ano - abril e outubro (estação chuvosa e menos chuvosa, respectivamente). Normalmente, o mês com maior cota de inundação é maio e o com menos índice de precipitação é novembro, mas devido à falta de dados nos três afluentes monitorados, e porque os anos de 2014 e 2015 foram anos atipicamente mais secos (Cptec 2016), foram selecionados abril e outubro. Dentro de cada mês foram avaliadas as variações semanais em função da lua e foi selecionado um dia (16 de Abril e 09 de outubro), para avaliações detalhadas do tempo de enchente e vazante a cada 5 minutos.

Foi calculada a duração da enchente da maré (tempo necessário para que a maré atinja a preamar, medido a partir do menor valor da baixamar), e o tempo de duração da maré vazante (tempo necessário para que a maré atinja a baixamar, medido a partir do valor máximo da altura em preamar).

### **Variação espacial nos padrões de maré entre os três afluentes**

Foi calculado uma amplitude média, de cada local em que o sensor de pressão foi instalado, em todo o período de doze meses e foram comparadas usando ANOVAs. As

premissas de independência, homocedasticidade e normalidade dos resíduos, foram testadas para verificar as diferenças significativas nas amplitudes médias nas três localidades.

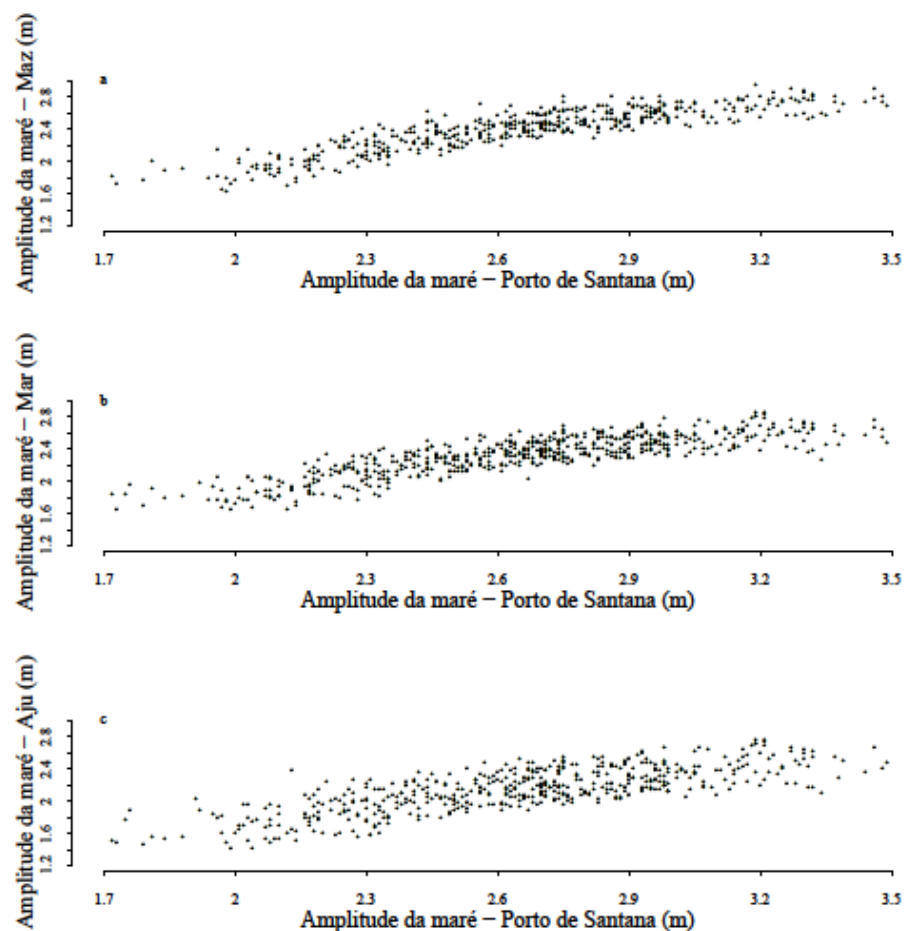
A fim de calcular o período de estofo das preamares e baixamares foi necessário primeiro identificar uma variação apropriada em torno do valor máximo ou mínimo, em cada ciclo. Se fosse avaliado diretamente o pico do valor máximo, esse poderia ser resultado de ondas momentâneas resultantes do vento ou das embarcações de passagem, resultando em valores acima do verdadeiro nível do estofo. Esse é o período em que o nível de água permanece praticamente constante, na preamar e na baixamar, sendo então necessário identificar a frequência de repetição dos valores extremos, mais uma variação que capturasse o efeito das ondas. Valores entre 1 e 20 centímetros foram testados e o tempo da duração do período de estofo foi encontrado (Apêndice 2).

Nesse capítulo, não foi possível realizar a correção da altura da maré e determinação da altitude real em relação ao nível do mar para os três sensores instalados nos afluentes. Por isso, está se trabalhando com a amplitude das marés para comparação entre afluentes localizados em regiões situadas em diferentes altitudes.

## Resultados e Discussão

### Relação entre as variações das marés nos afluentes e no Porto de Santana

As amplitudes de maré em todos os três sensores estão na faixa de 1,2 - 2,8 m, com amplitudes médias de maré durante todo o ano na faixa de 2 - 2,5 m, demonstrando que a região pode ser classificada como mesomaré, conforme encontrado por Cunha et al. (2001). A relação entre a amplitude de maré no Porto de Santana e amplitude das marés em cada local do sensor foi positiva e significativa (Fig. 4: Mazagão GLM  $p < 0,001$ ,  $\beta = 0,644$ , s.e.=0,016; Maracá GLM  $p < 0,001$ ,  $\beta = 0,574$ , s.e.= 0,015; Ajuruxi GLM  $p < 0,001$ ,  $\beta = 0,580$ , s.e.=0,021).



**Fig. 4.** Amplitude das marés (m) nos três afluentes onde foram instalados os sensores de pressão, em relação à amplitude de maré no porto de Santana, entre março de 2014 e fevereiro de 2015. Ordem de proximidade dos afluentes em relação ao porto de Santana e ao oceano: (a) Mazagão, (b) Maracá e (c) Ajuruxi

Esses resultados mostram que as variações das marés em afluentes do estuário do Amazonas estão fortemente relacionadas às marés previstas no porto de Santana (Fig. 4), apresentando possibilidades de extrapolar essas previsões oficiais da tábua de marés ao longo

do estuário. Além disso, diferenças tanto nos efeitos sazonais ao longo do ano (Fig. 5), quanto nos efeitos do ciclo lunar sobre a maré, durante os meses individuais (Fig. 6), podem ser observados nos níveis de água nos três afluentes.

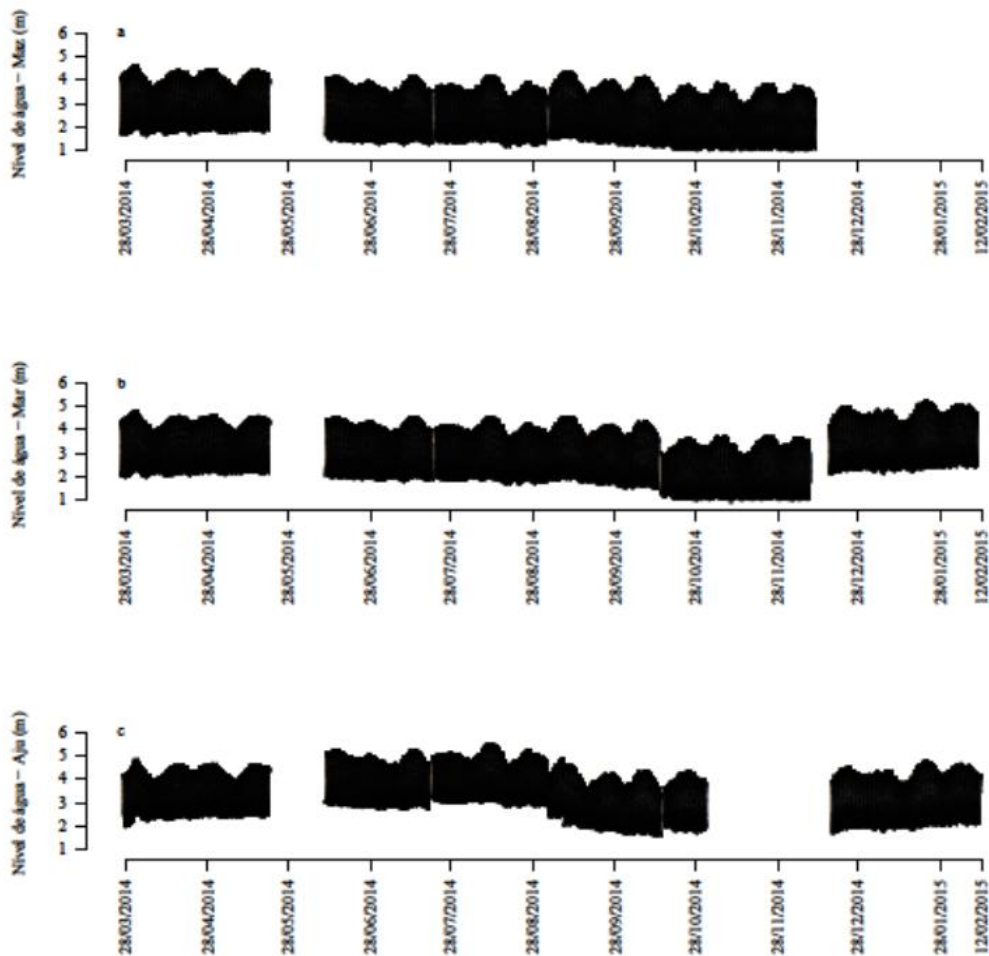
Em Mazagão, a região mais próxima do oceano, as variações das marés são mais elevadas, chegando a amplitudes maiores que 2,8 m, enquanto que em Ajuruxi, a região mais distante do oceano, observa-se as menores amplitudes de maré, tendo valores menores que 1,6 m (Fig. 9).

Esse padrão pode ser explicado pela diminuição da força da maré ao longo do rio Amazonas, de tal forma que, na foz do rio a força da maré é maior e aumenta a diferença entre os estofos de baixamares e preamares, ocasionando maiores amplitudes. Mais distante do oceano a força da descarga fluvial do Amazonas dissipa a força da maré, e, como tal, a altura da amplitude e, assim, a faixa de corrente é menor, devido a um efeito conhecido como “amortecimento” (Gallo e Vinzon 2005).

A faixa de corrente diminui com a distância da costa e os períodos de estofos das preamares e baixamares ocorrem mais tardiamente, quanto mais para o interior (Fig. 8). Essa informação da defasagem do tempo de estofos entre as regiões, associada com as relações de variação na amplitude da maré, em relação ao porto de Santana, pode ajudar no planejamento da navegação, com implicações para a compreensão da dinâmica de inundação da várzea ao longo do estuário Amazônico.

### Padrão de variação temporal nos níveis de água ao longo do ano

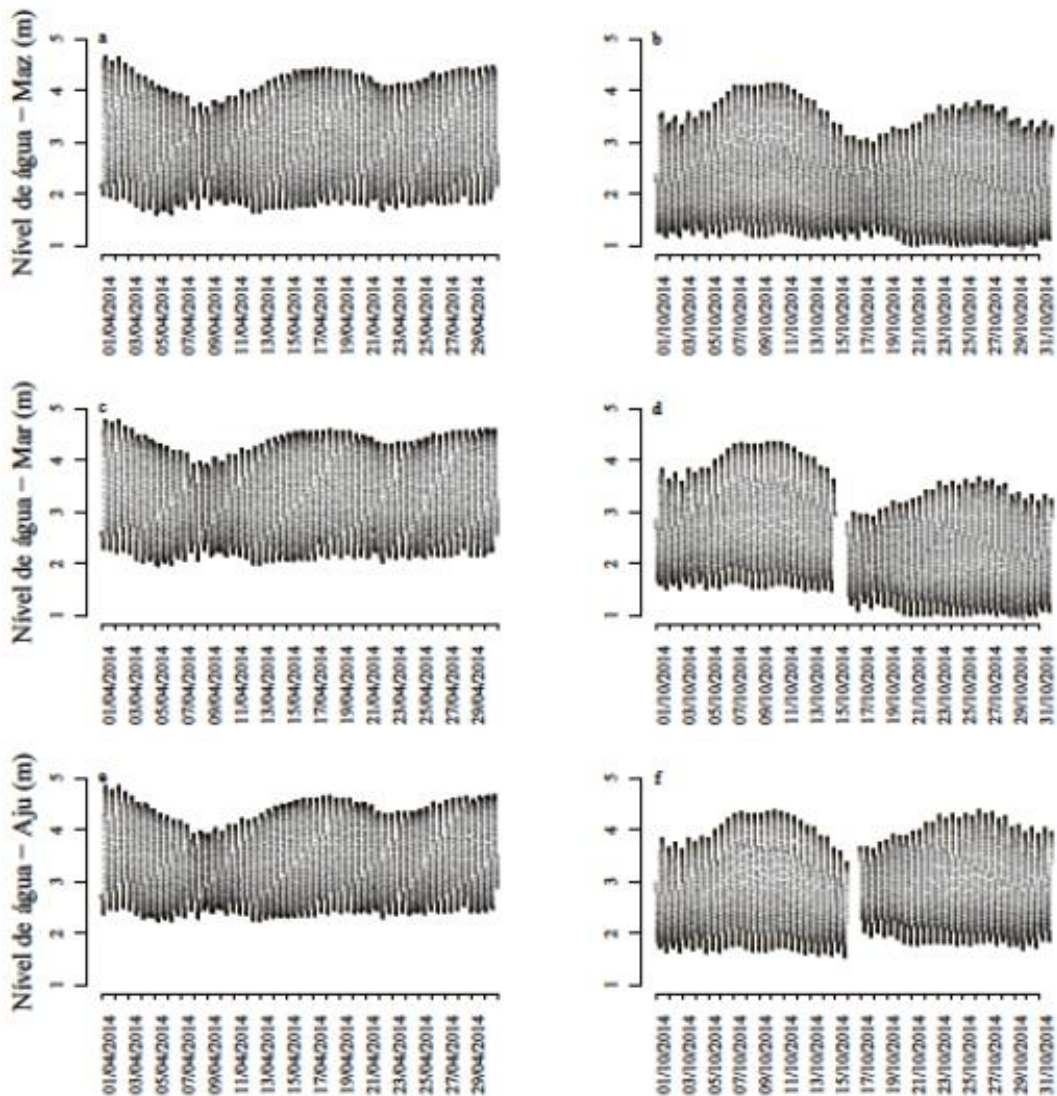
Ao longo do período de doze meses, foram observados níveis mais elevados, em todos os três afluentes, na primeira metade do ano. Os níveis mais baixos foram registrados na segunda metade do ano (Fig. 5). O nível mais elevado foi registrado no mês de abril de 2014 e o nível mais baixo, em outubro de 2014 (Fig. 5 e 6).



**Fig. 5.** Nível de água (m) medido pelos sensores de pressão entre março 2014 e fevereiro de 2015, instalados em três afluentes do canal norte do rio Amazonas: (a) Mazagão, (b) Maracá e (c) Ajuruxi

Apesar dos níveis de água serem mais elevados no primeiro semestre do ano, as amplitudes das marés nesse período (visto mais claramente na maré de quadratura) são menores que as amplitudes das marés na segunda metade do ano (Fig. 6). Isso pode ser o resultado da força gravitacional inferior dessas fases da Lua, e a dificuldade resultante em mover um corpo de água maior (Nordtvedt 2001).



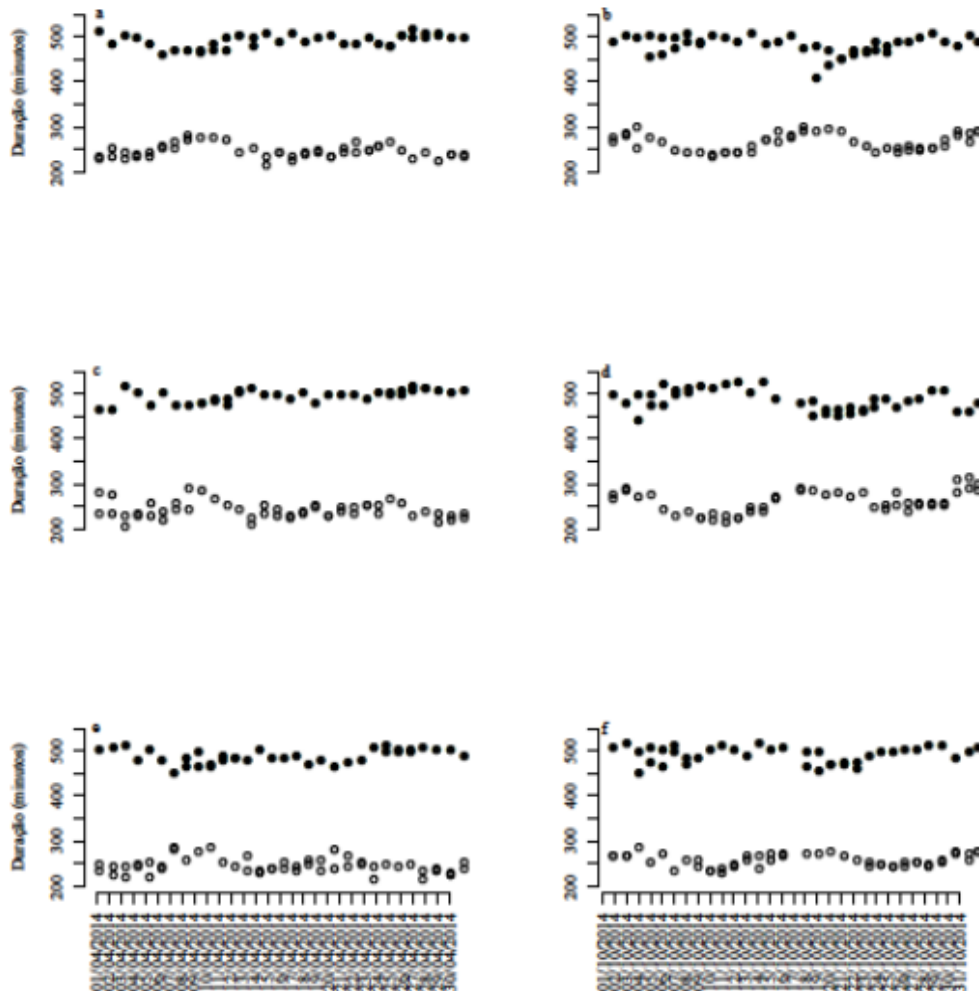


**Fig. 6.** Níveis de água (m) registrados pelos sensores de pressão no mês de abril de 2014 (níveis anuais mais elevados) e outubro de 2014 (níveis anuais mais baixos) ao longo da costa - (a, b) Mazagão, (c, d) Maracá e (e, f) Ajuruxi

A fase lunar influencia nas amplitudes das marés, sendo que as maiores amplitudes de marés ocorrem nas luas nova e cheia (maré de sizígia), e as menores amplitudes de maré ocorrem quando a lua é crescente e minguante (maré de quadratura) (Fig. 6; Larcombe e Jago 1996; Ribeiro 2013).

A duração da enchente foi aproximadamente a metade da duração da maré vazante, independentemente do local ou época do ano, e sem sobreposição dos intervalos de confiança construídos com 95% de certeza (tabela 1 e Fig. 7).

Um padrão que pode ser observado é que como a duração da maré vazante é mais longa, e a duração da maré enchente mais curta, as maiores durações dos estofos das marés enchentes e vazantes ocorrem em dias cuja amplitude da maré é menor (Fig. 6 e 7).



**Fig. 7.** Duração (em minutos) das marés enchentes (círculos vazios) e das vazantes (círculos cheios) nos meses de abril (a, c, e) e outubro (b, d, f) de 2014, nos três locais onde foram instalados os sensores de pressão: Mazagão (a, b), Maracá (c, d) de e Ajuruxi (e, f)

A análise de possíveis intervalos para explicar a variação em torno dos valores do estofó, devido aos ventos e as ondas geradas por barcos, mostrou que dentro de uma variação de 6 a 14 cm, os valores do tempo de estofó da preamar e da baixamar em todos os três locais estudados se estabilizam em torno de 90-100 minutos (Tabela 1, Apêndice 2).

**Tabela 1** Médias anuais das amplitudes das marés, da duração da enchente e vazante, da duração do estofo da preamar e da baixamar, e o tempo de diferença entre o estofo da preamar e baixamar no Porto de Santana e nos três locais dos sensores entre março de 2014 e fevereiro 2015. Entre parênteses podem ser observados o tamanho da amostra (n - medida em dias), e o intervalo de confiança (com 95% de certeza).

Localização dos marégrafos	Amplitude média da maré (m)	Tempo médio de enchente (minutos)	Tempo médio de vazante (minutos)	Duração do estofo da preamar (minutos)	Duração do estofo da baixamar (minutos)	Intervalo médio entre os estofos das preamares nas regiões de estudo e no Porto de Santana (minutos)	Intervalo médio entre os estofos das baixamares nas regiões de estudo e no Porto de Santana (minutos)
Mazagão	2,394 (n=238; C.I. = 0,024)	254,53 (n=238; C.I. = 1,78)	485,78 (n=238; C.I. = 2,13)	90 - 100 (n=237)	90 (n=237)	50,60 (n=238; C.I. = 3,38)	91,13 (n=238; C.I. = 2,23)
Maracá	2,321 (n=293; C.I. = 0,020)	251,38 (n=293; C.I. = 1,80)	488,07 (n=293; C.I. = 2,12)	90 (n=250)	90 (n=250)	79,97 (n=293; C.I. = 1,95)	125,58 (n=293; C.I. = 1,98)
Ajuruxi	2,143 (n=253; C.I. = 0,024)	250,78 (n=253; C.I. = 1,35)	488,70 (n=253; C.I. = 2,12)	90 (n=246)	90 (n=246)	108,50 (n=253; C.I. = 2,07)	154,82 (n=253; C.I. = 2,15)

A duração do tempo de estofo médio de 1,5 horas foi confirmada por validações realizadas em campo, por meio do monitoramento manual dos níveis de água, usando uma régua

de madeira, a cada cinco minutos, durante 4 horas em torno do estofo de maré. A duração do estofo não difere entre as preamares e as baixamares (Apêndice 2).

A duração do tempo de enchente e vazante encontrados nesse estudo, também são confirmados por estudos anteriores, como o de Gallo (2009), que analisando dois pontos de monitoramento da dinâmica da maré em Macapá e Bailique, encontrou a duração da vazante com duração de 12 horas para Macapá e 6 horas para Bailique e o tempo de enchente com duração de 7 horas para Macapá e 3 horas para Bailique. Miranda et al. (2002), por meio do monitoramento das marés feito no Porto de Santana, encontrou uma duração média de 4 horas para a enchente e 8 horas para a vazante.

French (1997), afirma que quando há diferença na duração da enchente e vazante, pelo princípio da conservação de volume, que, no evento de menor duração, a velocidade do movimento será mais intensa e, em consequência, o transporte de sedimentos em suspensão será maior. Assim, na enchente há maior transporte de sedimentos, em comparação com a vazante, quando ocorrerá menor transporte e maior sedimentação. Dessa forma, diz-se que o estuário é dominado pela enchente, sendo um importador de sedimentos.

O momento e a duração das inundações das áreas de várzea têm importantes implicações ecológicas e de gestão. A várzea de maré tem sido relativamente menos estudada em comparação com a várzea sazonal, e, especificamente, precisa-se intensificar os estudos acerca dos pulsos diários de inundação da maré.

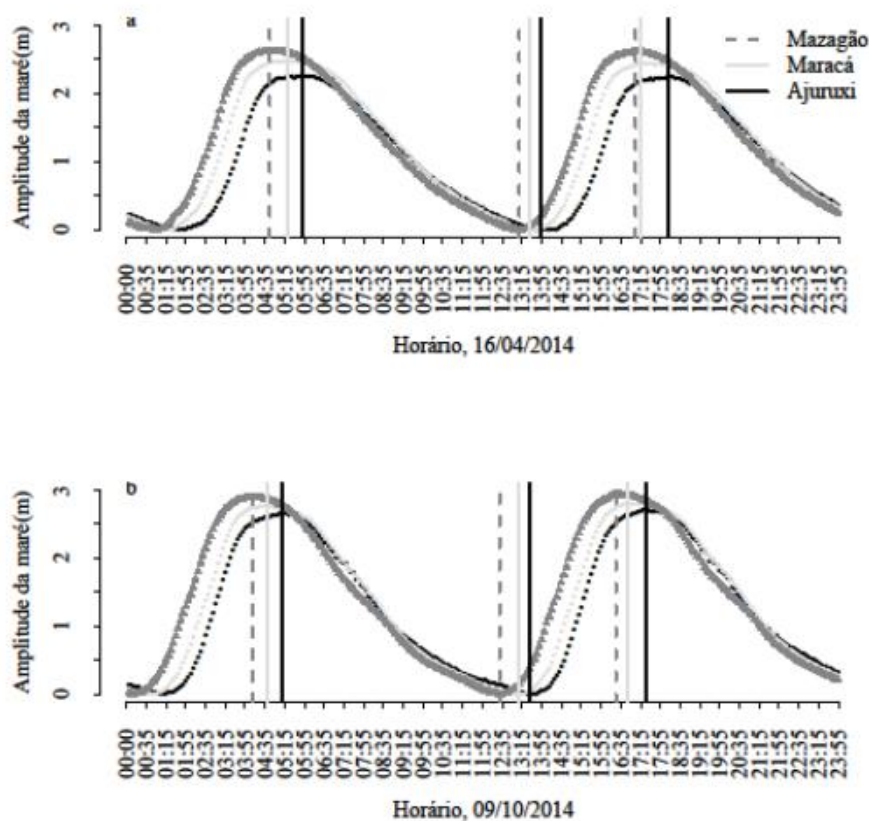
Os pulsos de marés enchentes transportam sedimentos, que são carregados pelas águas de maré, ainda mais para dentro da várzea. As vazantes levam sementes, sedimentos e outros materiais biológicos do solo da floresta de volta para o canal do rio, que são dispersos por todo o estuário (Kubitzki and Ziburski 1994; Prance 1979; Cunha et al. 2013).

O comprimento e a extensão espacial da inundação pelas marés podem ser modelados. No entanto, um dos insumos necessários para fazer tais previsões é o nível da água, que é definido pela dinâmica das marés e sazonalidade das chuvas. Assim, os dados de nível de água medido pelos sensores de pressão são fundamentais para a compreensão da dinâmica das marés de várzea, e, portanto, para o planejamento de sua gestão. Nossos resultados mostram que o tempo de duração do período de estofo não varia com a distância do oceano, com duração do tempo de estofo das preamares e baixamares entre 90-100 minutos em todos os três locais de monitoramento (tabela 1), o que pode implicar que a elevação em menor escala e o tempo de drenagem do solo são preditores mais importantes na extensão e no tempo da inundação, embora isso mereça uma investigação mais aprofundada.

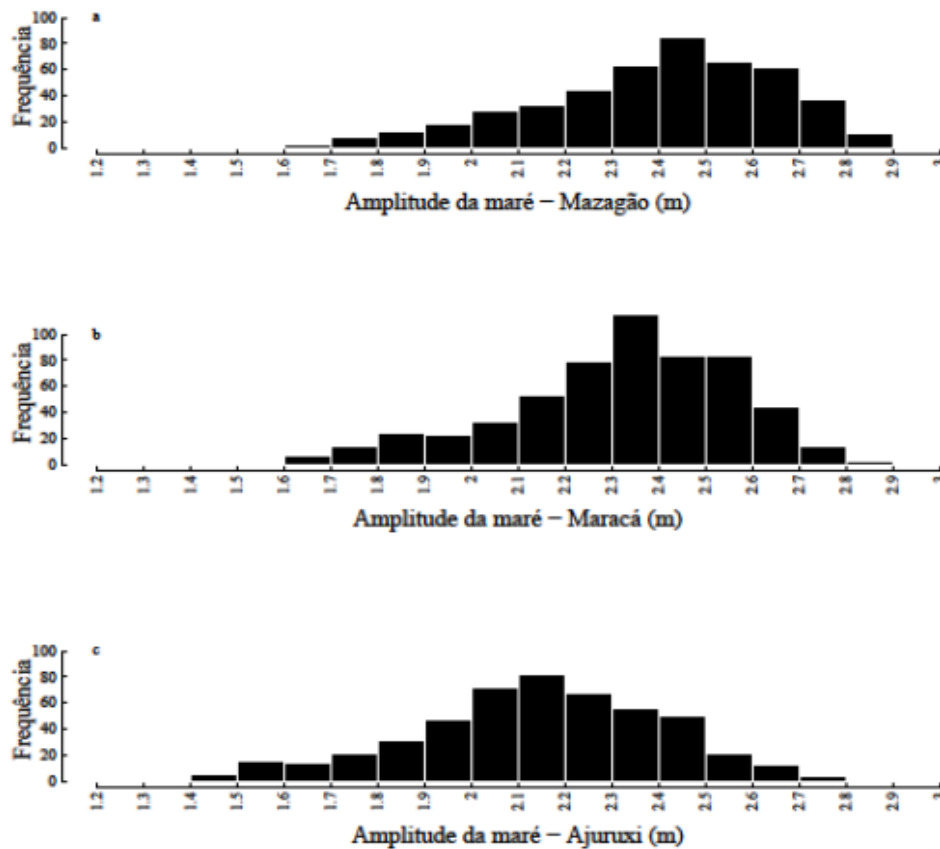
Outro uso importante dos dados de variação do pulso de maré, seria a interpretação dos dados de imagens de radar, mais especificamente, quando se quer utilizar imagens de radar para calcular a biomassa florestal. É importante conhecer o nível da água quando as imagens de radar foram coletadas, pois o sinal do radar é refletido na água, e isso pode influenciar na definição do modelo digital de terreno usado para representar o nível do solo, comprometendo comparações com a altura do dossel para fazer os cálculos de biomassa (Sambatti et al. 2012).

### Variação espacial nos padrões de maré entre os três afluentes

A amplitude de maré média foi menor no Ajuruxi, maior em Maracá e maior ainda em Mazagão, sem sobreposição dos intervalos de confiança de 95% (tabela 1 e fig. 8 e 9).



**Fig. 8.** Amplitude das marés (m) calculadas subtraindo-se os mínimos das marés semidiurnas de cada valor de nível de água, durante os dois dias representativos, para o mês com maiores níveis de água e para o mês com níveis mais baixos (16 de Abril de 2014 (a) e 09 de outubro de 2014 (b), respectivamente)

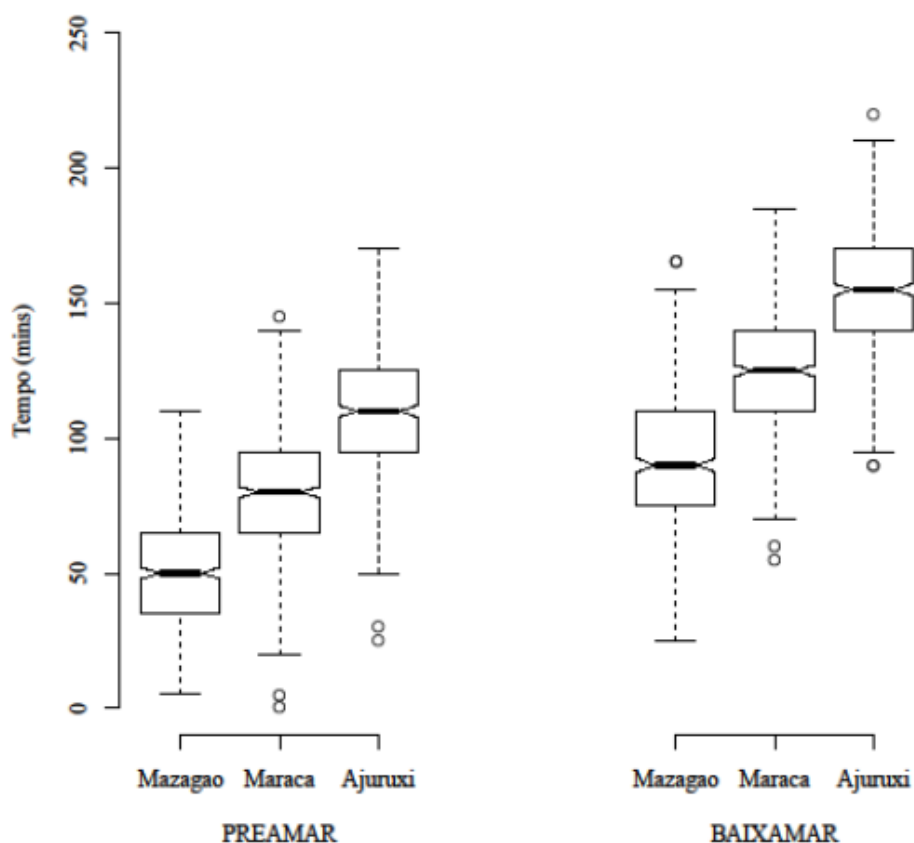


**Fig. 9.** Distribuição da frequência das amplitudes de maré (m) ao longo do período de 12 meses entre março de 2014 e fevereiro 2015 nos três locais monitorados - (a) Mazagão, (b) Maracá e (c) Ajuruxi

Os estofos das preamares e baixamares ocorrem, primeiramente, em Mazagão (distante ~30,67 km da costa), depois no Maracá (distante ~54,15 km da costa) e por último no Ajuruxi (distante ~67,23 km da costa) (fig.10). Em cada um dos três locais onde foram instalados os sensores, o tempo de defasagem entre a maré alta no Porto de Santana e a maré alta nesses locais de monitoramento é menor, em média, do que a defasagem entre as marés baixas, sem sobreposição nos intervalos de confiança de 95% (tabela 1, fig. 10). Isso ocorre porque a velocidade da enchente é maior e, portanto, o tempo menor. Assim, a defasagem de tempo entre os picos de maré alta de um local para outro também é menor, quando comparada com a defasagem de tempo da maré baixa.

A defasagem entre os horários das marés altas e baixas no Porto de Santana e Ajuruxi (mais afastado da costa) é sempre mais longa, sendo que a magnitude de defasagem é menor

com a diminuição da distância para a costa, sem sobreposição nos intervalos de confiança de 95% (tabela 1, fig. 10).



**Fig. 10.** Tempo (em minutos) entre os estofos de baixamar e preamar no Porto de Santana e os estofos de maré nos três locais onde foram instalados os sensores, ao diminuir a distância para o oceano. As linhas em negrito representam a mediana entre março 2014 - fevereiro de 2015, as linhas tracejadas mostram o intervalo de confiança de 95% em torno da mediana, as caixas representam os limites dos primeiro e terceiro quartis, as linhas tracejadas representam 1,5 vezes o intervalo interquartil, e os pontos a gama completa dos dados.

Os efeitos das variações sazonais no nível de água durante todo o ano podem ser verificados, principalmente, pelos níveis de água na maré vazante. Com esse nível que representa o volume de água no canal de rio, dependendo da precipitação a montante do local de monitoramento e a força do represamento do efeito da maré.

Como tal, os maiores níveis de água na maré vazante podem ser vistos na primeira metade do ano, quando as chuvas mais intensas ocorrem na região, e esse nível começa a reduzir quando as chuvas diminuem no segundo semestre do ano (Fig. 5). No entanto, como pode ser visto na Fig. 5, esse efeito também é modulado pela distância para a costa.

No afluente Ajuruxi, mais afastado do oceano Atlântico, o baixo nível de água da maré reduz mais abruptamente a partir de agosto, em comparação com o nível de água em Mazagão, mais próximo do oceano, onde a redução observada no nível de água na maré baixa é mais suave e mais acentuada a partir de outubro. Isso mostra que o efeito da mudança sazonal dos níveis de precipitação é mais forte, em relação ao efeito da maré, quanto mais distante do oceano, mesmo que as distâncias são, relativamente, pequenas em comparação com Óbidos, distante 870 km da costa.

Ao comparar meses típicos do primeiro e segundo semestres do ano (Abril e Outubro, respectivamente), esse mesmo padrão sazonal pode ser observado (Fig. 6). Em todos os três locais o nível de água foi menor em outubro do que em abril. Isso é principalmente devido ao aumento do nível da água no canal do rio na estação chuvosa. Enquanto março é o mês de maior precipitação na região amazônica (Instituto Nacional de Meteorologia 2015), os níveis mais altos de água, na foz do Amazonas, ocorrem em maio (Santos 2006), como resultado do tempo necessário para que as chuvas que caem na Amazônia Oriental e Central cheguem no estuário.

A duração da enchente e vazante também varia ao longo do ano, com um aumento na duração da enchente, e uma diminuição na duração da maré vazante, quando a descarga fluvial da Amazônia é menor no segundo semestre do ano e mais ainda nas marés de quadratura. Mesmo que a força da maré seja, provavelmente, a mesma durante todo o ano, variando com o ciclo lunar, essa mesma força empurrando um volume menor de água (semestre menos chuvoso do ano) pode resultar em um aumento no tempo de enchente.



## **Conclusão**

As variações nas amplitudes de marés, para os três afluentes, seguem o mesmo padrão das amplitudes previstas oficialmente pela marinha, no porto de Santana. Assim, é possível prever o tempo de defasagem e os horários da preamar e baixamar nesses afluentes a partir da previsão da marinha para a maré no porto.

Os níveis de água registrados nos três locais monitorados foram superiores no primeiro semestre do ano (época mais chuvosa) e menores no segundo semestre do ano (época menos chuvosa). O nível mínimo dos rios se eleva com a maior precipitação do primeiro semestre, mas a amplitude de variação com as marés pode ser menor nesse período. O tempo de maré vazante é o dobro de tempo da maré enchente, sendo essa relação independente da variação sazonal ou espacial.

A amplitude da maré é maior nas regiões localizadas mais próximas do oceano e vai diminuindo com o aumento da distância.

### **Considerações acerca dos Próximos passos e das Implicações desse trabalho**

Um próximo passo importante será analisar os dados do nível da água do estuário do Amazonas, como os coletados nesse estudo, em relação aos dados de precipitação, para confirmar essas relações com a sazonalidade das chuvas. Essa análise deve ainda ser reforçada por um longo período de amostragem (aqui os dados cobrem apenas um período de 12 meses), o que permitirá investigar, potencialmente, os efeitos das mudanças climáticas sobre os padrões observados.

No entanto, existem dificuldades logísticas e custos relativamente elevados associados à instalação e monitoramento desses tipos de medidores de maré no estuário amazônico. Como os locais são, relativamente, remotos e de difícil acesso, o armazenamento de dados sobre os medidores está atualmente limitada. De fato, existe uma necessidade de sensores mais baratos, com maior capacidade de armazenamento de dados, a fim de aumentar o número de pontos de controle, para ter um monitoramento mais representativo geograficamente, bem como para facilitar o controle a longo prazo.

Há também desafios associados à gestão e análise de grandes bases de dados, que merecem mais atenção para produzir rotinas simples e acessíveis para analisar este tipo de dados usando software disponíveis gratuitamente. Nesse estudo, os dados foram analisados utilizando, principalmente, a abertura de acesso da linguagem de programação R (R Core Team 2015), e os scripts produzidos nesse estudo poderão ser utilizados para auxiliar estudos similares (Apêndice 1).

Além das implicações do pulso de inundação de maré para a ecologia e gestão de várzea, há também implicações importantes para as comunidades humanas que vivem dentro e dependem dos ambientes de várzea de maré. Especificamente, o planejamento da viagem fluvial é altamente dependente da condição das marés. Os resultados encontrados nesse trabalho, de que a maré demora praticamente o dobro de tempo para vazar do que para encher, coaduna com o conhecimento empírico dos ribeirinhos, que preferem sair de suas regiões para o porto de Santana, durante meia maré de vazante. As embarcações que navegam no sentido da foz junto com a maré que também está baixando, gastam menos tempo e combustível para o transporte fluvial. Assim, também é importante buscar maior aproximação e interações do conhecimento científico com o conhecimento tradicional, para se ter mais recomendações práticas e utilização do conhecimento científico.

Os resultados desse estudo mostram que os estofos da preamar e baixamar ocorrem primeiro em Mazagão (o mais próximo da costa), depois no Maracá, e em seguida, em Ajuruxi

(mais distante da costa) (Figura 8). Isso resulta do fato de a duração da maré vazante é maior do que a duração da maré enchente. Isso, juntamente com a relação forte e diretamente proporcional entre as amplitudes de maré medidos e as previsões das marés oficiais no Porto de Santana (Fig. 4), sugerem que os níveis e horários de marés altas e baixas previstas podem ser extrapolados para as regiões de estudo e todo o estuário, calculando o intervalo de tempo da maré para chegar a cada local. O planejamento da viagem fluvial seria facilitado por uma capacidade de estimar os níveis de maré e horário de pico com base em previsões da maré do porto.

Portanto, os dados aqui demonstrados, representam medições valiosas do pulso de inundação de maré em várzea do estuário amazônico. O monitoramento dos dados de níveis de água da região, em conjunto com tecnologias mais acessível é imprescindível para aumentar a amostragem na região, e conseguir entender as mudanças climáticas que ocorrem. Análises como as apresentadas aqui ajudam a entender a ecologia de um ecossistema, relativamente, pouco estudado, e apoiam o manejo florestal e os meios de vida e o bem-estar das comunidades ribeirinhas dependentes nas vias navegáveis da Amazônia.

## Referências

- Agência Nacional de Águas (2016) Região hidrográfica Amazônica: A maior do mundo em disponibilidade de água. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>. Acesso em: 07/03/2016.
- Beardsley RC, Candela J, Limeburner R, Geyer WR, Lentz SJ, Castro BM, Cacchione D, Carneiro N. (1995) The M2 tide on the Amazon shelf. *Journal Geophysical Research* **100**:2283–2319.
- Cptec-Inpe. 2016. Disponível em: <http://www1.cptec.inpe.br/buscasite.shtml#elnino2015>. Acesso em: 27/06/2016.
- Cunha AC, Cunha, HFA, Takiyama LR, Silva MS, Silveira OF, Pantoja S, Nazare AS, Siqueira EQ. Approach to evaluation of self-purification in estuarine rivers of southeast of Amapa State - Brazil (Completo). *Pesquisas em Geociências (UFRGS. Impresso)*, Rio Grande do Sul - RS, v. **28**, n.I, p. 487-496, 2001.
- Cunha A C, Santos EWG, Santos E, Guedes MC, Oliveira G P, Blanco CJC, Rosman PCC. Importância da hidrodinâmica na dispersão de sementes em sistemas florestais do Baixo Estuário Amazônico. In: Rogério de Paula Lana, Geicimara Guimarães e Gumercindo Souza Lima. (Org.). *Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável (2013) e Congresso Internacional de Agropecuária Sustentável (2013)*. Viçosa: Editora UFV, 2013, v. 1, p. 53-113.
- de Queiroz JAL (2004) *Fitossociologia e Distribuição Diamétrica em Floresta de Várzea do Estuário do Rio Amazonas no Estado do Amapá*. Masters Thesis. Pós-Graduação em Engenharia Florestal – UFPR. Curitiba.
- Devlin AT, Jay DA, Talke SA, Zaron E (2014) Can tidal perturbations associated with sea level variations in the western Pacific Ocean be used to understand future effects of tidal evolution? *Ocean Dynamics* **64**:1093-1120
- Dirzo R, Raven PH (2003) Global state of biodiversity and loss *Annu Rev Environ Resour* **28**:137-167 doi:10.1146/annurev.energy.28.050302.105532.
- Esri (2012) *ArcGIS desktop: Release 10.1*. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- French PW. *Coastal and Estuarine Management*. London, Routledge. 1997.

- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P (1998) Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components *Science* **281**:237-240  
doi:10.1126/science.281.5374.237.
- Gabioux M (2002) Influência da lama em suspensão sobre a propagação da maré na plataforma amazônica. Thesis. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gabioux M, Vinzon SB, Paiva AM (2005) Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf *Cont Shelf Res* **25**:113-125.
- Gallo MN, Vinzon SB (2005) Generation of overtides and compound tides in the Amazon Estuary *Ocean Dynamics* **55**:441-448.
- Godin G (1999) The Propagation of Tides up Rivers With Special Considerations on the Upper Saint Lawrence River *Estuar Coast Shelf Sci* **48**:307-324  
doi:<http://dx.doi.org/10.1006/ecss.1998.0422>.
- Hida N, Guilherme MJ, Shimmi O, Hiraoka M, Mizutani N (1998) Annual and daily changes of river water level at Breves and Caxiuana, Amazon Estuary *Geogr Rev Japan* **71**:100-105.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1977) *Geografia do Brazil: Regiao Norte*. Rio de Janeiro. 466pp.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012) *Manual técnico da vegetação brasileira*. Rio de Janeiro. 271pp.
- Instituto Nacional de Meteorologia (2015) <http://www.inmet.gov.br> Last accessed 20th December 2015.
- Ippen AP, Harleman DRF (1966) Chapter ten: Tidal Dynamics in Estuaries. In: Ippen AP (ed) *Estuary of Coastline Hydrodynamics*. McGraw Hill, New York, USA.
- Jay DA, Leffler K, Diefenderfer HL, Borde AB (2015) Tidal-fluvial and estuarine processes in the lower Columbia River: I. Along-channel water level variations, Pacific Ocean to Bonneville Dam *Estuaries and Coasts* **38**:415-433.
- Junk WJ, Ohly JJ, Piedade MTF, Soares MGM (2000) *The Central Amazon Floodplain: Actual Use and Options for a Sustainable Management*. Backhuys Publishers, Leiden.
- Kosuth P, Callède J, Laraque A, Filizola N, Guyot JL, Seyler P, Fritsch JM, Guimarães V. (2009) Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrological Processes* **23**:3141–3150.

- Kubitzki K, Ziburski A (1994) Seed dispersal in flood plain forests of Amazonia. *Biotropica* **26**:30-43.
- Larcombe P, Jago CF (1996) The morphological dynamics of intertidal megaripples in the Mawddach Estuary, North Wales, and the implications for palaeoflow reconstructions. *Sedimentology* **43**:541-559.
- Lima JdF, Santos TdSe (2014) Aspectos econômicos e higiênico-sanitários da comercialização de camarões de água doce em feiras livres de Macapá e Santana, estado de Amapá 2014. 4:8 doi:10.18561/2179-5746/biotaamazonia. v. 4. n. 1. p 1-8.
- Marengo JA, Tomasella J, Soares WR, Alves LM, Nobre CA (2011) Extreme climatic events in the Amazon basin *Theoretical and Applied Climatology*. **107**:73-85 doi:10.1007/s00704-011-0465-1.
- Matte P, Jay DA, Zaron ED (2013) Adaptation of classical tidal harmonic analysis to nonstationary tides, with application to river tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **30**:569-589.
- Melo ABC, Cavalcanti IFA, Souza PF (2009) Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos.
- Miranda LB, Castro BM, Kjerfve B. Princípios de oceanografia física de estuários. São Paulo – Editora da Universidade de São Paulo - Edusp. 2002.
- Moftakhari H, Jay DA, Talke SA, Kukulka T, Bromirski PD (2013) A novel approach to flow estimation in tidal rivers. *Water Resources Research* **49**:4817-4832.
- Moftakhari H, Jay DA, Talke SA, Schoellhamer DH (2015) Estimation of historic flows and sediment loads to San Francisco Bay, 1849–2011. *Journal of Hydrology* **529**:1247-1261.
- National Geospatial-Intelligence Agency (2014) Publication 124, Sailing Directions (en route): East coast of South America. Fourteenth Addition. Disponível em: [http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV\\_PUBS/SD/Pub124/Pub124bk.pdf](http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV_PUBS/SD/Pub124/Pub124bk.pdf) Acesso em: 08/03/2016.
- Nordtvedt K (2001) Testing Newton's third law using lunar laser ranging. *Classical and Quantum Gravity* **18**:L13.
- Onset (2016) Disponível em: [http://www.onsetcomp.com/files/manual\\_pdfs/12315-G%20MANU20.pdf](http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/12315-G%20MANU20.pdf). Acesso em: 28/04/2016.
- Pinedo-Vásquez M, Padoch C, Ayres J, Henderson A (1999) Changes in soil formation and vegetation on silt bars and backslopes of levees following intensive production of rice

- and jute. In: Padoch C, Ayres JM, Pinedo-Vasquez M, Henderson A (eds) *Várzea: diversity, development, and conservation of Amazonia's whitewater floodplains*. pp 301-311.
- Prance GT (1979) Notes on the vegetation of Amazonia III. The terminology of Amazonian forest types subject to inundation *Brittonia* **31**:26-38.
- R Core Team (2015) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ribeiro JL (2013) *Aplicação da técnica de wavelets para análise e previsão de marés no estuário do Amazonas*. Thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Richey JE, Nobre C, Deser C (1989) Amazon River discharge and climate variability: 1903 to 1985 *Science* **246**:101-103.
- Rogge GD, Pimenta JA, Bianchini E, Medri ME, Colli S, Alves LMT (1998) Metabolismo respiratório de raízes de espécies arbóreas tropicais submetidas à inundação *Brazilian Journal of Botany* **21**:153-158.
- Salati E, Vose PB (1984) Amazon Basin: A System in Equilibrium *Science* **225**:129-138 doi:10.1126/science.225.4658.129.
- Salomão P, Terezo EFM, Jardim MAG (2007) *Manejo florestal nas várzeas: oportunidades e desafios*. Publication of the Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém. 210 p. ISBN: 978-85-7098-144-8.
- Sambatti J, Leduc R, Lubeck D, Roberto Moreira J, Roberto dos Santos J (2012) Assessing forest biomass and exploration in the Brazilian Amazon with airborne InSAR: an alternative for REDD *The Open Remote Sensing Journal* **5**:21-36.
- Santos VF (2006) *Ambientes Costeiros Amazônicos: Avaliação de Modificações por Sensoriamento Remoto*. Thesis. Universidade Federal de Fluminense, Niterói, RJ, Brazil.
- Schöngart J (2008) Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains *For Ecol Manag* **256**:46-58 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.037>.
- The Open University (1999) *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. Butterworth-Heinemann, Oxford. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-008036372-1/50000-3>.
- Tomasella J, Borma LS, Marengo JA, Rodriguez DA, Cuartas LA, A. Nobre C, Prado MCR (2011) The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem *Hydrological Processes* **25**:1228-1242 doi:10.1002/hyp.7889.

- United Nations Environment Program (2008) Environment Outlook in the Amazonia – GEO Amazonia. Disponível em: <http://www.unep.org/pdf/GEOAMAZONIA.pdf>. Acesso em: 11/02/2016.
- Widdows J, Brinsley M (2002) Impact of biotic and abiotic processes on sediment dynamics and the consequences to the structure and functioning of the intertidal zone *J Sea Res* **48**:143-156 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00148-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00148-X).
- Wittmann F et al. (2006) Tree species composition and diversity gradients in white-water forests across the Amazon Basin *J Biogeogr* **33**:1334-1347 doi:10.1111/j.1365-2699.2006.01495.
- Zaron ED, Jay DA (2014) An analysis of secular change in tides at open-ocean sites in the Pacific *J Phys Oceanogr* **44**:1704-1726.
- Zoneamento Ecológico-Econômico (2008) Macrodiagnóstico do estado do Amapá primeira aproximação do ZEE. Macapá: IEPA, 2008. 3ª edição. 142p. URL <http://www.iepa.ap.gov.br/arquivopdf/macrodiagnostico.pdf>.



**CAPÍTULO 2: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE INUNDAÇÃO PARA  
FLORESTAS DE VÁRZEA ESTUARINAS**

## **Desenvolvimento de um modelo de inundação para florestas de várzea estuarinas**

### **Resumo**

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo, abrangendo uma área de aproximadamente 5,1 milhões de km<sup>2</sup>. Dentre a diversidade de ambientes presentes na floresta Amazônica, existem as florestas alagáveis. Quando as áreas alagáveis estão localizadas na foz ou no estuário do rio Amazonas, sendo influenciadas pelas marés do oceano atlântico, recebem o nome de “floresta de várzea estuarina”. O estresse ocasionado pelo longo período de inundação e as condições de anoxia do ambiente, fez com que as comunidades arbóreas de florestas de várzea desenvolvessem uma ampla variedade de estratégias adaptativas. Entretanto, para um melhor entendimento de como as condições de inundações afetam as comunidades de plantas em regiões específicas, é necessária a determinação do período e do número de horas em que essa região pode ser alagada ao longo do ano. Esse trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo de inundação, usando a plataforma de modelagem espacial Dinâmica EGO, que simule o tempo que cada nível do relevo da área estudada fica inundado. Tal modelo tem como principais variáveis de entradas o microrelevo, juntamente com as informações dos canais de drenagem, e a variação dos níveis de maré. Com os resultados obtidos com a simulação do modelo desenvolvido, constatou-se os padrões encontrados com o monitoramento da maré ao longo do estuário, verificado no capítulo 1. O modelo foi capaz de prever que o mês de junho, representando o semestre com níveis superiores de precipitação, teria maior área inundada por maior período, em todas as fases da lua. Já em novembro, representando semestre com baixos níveis de precipitação, a área inundada é bem inferior a junho, ficando menor tempo sob inundação. Portanto, foi possível desenvolver um modelo coerente com as realidades das florestas de várzea através do software Dinamica EGO.

**Palavras-chave:** áreas alagáveis; modelagem; estuário do rio Amazonas; Dinâmica EGO

## Introdução

As florestas tropicais têm sido amplamente reconhecidas como principais ecossistemas que mantêm os processos biológicos e físicos locais, regionais e globais (Wright 2005). Elas fornecem habitats para uma grande diversidade de espécies vegetais e animais (Arroyo-Rodríguez et al. 2006); regulam processos ecológicos como dispersão, migração, especiação, concorrência e extinção (Arroyo-Rodríguez et al. 2006); fornecendo ainda uma variedade de serviços ecossistêmicos (Díaz et al. 2005).

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo, abrangendo uma área de aproximadamente 5,1 milhões de km<sup>2</sup> (Costa Neto e Rosário 2008). Dentre a diversidade de ambientes presentes na floresta Amazônica, existem as florestas alagáveis. Segundo Piedade et al. (2001), as áreas alagáveis da Amazônia ocupam cerca de 20% da região quando se inclui nessa classificação todo o conjunto de corpos d'água, como rios, igarapés, lagos, paranás e manguezais distribuídos em toda a sua extensão. Entretanto, considerando somente as áreas que estão situadas ao longo de grandes rios da região, as várzeas e os igapós representam 6% da Amazônia (Junk 1993).

Quando as áreas de várzea estão localizadas na foz do rio Amazonas, e influenciadas pelas marés do oceano atlântico, dentro do estuário amazônico, recebem a denominação de “floresta de várzea estuarina” (Queiroz 2004). Essas florestas, em razão do clima e dos aportes de nutrientes, têm uma dinâmica intensa, contribuindo para o crescimento rápido das espécies vegetais (Queiroz e Machado 2008).

Na Amazônia Central, a amplitude média de inundação dos grandes rios é de 10 metros. Nessa região, as árvores podem ficar inundadas por até 230 dias no ano, o que condicionou essas plantas a adaptarem-se às condições específicas do sistema alagável, além de constituírem comunidades com estruturas características (Junk et al. 1989).

O estresse ocasionado pelo longo período de inundação e as condições de anoxia do ambiente, fez com que as comunidades arbóreas de florestas de várzea desenvolvessem uma ampla variedade de estratégias adaptativas que incluem a formação de raízes adventícias (Wittmann e Parolin 2005), lenticelas e arênquima nas raízes (Ferreira 2006; Ferreira et al. 2006; Worbes 1997), mudanças na taxa e no tempo de germinação, na forma de dispersão de sementes (Kubitzki e Ziburski 1994; Parolin et al. 2004; Oliveira-Wittmann et al. 2007), na dormência cambial e na formação de anéis de crescimento nas árvores (Worbes 1985; Schöngart et al. 2002).

Entretanto, para um melhor entendimento de como as condições de inundações afetam as comunidades de plantas em regiões específicas, é necessária a determinação do período e do número de horas em que essa região encontra-se alagada ao longo do ano. Para tanto, necessita-se do uso de modelos de inundação espacializados que sejam o mais simples possível, com poucas variáveis de entrada, para que possa ser utilizado em diferentes regiões e realidades, mas que gerem resultados realistas que permitam analisar a relação do estresse por alagamento com a composição e distribuição de espécies arbóreas na região.

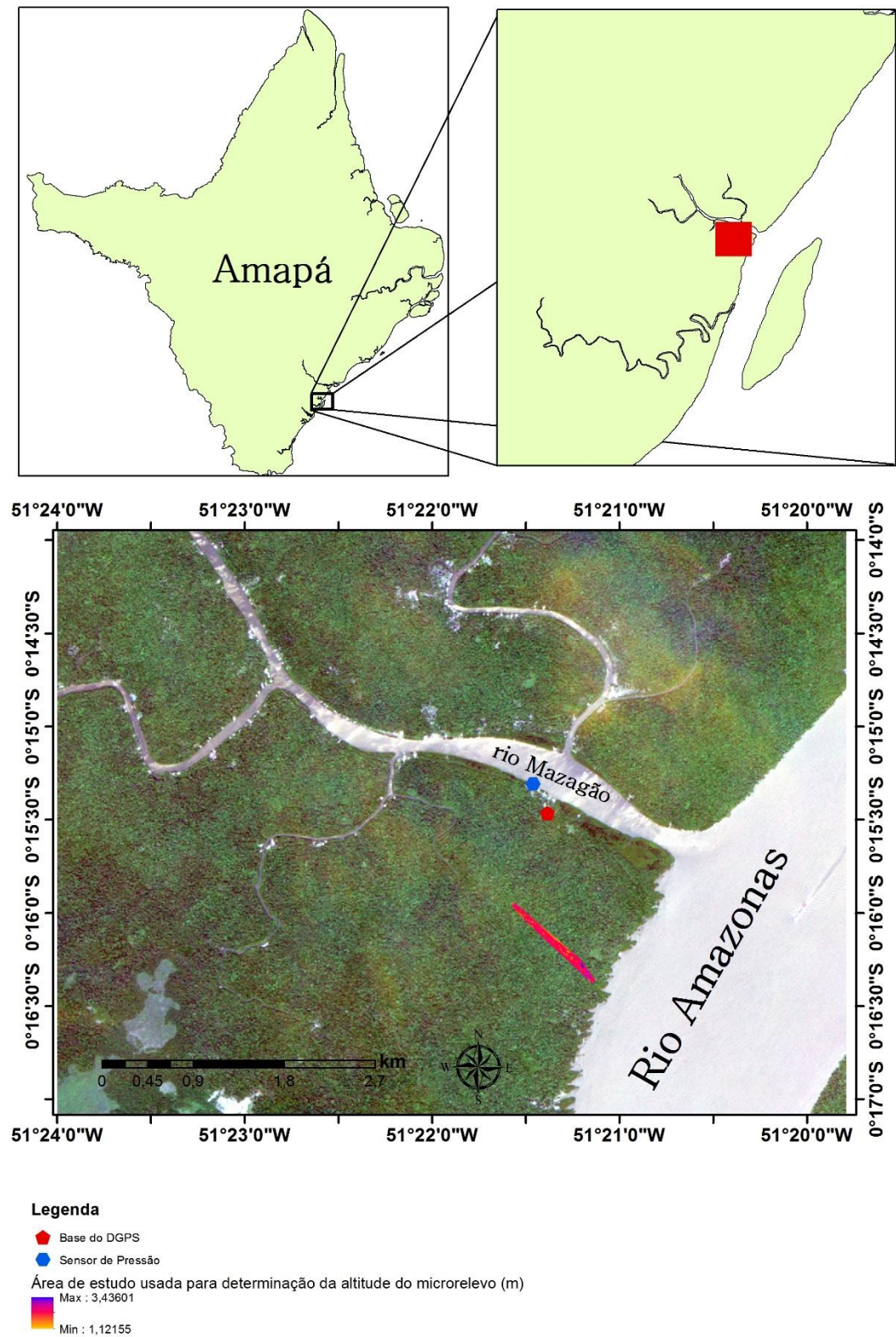
Portanto, esse trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo de inundação, usando a plataforma de modelagem espacial Dinâmica EGO, que simule o tempo que cada nível do relevo da área estudada fica inundado. Com isso, objetiva-se também subsidiar o planejamento do manejo da floresta de várzea e futuras pesquisas sobre as relações da inundação com características fitossociológicas como riqueza, densidade, diversidade e volume, entre outras.

## **Material e métodos**

### **Área de Estudo**

A área de estudo está incluída em uma das localidades estudadas pelo projeto: “Ecologia e manejo florestal para uso múltiplo de várzeas do estuário amazônico” – FLORESTAM, liderado pela Embrapa Amapá. A área de abrangência do projeto envolve as várzeas estuarinas do estuário amazônico (Pará e Amapá), sob influência direta do fluxo diário das marés oceânicas. Essas áreas são totalmente distintas das várzeas do médio Amazonas, inclusive em relação ao período de inundação.

O trabalho foi desenvolvido em área localizada no Município de Mazagão Velho, Amapá, que possui aproximadamente 13.189 km<sup>2</sup> de extensão, situado sob as coordenadas geográficas 00° 06' 54" S e 51° 17' 20" W. Nesse município, por meio do projeto Florestam, foi selecionado um afluente do canal norte do rio Amazonas (rio Mazagão), onde foi alocado um transecto para estudo de manejo florestal e ecologia em áreas de várzea (Fig. 11). A seleção dessa área de estudo se deu pela maior influência do rio Amazonas, devido sua localização ser bem próxima ao Canal Norte do Amazonas, distante cerca de 150 m.



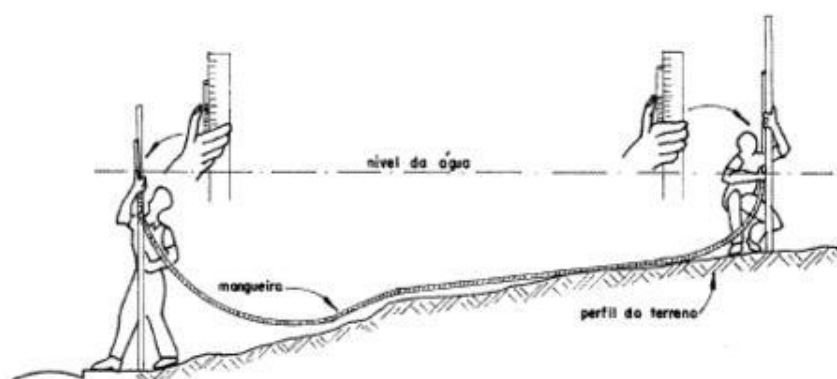
**Fig. 11.** Localização da área de estudo, na foz do rio Mazagão, situada no município de Mazagão-AP. Fonte: Jonas Rodrigues

O transecto foi plotado com o uso de trenas, estacas e fitas para demarcação. Foram instaladas 20 parcelas de 10 m x 25 m, distribuídas ao longo do transecto em função do microrelevo da área em estudo, de maneira a amostrar áreas de várzea alta e várzea baixa, considerando que a distância do rio é uma variável preditora quantitativa contínua, não sendo necessário ter níveis fixos de variação desse gradiente. Desta maneira, a área total inventariada foi de 0,5 ha e a área demarcada para levantamento do microrelevo e da drenagem foi de, aproximadamente, 7 ha.

## Coleta dos Dados

### Determinação do microrelevo e mapeamento dos canais de drenagem

A caracterização do microrelevo da área de estudo foi feita com uma mangueira de nível, pelo princípio dos vasos comunicantes (Fig. 12). Nesse método, partiu-se de um marco inicial com uma medida 1,04 m e o nível foi medido nos pontos em que o microrelevo variava, utilizando a mangueira transparente cheia de água. Essa diferença de microrelevo foi verificada ao longo de todo o transecto, tendo como base as próprias árvores para realizar as medições. Mediu-se também, as distâncias e os azimutes de cada ponto de medição em relação ao marco inicial. As distâncias foram feitas com o auxílio de uma trena de 50 m e de uma trena a laser, e os azimutes verificados por GPS Garmin CSx. Como o caminhamento foi feito ao longo do transecto de 1000 m extropolando 35 m para cada lado, a área amostrada foi de 70000 m<sup>2</sup>.



**Fig. 12.** Ilustração do processo de caracterização do relevo por meio da metodologia de mangueira de nível, pelo princípio dos vasos comunicantes. Fonte: Milito (2009).

Com o uso da mangueira de nível para detectar as diferenças entre os microrrelevos, os valores maiores estavam representando os microrelevo mais baixos e os menores representavam os microrelevo mais altos, como pode ser visualizado na Fig. 14. Assim, após

o levantamento, todos os valores de cada ponto foram subtraídos de 2,6 m, valor 2,7% superior ao maior valor encontrado. Após a subtração por 2,6 m, as diferenças de altitude entre os pontos continuaram sendo as mesmas, mas os pontos com maiores valores passaram a representar microrelevo mais alto e pontos com valores menores passaram a representar microrelevo mais baixo, conforme exemplo abaixo:

**Tabela 2:** Exemplo demonstrando o procedimento usado no processamento dos dados do levantamento do microrelevo da área de estudo

<b>Microrelevo</b>	<b>Medição com a mangueira de nível (m)</b>	<b>Subtraindo de 2,6 m</b>
microrelevo baixo	1,78	0,82
microrelevo baixo	1,43	1,17
microrelevo alto	0,45	2,15
microrelevo alto	0,17	2,43

Nesse exemplo, a diferença altimétrica entre os dois primeiros pontos será de 0,35 m, tanto no levantamento original com a mangueira, quanto depois da transformação. Os valores de todos os pontos medidos ao longo da área de estudo foram relacionados com o ponto do marco inicial, que teve sua altitude ortométrica, em relação ao nível médio dos mares, determinada com o auxílio do DGPS. Assim, foram mantidas as variações de altura nos pontos medidos ao longo do transecto e foram calculados os valores reais das altitudes ortométricas de todos os pontos, possibilitando a confecção do mapa com as variações altimétricas do microrelevo ao longo do transecto.

Os canais de drenagem presentes na área de estudo também foram mapeados. Foi realizado o “*track*” dos mesmos, com auxílio de GPS Garmin 76CSx, por caminhamento ao longo de cada canal. Também foram medidas a largura e a profundidade ao longo dos canais.

O processamento para geração do microrelevo da área, foi realizado em ArcGis 10.1, pelo método de interpolação *Natural Neighbour* (Brassel and Reif 1979), que utiliza a média ponderada dos pontos vizinhos, com pesos proporcionais às áreas amostradas. Adotou-se o tamanho da célula de 0,5 m para o mapa do microrelevo. Posteriormente, foram incorporados os canais de drenagem dentro do microrelevo e obteve-se um único mapa, no formato raster, representando a área de estudo, com informações do microrelevo e dos canais de drenagem. Como os dados do microrelevo estão em função da altitude ortométrica, quando incorporadas as informações dos canais de drenagem, o mapa passaria a ter alguns valores negativos, que seriam os dados dos canais de drenagem cujo fundo estaria abaixo do nível médio dos mares. Isso acarretaria em erro no processamento do modelo. Então, foi somado o valor de 10 m em

todos os dados, para resolver o problema dos dados negativos e manter as diferenças relativas das alturas do microrelevo.

### **Uso do DGPS para determinar a altitude ortométrica do ponto inicial e do sensor**

Os levantamentos foram realizados com o posicionamento DGPS pelo método relativo cinemático, no qual dois receptores coletam dados, simultaneamente, durante um determinado intervalo de tempo, sendo um instalado em uma estação de referência (estação base) e o outro nos pontos de interesse (Monico 2007; Seeber 1993). O equipamento utilizado nesse levantamento foi o DGPS da Topcon (Hiper lite/lite+).

Foram efetuadas medidas durante três dias para determinação da BASE, lugar localizado entre a área de estudo e o local onde o sensor de pressão foi instalado. Cada dia de coleta teve duração, em torno de 4 horas de rastreamento. Dessa maneira, foi possível selecionar a coleta com menos erros para usar como BASE (Apêndice 3) e processar os dados do ROWER (área de estudo e local do sensor). Os dados rastreados armazenados nos receptores foram, posteriormente, transferidos para o computador, onde foram realizados o processamento e ajustes. A correção dos dados da BASE foi feita pelo método PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), serviço online gratuito para o pós-processamento de dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que utiliza as observáveis da fase da onda portadora, coletadas por receptores de duas frequências e em conjunto com os produtos precisos (órbitas e erro dos relógios dos satélites) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2013). O pós-processamento da correção dos dados do Rower em relação à BASE se deu no *software* Topcon Tools 8.2 (versão demo) e a determinação da altitude ortométrica se deu no *software free* MAPGEO2015 1.0 (Apêndice 4).

### **Dados de Maré**

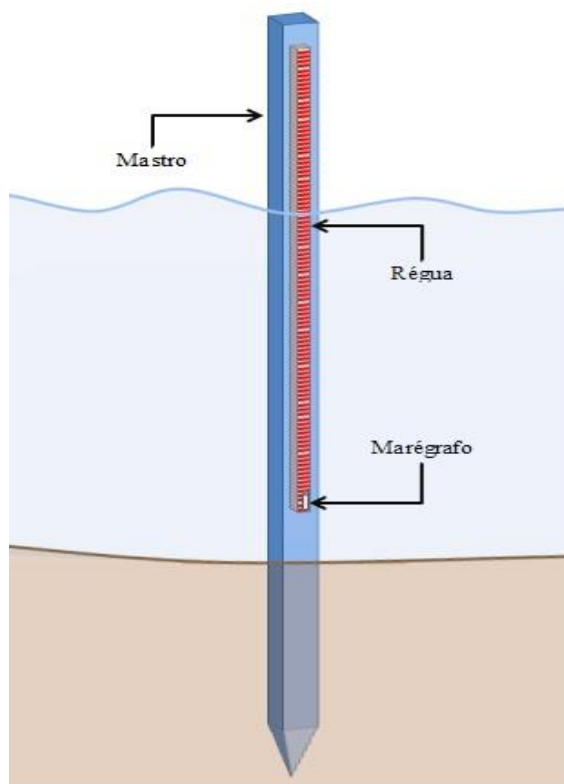
A informação sobre a variação na altura da maré ao longo do tempo foi obtida com a instalação de um sensor de pressão Hobo (water level logger U20), o qual foi acoplado em tubo graduado (régua) e fixo em um mastro de madeira (Fig. 13). O sensor de pressão foi configurado para fazer leituras automáticas da pressão d'água a cada 5 minutos. No momento de descarregar os dados do sensor, relaciona-se a última pressão registrada pelo equipamento, com o nível da água que está na régua, naquele mesmo instante do registro da última medida de pressão d'água. Com isso o equipamento determinará automaticamente todas as medidas de altura da coluna



d'água através da relação com os valores de pressão medidos pelo sensor. Da mesma forma como explicado no Capítulo 1.

Os dados da variação da coluna d'água registrados pelo sensor também foram convertidos para altura do nível de água, em relação ao nível médio dos mares, com auxílio dos dados obtidos com DGPS para o local onde o sensor está instalado e acrescidos 10 m para que estivessem no mesmo plano dos dados do microrelevo.

Dessa forma, tanto os dados do microrelevo com os canais de drenagem quanto os dados registrados pelo sensor estão na mesma escala, definida pela altitude ortométrica e acrescidos 10 m, pois serão esses os dados de entrada do modelo desenvolvido no presente estudo.



**Fig 13.** Ilustração de como o marégrafo está instalado na área de estudo. O sensor do marégrafo está conectado numa régua de madeira e a mesma está acoplada a um mastro. Fonte: Projeto Florestam.

Foi verificado também, a cota de inundação da área de estudo em relação aos dados da maré registrados no sensor. Ao longo do transecto foram observados de maneira simultânea 4 pontos, registrando-se o exato momento em que a maré adentrou em cada um desses pontos de observação. Posteriormente, esses dados foram relacionados com o nível da água na régua do sensor, que foram registrados a cada 5 min por um observador que ficou no local em que o sensor está instalado, durante o mesmo período em que estavam sendo realizadas as medições na floresta. Dessa maneira, pôde-se identificar em qual altura registrada pelo sensor a água

começa a adentrar em cada um dos pontos observados ao longo da área de estudo, determinando assim, a cota de inundação da área.

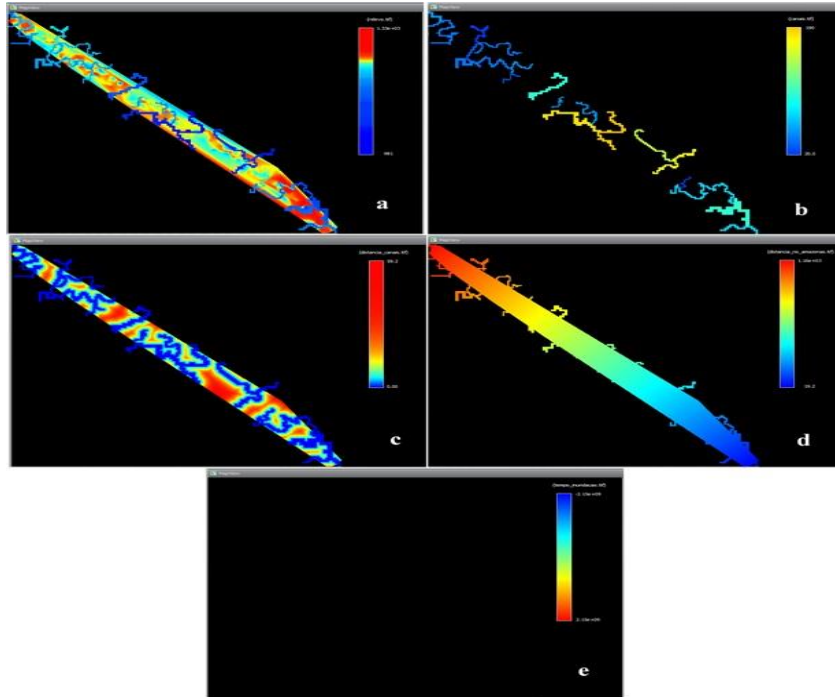
## **Desenvolvimento do Modelo**

### **Dados de entrada**

O modelo de inundação foi desenvolvido no *software free* Dinamica EGO, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais-CSR/UFMG (Soares-Filho 2016). Possui como variáveis de entrada o microrelevo da área de estudo, os canais de drenagem presentes na área, a altura da maré registrada pelo sensor, a distância dos canais de drenagem, a distância do rio Amazonas, o tamanho das células, as horas de alagamento e a hora de início da simulação (Fig. 14).

O microrelevo, obtido pela interpolação, foi inserido no formato raster, em escala de centímetros (Fig. 14a). A altura da maré, também em cm, foi inserida em formato de planilha, em função do dia Juliano, que é a contagem sequencial dos dias ao longo do ano. Os canais de drenagem (Fig. 14b), a distância das células do microrelevo para os canais de drenagem (Fig. 14c) e a distância das células do microrelevo para o rio Amazonas (Fig. 14d) foram inseridos em formato raster. O tamanho da célula foi inserido no Dinamica EGO, por meio de uma caixa numérica. As horas de alagamento também estão em formato raster (Fig. 14e), a partir de um mapa com valores das células todos nulos para que a cada rodada seja contabilizada as horas de inundação. Para isso, o modelo precisa iniciar com hora de inundação “zero”. O modelo foi desenvolvido para iniciar com a maré enchente, por isso foi adicionada uma entrada para que seja informado o horário em que iniciará a simulação.

Cada rodada que o modelo processa, está em função de simular como estará a situação do microrelevo da área estudada em relação à condição da maré, a cada uma hora de tempo. Essa simulação foi realizada do dia 21 de maio a 16 de dezembro de 2015.



**Fig. 14.** Temas dos dados de entrada inseridos no modelo. Relevo aumentado em 10 metros (a), profundidade canais de drenagem em cm (b), distância dos canais de drenagem (c), distância do Rio Amazonas (d) e mapa com horas de alagamento inicial (e).

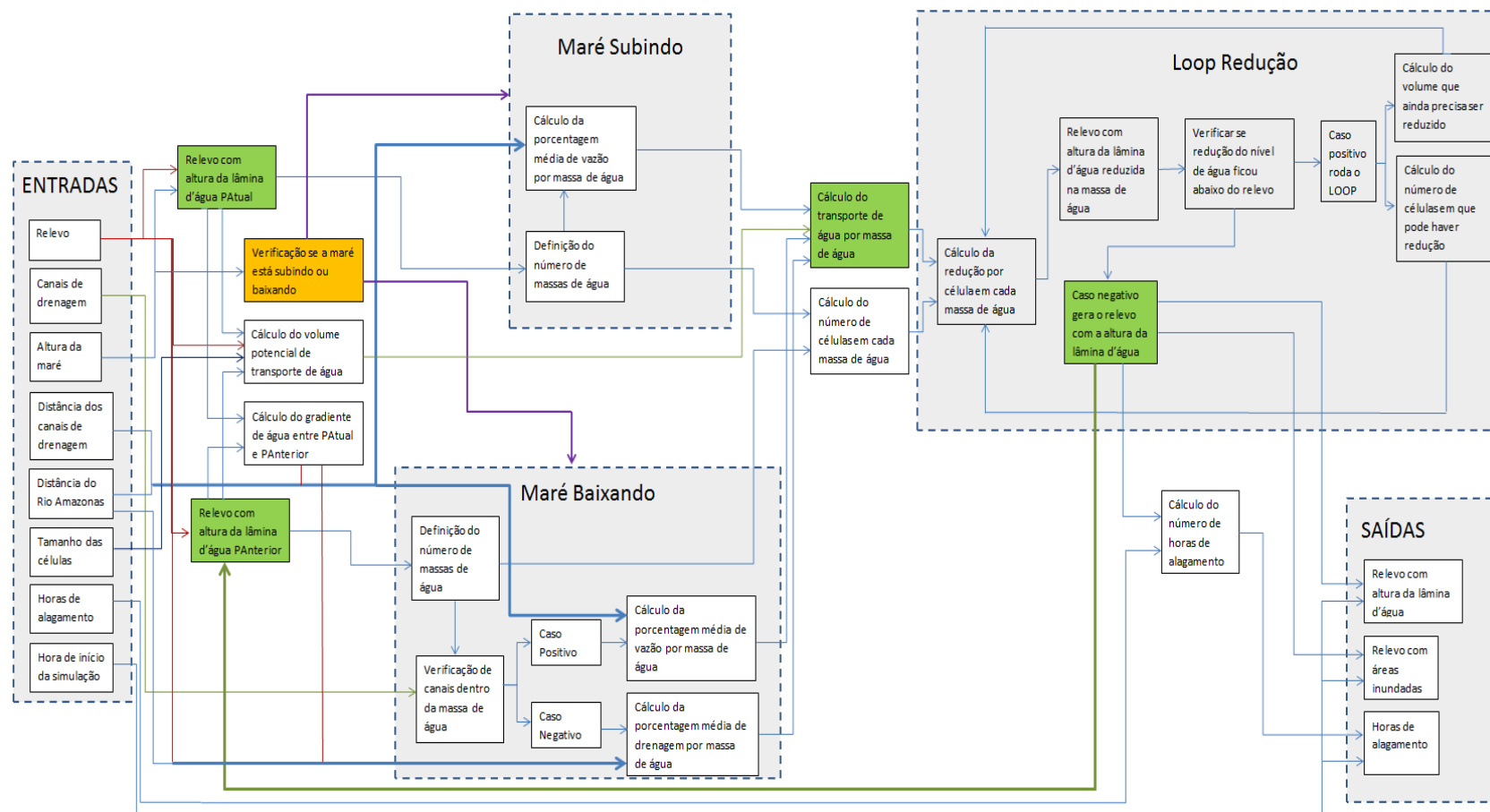
### Processamento do modelo

Como dito anteriormente, o modelo foi desenvolvido para iniciar com a maré enchente. O ponto de partida do modelo é o cálculo do relevo com a altura inicial da lâmina d'água (altura da maré) para o passo atual (**PAtual**, Fig. 15), que seria a rodada atual do modelo, e subtrair o relevo com a altura da lâmina d'água do passo anterior (**PAnterior**, Fig. 15), que seria a rodada anterior do modelo. Dessa forma será possível identificar o gradiente de coluna d'água de uma rodada para a outra. Nesse caso, a primeira rodada do modelo irá iniciar apenas com os dados do relevo para o passo anterior, sem a altura da lamina d'água. Dessa forma, o gradiente da coluna d'água na primeira rodada não representa seu valor realmente. Então, é preciso descartar os resultados obtidos na primeira rodada do modelo. Na segunda rodada do modelo, o relevo com a altura da lâmina d'água do passo anterior vai ser aquele gerado ao final da primeira rodada e o relevo com a altura inicial da lâmina d'água do passo atual será aquele gerado na presente rodada. E assim sucessivamente para as demais rodadas. Da mesma forma como na primeira rodada, o **cálculo do gradiente de água** será feito pela diferença da altura inicial da lâmina d'água do passo atual e da altura do passo anterior. Esse gradiente será em centímetros, representando a altura da coluna d'água, e é calculado para cada célula do relevo.

O próximo passo é o cálculo do volume potencial de transporte de água, o qual representa a quantidade máxima de água que pode ser transportada entre a rodada anterior e a rodada atual. Seu cálculo é em função do quanto que o gradiente de água, calculado em centímetros, representa de volume de água, em litros, sendo necessário para a determinação do quanto realmente de água será transportado. A porcentagem do volume potencial que será transportado se alterará em função das relações de transporte de água adotadas para esse modelo.

As relações de transporte de água são em função das distâncias das células do mapa do relevo para o rio Amazonas, para os canais de drenagem, da altitude e da altura da coluna d'água. Essas relações estão em porcentagem, em que cada célula terá um valor médio de porcentagem de transporte de água, havendo diferenças nas relações dependendo se a maré está enchendo ou vazando.

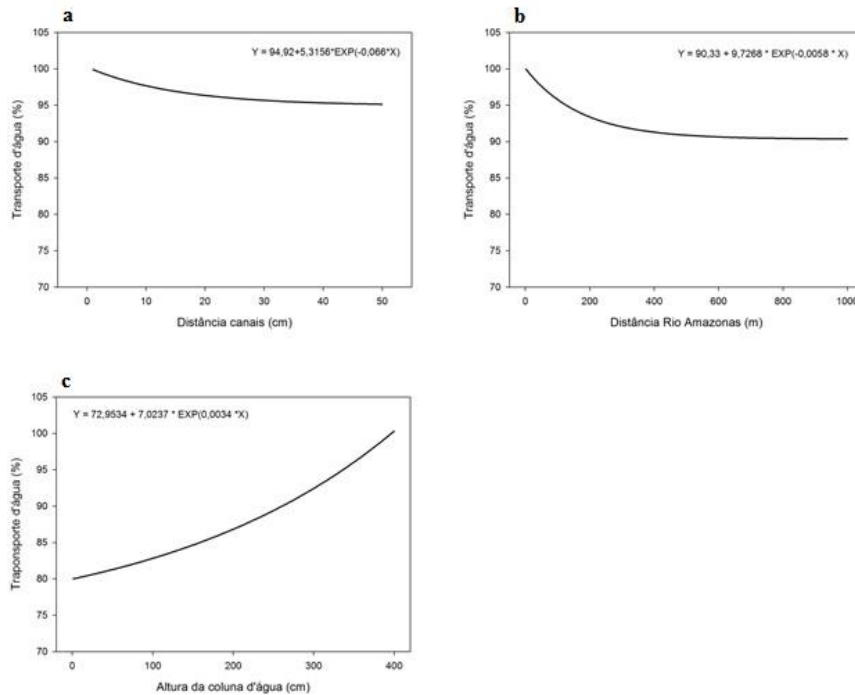
Para **verificar se a maré está enchendo ou vazando**, o modelo irá comparar a altura da maré do passo anterior e do passo atual. Se a altura da maré do passo anterior for menor que a altura do passo atual, significa que a maré está enchendo. No caso contrário, a maré está vazando.



**Fig. 15.** Fluxograma do funcionamento do modelo desenvolvido para simulação da inundação de floresta de várzea do estuário do rio Amazonas, utilizando a plataforma DinâmicaEGO.

### Processo da enchente

Primeiramente, o modelo calculará o percentual de transporte de água por célula, através das relações de transporte de água em função das distâncias para o rio Amazonas (segundo a equação  $Y=90,33+9,7268*EXP(-0,0058*X)$ ) e para os canais de drenagem (segundo a equação  $Y=94,92+5,3156*EXP(-0,0066*X)$ ), bem como da altura da coluna d'água (segundo a equação  $Y=72,9534+7,0237*EXP(0,0034*X)$ ), Fig. 16.



**Fig. 15.** Relações adotadas no modelo para a determinação da porcentagem média da vazão para cada célula, no caso da maré enchente. Sendo em função da distância para os canais (a), distância para o rio Amazonas (b) e a altura da coluna d'água (c).

Após isso, o modelo identificará o **número de massas de água**, que são regiões alagadas formadas por um conjunto de células que estão ligadas. Em relação à enchente, esse número de massas de água será determinado utilizando o relevo com a altura inicial da lâmina d'água do passo atual, em que as células inundadas serão determinadas pela diferença entre a altura inicial da lâmina d'água do passo atual e a altura do relevo. Para cada massa de água no relevo será dado um valor de categoria e o modelo passará a simular o transporte de água para cada categoria de forma independente, reunindo o resultado das simulações de cada categoria ao final da rodada.

Os valores do potencial e da porcentagem de transporte de água por célula serão transformados em valores médios para as categorias e então será realizado o cálculo do volume transportado na massa de água e o número de células que compõe a massa de água. Por exemplo, na rodada atual o modelo verificou que o volume potencial de transporte de água na massa de

água 10 é de 500 litros, mas de acordo com as relações das células que compõe a massa de água com a distância para rio Amazonas, distância para os canais de drenagem e a altura da coluna d'água, a mesma têm percentual médio de transportar 90% desse valor, então, nessa massa de água haverá o acréscimo de 450 litros de água na rodada atual. Entretanto, por fins de estrutura do modelo, quando a maré está enchendo, não é realizado o acréscimo de água na massa de água, mas sim a subtração da diferença entre o potencial de transporte e o que será realmente transportado, neste exemplo 50 litros. Então, o modelo subtrairá os 50 litros de água da altura inicial da lâmina d'água do passo atual.

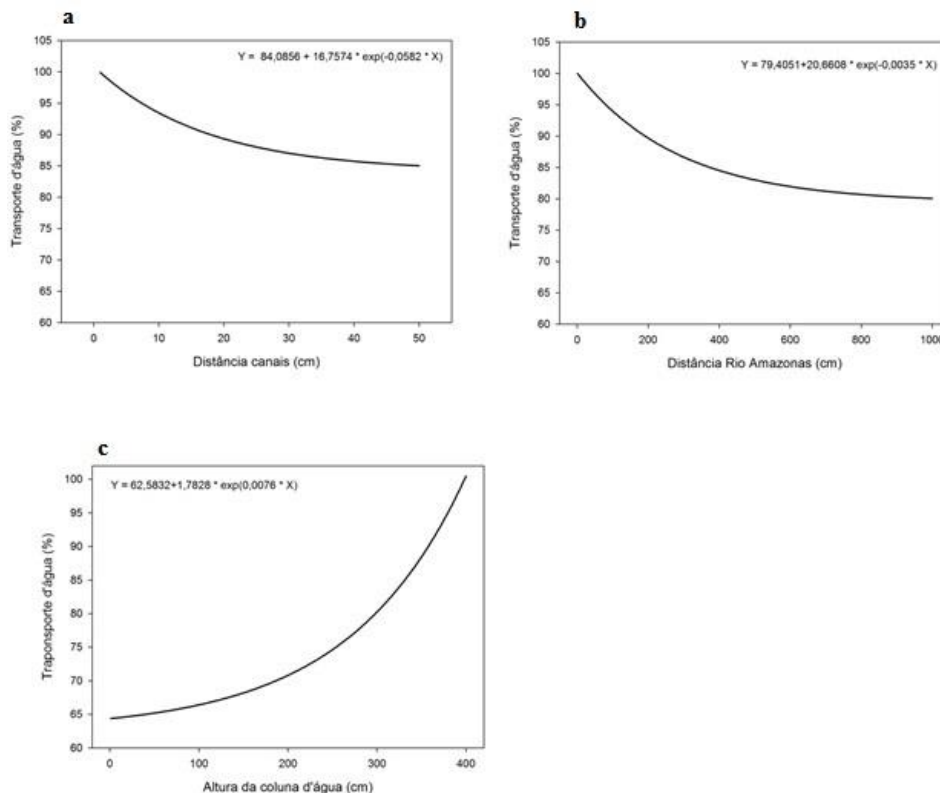
**O loop de redução:** após a determinação do volume que será transportado e do número de células da massa de água que está sendo rodada, no loop de redução é feito o cálculo do volume que será reduzido em cada célula da massa de água, sendo reduzido igualmente por todas as células. O valor de volume que será reduzido é transformado em altura de lâmina d'água (centímetros), para que se possa subtrair da altura inicial de lâmina d'água das células que compõe a massa de água. Realizada a subtração, é verificado se a altura da lâmina d'água reduzida ficou com valor inferior ao relevo original, aquele sem informação de coluna d'água. Caso tenha ficado, significa que o modelo está reduzindo água de onde já não tem para reduzir, pois já chegou ao relevo original, ou seja, no terreno da área. O modelo identificará em quais células que compõem a massa de água ocorreram essa situação e quantificará o número de células e o volume de água que foi reduzido indevidamente. Após a contabilização desse volume, é realizado novamente o cálculo da nova redução em cada célula que ainda possui altura da lâmina d'água superior ao relevo da área. O modelo realizará esse procedimento sucessivamente até que o volume calculado do transporte de água para aquela massa de água tenha sido totalmente reduzido. Esse processo do loop de redução será feito para cada massa de água presente na área de estudo, gerando ao final de todos os loops de redução o mapa do relevo com a altura final da lâmina d'água para todas as massas de água, para posteriormente gerar os produtos de saída (relevo com a altura da lâmina d'água, o relevo com as áreas inundadas e quantas horas o relevo permaneceu inundado no dia).

### **Maré da vazante**

O processo da vazante também iniciará com a determinação do percentual de transporte de água devido a vazão em cada célula em função das distâncias para rio Amazonas (segundo a equação  $Y=79,4051+20,6608*EXP(-0,0035*X)$ ) e para os canais de drenagem (segundo a equação  $Y=84,0856+16,7574*EXP(-0,0582*X)$ ) e altura da coluna d'água (segundo a equação

$Y=62,5832+1,7826*EXP(0,0076*X)$  ), Fig. 17 e devido a drenagem em função da distância para o rio Amazonas (segundo a equação  $Y=22,2857+77,8371*EXP(-0,002*X)$ ), altura do relevo (segundo a equação  $Y=1,7667+0,0014*EXP(0,0084*X)$ ) e altura da coluna d'água (segundo a equação  $Y=12,6099+87,6539*EXP(-0,006*X)$ ), Fig. 18.

No caso da vazante, o número de massas de água será determinado utilizando a altura da lâmina d'água do passo anterior, uma vez que a altura da lâmina d'água do passo atual será inferior à do passo anterior. As células inundadas serão determinadas pela diferença entre a altura da lâmina d'água do passo anterior e a altura do relevo. Igualmente a simulação com a maré enchendo, após a categorização das massas de água, o modelo passará a simular de forma independente para cada massa de água, reunindo os resultados das simulações ao final da rodada. Os valores do potencial e da porcentagem de transporte de água por célula serão transformados em valores médios para as categorias e então será realizado o cálculo do volume transportado na massa de água e o número de células que compõe a massa de água.

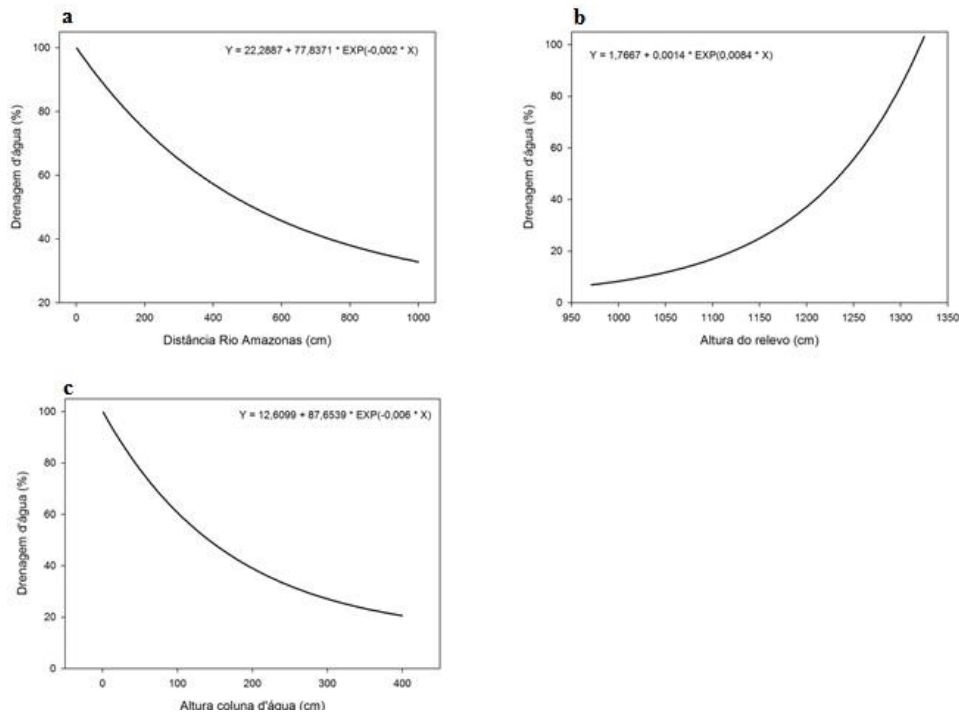


**Fig. 167.** Relações adotadas no modelo para a determinação da porcentagem média de vazão para cada célula, em caso da maré vazante, quando existem canais de drenagem dentro das massas de água. Sendo em função da distância para os canais (a), distância para o rio Amazonas (b) e a altura da coluna d'água (c).

Entretanto, os valores de porcentagem de transporte de água por célula serão determinados de duas formas, através das relações de vazão (Fig. 17) e de drenagem (Fig. 18). Para definir qual método de cálculo da porcentagem de transporte será utilizado, é verificado



se há canal de drenagem dentro da massa de água, pois se houver, o transporte de água será através de vazão e ocorrerá mais rapidamente. Caso não haja canal de drenagem dentro da massa de água, o transporte de água ocorrerá por drenagem e será mais lento.



**Fig. 178.** Relações adotadas no modelo para a determinação da porcentagem média de vazão para cada célula, em caso da maré vazante, quando não existem canais de drenagem dentro das massas de água. Sendo em função da distância para o rio Amazonas (a), altura do relevo (b) e a altura da coluna d'água (c).

O processo da redução do volume de água por célula na massa de água será feito no **loop de redução**, igualmente ao processo da enchente. Conforme apresentado no fluxograma do modelo, apresentado na Fig. 15.

As equações inseridas no modelo desse capítulo foram desenvolvidas com base na experiência de campo nas várzeas estuarinas amazônicas. Mas que ainda não foram validadas. Sendo esse o próximo passo nessa pesquisa.

## Resultados e Discussão

### Áreas inundadas por período lunar em função da sazonalidade

#### Primeiro semestre do ano - inverno (junho)

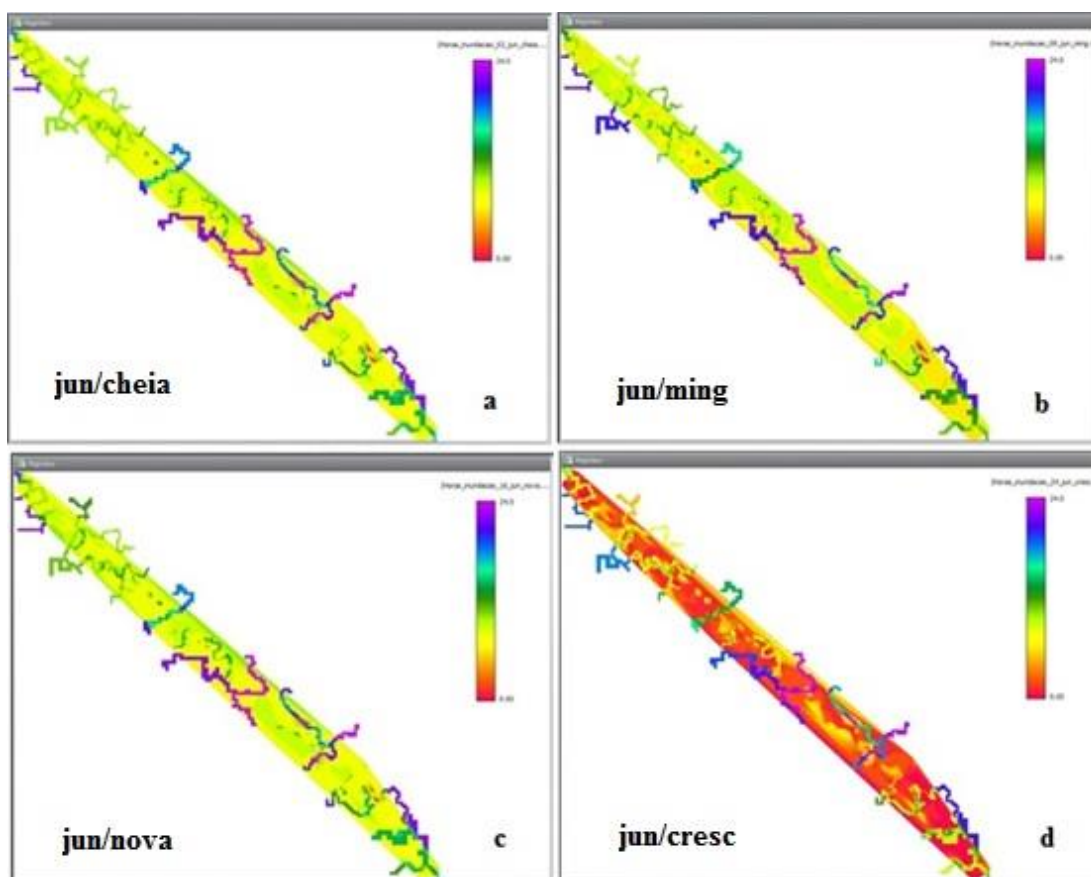
Analisando a inundação da área de estudo, verificou-se que durante a maré de sizígia (lua cheia e lua nova) a água enche e vaza com mais velocidade (Tabela 3). Onde as áreas inundadas (m<sup>2</sup>) aumentam significativamente a cada rodada do modelo, durante a enchente. E diminui nesse mesmo padrão a cada rodada do modelo, durante a maré vazante.

**Tabela 3** Simula o do tamanho da área (m<sup>2</sup>) inundada a cada hora, segundo cada dia de mudança da fase lunar ao longo do mês de junho

Hora	Lua Cheia		Lua Minguante		Lua Nova		Lua Crescente	
	C�l. inundadas	área inundada (m <sup>2</sup> )	C�l. inundadas	área inundada (m <sup>2</sup> )	C�l. inundadas	área inundada (m <sup>2</sup> )	C�l. inundadas	área inundada (m <sup>2</sup> )
0	196	49	693	173,25	120	30	29429	7357,25
1	152	38	25	6,25	37	9,25	71246	17811,5
2	2	0,5	149	37,25	100	25	82382	20595,5
3	319	79,75	646	161,5	249	52,25	13843	3460,75
4	407	101,75	99	24,75	85	21,25	16382	4095,5
5	267	66,75	803	200,75	183	45,75	41624	10406
6	1499	374,75	75015	18753,8	1288	322	8763	2190,75
7	13573	3393,25	55569	13892,3	12411	2102,75	14345	3586,25
8	173739	43434,8	8287	2071,75	161930	40482,5	8571	2142,75
9	54562	13640,5	133417	33354,3	69697	17424,3	11144	2786
10	45904	11476	7453	1863,25	30484	7621	3979	994,75
11	6984	1746	12377	3094,25	10953	2738,25	5221	1305,25
12	3455	863,75	6889	1722,25	9349	2337,25	3326	831,5
13	952	238	6676	1669	4807	1201,75	1714	428,5
14	9469	2367,25	1834	458,5	9259	2314,75	3682	920,5
15	1950	487,5	5011	1252,75	2644	661	2411	602,75
16	2846	711	2269	567,25	2849	712,25	2167	541,75
17	990	247,5	1649	412,25	1804	451	1089	272,25
18	7442	1860,5	358	89,5	4799	1199,75	7226	1806,5
19	1601	400,25	3590	897,5	1118	279,5	8856	2214
20	385	96,25	11568	2892	2099	524,75	6603	1650,75

21	1266	316,5	13831	3457,75	1645	411,25	4751	1187,75
22	18244	4561	934	233,5	19209	4802,25	748	187
23	1167	291,75	2204	551	1622	405,5	4634	1158,5
24	11883	2970,75	7908	1977	10513	2628,25	5118	1279,5
<b>Soma</b>		<b>89764,1</b>		<b>89640,4</b>		<b>89783,6</b>		<b>82456,3</b>
<b>%</b>		<b>99,9449</b>		<b>99,8073</b>		<b>99,9667</b>		<b>91,8083</b>

Já para a maré de quadratura (lua minguante e crescente), tanto o aumento da quantidade de área inundada ( $m^2$ ), na maré enchente, quanto a diminuição de área inundada, durante a maré vazante, a cada rodada do modelo, ocorre de maneira mais gradativa. Fig. 19.



**Fig. 18.** Mapas de inundação da área de estudo durante o dia de virada da lua para o mês de junho. Sendo lua cheia (a); lua minguante (b), lua nova (c) e lua crescente (d).

Nota-se, que a quantidade de área inundada por fase da lua, no mês de junho é bastante semelhante. Tendo em vista que área de estudo é a mesma e que no primeiro semestre do ano, quando os níveis de precipitação são superiores, a maré adentra no

terreno e inunda por completo a área de estudo. Sendo acima de 90% da área ficou inundada, independente da fase lunar. O que difere, é o tempo que determinada área do terreno estudado ficará inundada, sendo pela enchente ou vazante, de acordo com a condição da fase lunar.

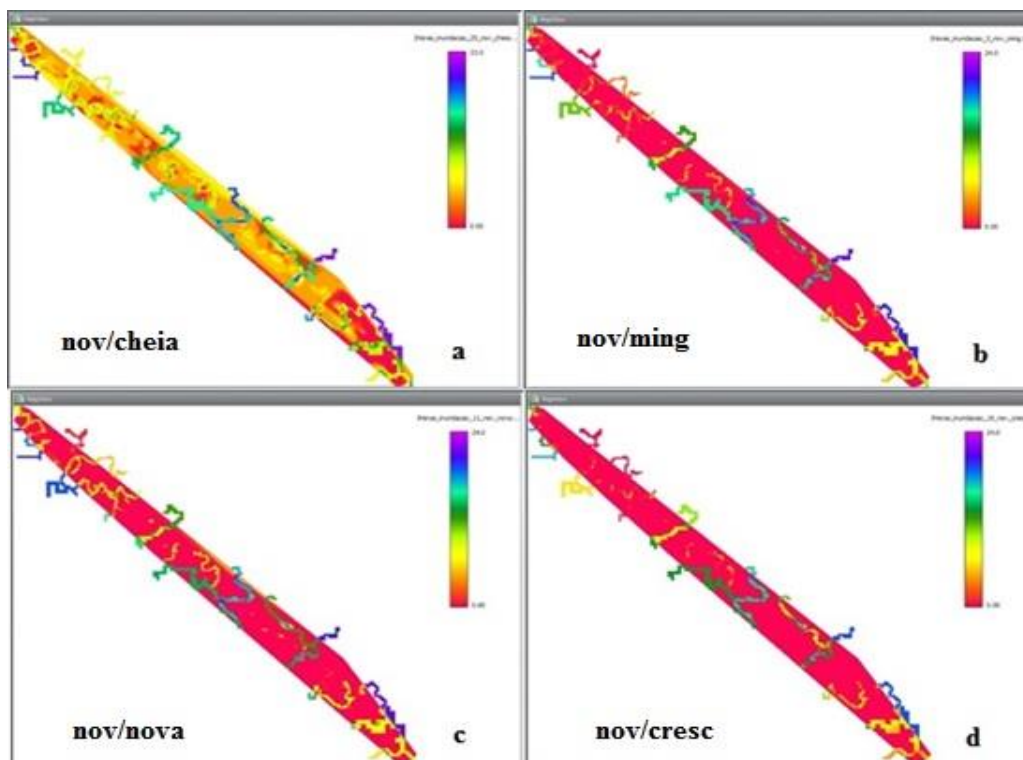
Em relação às áreas inundadas, quando a maré começa a encher, observa-se um padrão, sendo que as áreas mais próximas ao Rio Amazonas, são as primeiras a ficarem inundadas, independente da fase lunar (Fig. 19). Assim como para a maré vazante, independente da fase lunar, as áreas localizadas mais próximas aos canais de drenagem, são as primeiras a deixarem de ser inundadas. Sendo que durante a fase lunar da lua nova e crescente as áreas deixam de ficar inundada mais homoganeamente ao longo da área de estudo. E durante a fase da lua cheia e minguante a água começa a baixar mais abruptamente dentro dos canais de drenagem.

#### **Segundo semestre do ano – Verão (novembro)**

Para o mês de novembro, a fase lunar teve mais influência sobre a quantidade de áreas inundadas ao longo da área de estudo. Dando destaque para a lua cheia, pois foi a única fase lunar que representou mais de 90% da área inundada. Isso ocorre devido à falta de influência da precipitação para aumentar os níveis de água nos rios. Ou seja, durante o segundo semestre do ano de 2015, a área de estudo ficou menos tempo inundada.

**Tabela 4** Simulação do tamanho da área (m<sup>2</sup>) inundada a cada hora, segundo cada dia de mudança da fase lunar ao longo do mês de novembro

Hora	Lua Cheia		Lua Minguante		Lua Nova		Lua Crescente	
	Cél. inundadas	Área inundada (m <sup>2</sup> )	Cél. inundadas	Área inundada (m <sup>2</sup> )	Cél. inundadas	Área inundada (m <sup>2</sup> )	Cél. inundadas	Área inundada (m <sup>2</sup> )
0	24245	6061,25	262790	65697,5	243242	60811	281196	70299
1	24978	6244,5	12857	3214,25	16936	4234	5932	1483
2	9727	2431,75	4608	1152	4279	1069,8	2007	501,75
3	18755	4688,75	3246	811,5	886	221,5	2038	509,5
4	110414	27603,5	5634	1408,5	692	173	2825	706,25
5	44711	11177,8	3266	816,5	14952	3738	5822	1455,5
6	32855	8213,75	3050	762,5	6958	1739,5	8200	2050
7	6160	1540	3685	921,25	4265	1066,3	1430	357,5
8	15806	3951,5	7993	1998,25	9393	2348,3	4662	1165,5
9	10694	2673,5	1288	322	4841	1210,3	4767	1191,75
10	5148	1287	3497	874,25	2852	713	4309	1077,25
11	4507	1126,75	7781	1945,25	1232	308	2825	706,25
12	3603	900,75	4719	1179,75	7874	1968,5	852	213
13	1724	431	479	119,75	1628	407	13225	3306,25
14	13395	3348,75	3415	853,75	13244	3311	1972	493
15	10199	2549,75	12732	3183	2192	548	4476	1119
16	5277	1319,25	1657	414,25	1996	499	1274	318,5
17	2614	653,5	4060	1015	3475	868,75	2580	645
18	2527	631,75	338	84,5	1721	430,25	457	114,25
19	1518	379,5	2695	673,75	6027	1506,8	8151	2037,75
20	2051	512,75	6388	1597	4145	1036,3	71	17,75
21	8107	2026,75	2617	654,25	6080	1520	79	19,75
22	225	56,25	296	74	171	42,75	86	21,5
23	13	3,25	141	35,25	75	18,75	9	2,25
24	1	0,25	22	5,5	98	24,5	9	2,25
<b>Soma</b>		<b>83752,3</b>		<b>24116</b>		<b>29003</b>		<b>19514,5</b>
<b>%</b>		<b>93,2513</b>		<b>26,8512</b>		<b>32,292</b>		<b>21,7278</b>



**Fig. 19.** Mapas de inundação da área de estudo durante o dia de virada de cada fase da lua, para o mês de novembro. Sendo lua cheia (a); lua minguante (b), lua nova (c) e lua crescente (d).

De acordo com a Fig. 20, independente de qual fase lunar, o padrão segue o mesmo percebido no mês de junho. A maré inunda primeiro as regiões mais próximas do Rio Amazonas, durante a enchente. E na vazante, as áreas mais próximas dos canais de drenagem são as que começam a deixar de ser inundadas primeiro.

Os resultados encontrados com a simulação do tempo de inundação para a área de estudo, mostra que os padrões encontrados pelo monitoramento das marés, Capítulo 1, são vistos claramente na simulação do modelo, principalmente, analisando as duas estações do ano, aqui representadas por junho (inverno) e novembro (verão).

Os baixos valores de inundações na área de estudo, no verão, podem estar relacionados com a intensidade do fenômeno *El niño* de 2015. Pois segundo registros, foi o segundo mais forte dos últimos 66 anos (Cptec 2016).

O desenvolvimento do modelo se mostrou bastante complexo, tendo em vista que não existem trabalhos semelhantes para a região amazônica. Para modelar o efeito da maré é necessário seguir uma série de cuidados e requisitos, que só quem desenvolve trabalhos nesses ambientes de várzea há bastante tempo, é capaz de entender essa dinâmica.

Embora essa primeira versão desse modelo de inundação apresente certas limitações, é, sem dúvidas, um importante ponto de partida para aprimorar pesquisas em

torno dessa temática, que é bastante “escassa” em nossa região amazônica. E assim, como as muitas pesquisas pioneiras já desenvolvidas na Amazônia, esse trabalho precisa e sofrerá mudanças para o seu aprimoramento, para em breve, ser disponibilizado para o público que tenha interesse em usá-lo como produto.

**Conclusão**

O modelo foi capaz de simular o tempo de inundação para cada metro quadrado presente na área de estudo, somente com as informações do monitoramento do nível de água e do levantamento do microrelevo e canais de drenagem da área a ser modelada.



## Referências

- Arroyo-Rodríguez, V.; Mandujano, S. The importance of tropical rain forest fragments to the conservation of plant species diversity in Los Tuxtlas, Mexico. *Biodivers. Conserv.* 2006, **15**, 4159–4179.
- Brassel, K. E. e Reif, D. A procedure to generate Thiessen polygons. *Geographical Analysis*, **11**:289-303. 1979.
- Costa Neto, S. V.; Rosário, C. S. Análise fitossociológica das várzeas da RDS Itatupã e Baquia, Gurupá, Pará, Brasil. In: V Seminário de Iniciação Científica do IEPA Amapá. Revista: Pesquisa e Iniciação Científica Amapá. n.1. p.50. 2008.
- Cptec-Inpe. 2016. Disponível em: <http://www1.cptec.inpe.br/buscasite.shtml#elnino2015>. Acesso em: 27/06/2016.
- De Simone, O.; Müller E.; Junk, W.J.; Schmidt W. 2002. Adaptations of Central Amazon tree species to prolonged flooding: root morphology and leaf longevity. *Plant Biol.*, **4**: 515 – 522.
- Díaz, S.; Tilman, D.; Fargione, J.; Chapin, F.S.; Dirzo, R.; Kitzberger, T.; Gemmill, B.; Zobel, M.; Vilá, M.; Mitchell, C.; *et al.* Biodiversity regulation of ecosystem services. In *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*; Island Press: Washington, DC, USA, 2005; pp. 297–329.
- Ferreira, C.S. 2006. Aspectos morfoanatômicos, bioquímicos e genéticos de *Himatanthus sucuuba*, em ambiente de várzea e de terra firme da bacia Amazônica. PhD Thesis, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, 90pp.
- Ferreira, C.S.; Piedade, M.T.F; Bonates, L.C. 2006. Germinação de sementes e sobrevivência de plântulas de *Himatanthus sucuuba* (Spruce) Wood. em resposta ao alagamento, nas várzeas da Amazônia Central. *Acta Amazonica*, **36**:413-418.
- Junk, W.J. 1993. Wetlands of tropical South America. In: D.F. Whigham, D. Dykyjova & S. Hejny (eds). *Wetlands of the World I* Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, p. 679–739.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012) Manual do usuário: Aplicativo online IBGE-PPP. Dezembro de 2013. 33pp. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual\\_ppp.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf). Acesso em: 12/02/2016.

- Junk, W.J.; Bayley, P.B.; Sparks, R. 1989. The Flood pulse concept in River-Floodplain Systems. In: D.P. Dodge (ed.). Proceedings of the international Large River Symposium. Can.Spec.Publ.Fish.Aquat.Sci., **106**:110-127.
- Kubitzki, K.; Ziburski, A. 1994. Seed Dispersal in Flood Plain Forests of Amazonia. *Biotropica*, **26**(1): 30-43.
- Mazzini, P. L. F., Schettini, C. A. F. 2009. Evaluation of spatial interpolation methodologies applied to quasisynoptic coastal hydrographic data. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.* 13(1):53-64. ISSN 1808-7035.
- Milito, J.Á. 2009. Técnicas de construção civil e construção de edifícios. pp 303.
- Monico, J.F.G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Unesp, p.477, 2007.
- Oliveira-Wittmann, A.; Piedade, M.T.F.; Parolin, P.; Wittmann, F. 2007. Germination in four low-várzea tree species of Central Amazonia. *Aquatic Botany*, **86**: 197–203.
- Parolin, P. 2000. Phenology and CO<sub>2</sub> assimilation of trees in Central Amazonia Floodplains. *Journal of Tropical Ecology*, **16**:465-473.
- Parolin, P., Armbruster, N.; Junk, W.J. 2002. Seasonal changes of leaf nitrogen content in trees of Amazonian floodplains. *Acta Amazonica*, **32**(2):231-240.
- Parolin, P. De Simone, O. Kaase, K.; Waldohoff, Rottenberger, S.; Kuhun, U.; Kesselmeir, J.; Kleiss, B. Schimdt, W.; Piedade, M.F.T.; Junk, W.J. 2004. Central Amazonian Floodplain Forests: Tree Adaptations in a Pulsing System. *The Botanical Review*, **70**(3): 357–380.
- Piedade, M.T.F.; Worbes, M.; Junk, W.J. 2001. Geo-ecological controls on elemental fluxes in communities of higher plants in Amazonian floodplains. In: McClain, M.E.; Victoria, R.L.; Richey, J.E. (eds.). *The Biogeochemistry of the Amazon Basin*. Oxford University Press, New York. p. 209-234.
- Queiroz, J. A. L. de. Fitossociologia e Distribuição Diamétrica em Floresta de Várzea do Estuário do Rio Amazonas no Estado do Amapá. 2004. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Florestal – UFPR. Curitiba, 2004. 101p.
- Queiroz, J. A. L. de; Machado, S. do A. Fitossociologia em Floresta de Várzea do Estuário Amazônico no Estado do Amapá. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, n. 57, 2008.
- Schöngart, J.; Piedade, M.T. F.; Ludwigshausen, S.; Horna, V.; Worbes, M. 2002. Phenology and stem-growth periodicity of tree species in Amazonian floodplain forests. *Journal of Tropical Ecology*, **18**:581-597.

- Seeber, G. *Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications*. Walter de Gruyter, N. York, p.531, 1993.
- Soares-Filho, B.S. 2016. Dinamica project. Disponível em <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>> Acesso em 7 mar. 2016.
- Wittmann, F.; Parolin, P. 2005. Aboveground Roots in Amazonian Floodplain Trees. *Biotropica*, 37(4):609-619.
- Wittmann, F.; Parolin, P. 1999. Phenology of six tree species from central Amazonian Várzea. *Ecotropica*, 5:51-57.
- Worbes, M. 1985. Structural and other adaptations to long-term flooding by trees in Central Amazonian. *AMAZONIANA IX*, 3:459-484.
- Worbes, M. 1997. The Forest Ecosystem of the Floodplain. In: Junk, W.J (ed.). *The Central-Amazonian Floodplain: Ecology of a Pulsing System*. Ecological Studies. Vol. 126. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p. 223-266.
- Wright, S.J. Tropical forests in a changing environment. *Trends Ecol. Evol.* 2005. 20:553–560.

## CONCLUSÕES

Através do monitoramento do nível de água, influenciado pelas marés oceânicas, feito em três afluentes do Rio Amazonas ao longo do estuário comprovou que as previsões oficiais da Marinha podem ser extrapoladas em função das variações espaciais e temporais.

Por meio do levantamento do microrelevo com as informações dos canais de drenagem e do monitoramento da variação dos níveis das marés, pode-se modelar o tempo de inundação da floresta de várzea, usando o modelo Dinamica Ego.

## APÊNDICE 1 – Script usado para gerar os resultado no Programa R.

```

getwd()
setwd("E://embrapa//Florestam//Dados
Maregrafos//Todas//Amplitude_mare//Dados//Por TTides//Novos//")

##### load water level data
#####
AntMANU<-read.table("Ant_MANU.txt",header=T)
CeleMANU<-read.table("Cele_MANU.txt",header=T)
MazMANU<-read.table("Maz_MANU.txt",header=T)

summary(AntMANU)
summary(CeleMANU)
summary(MazMANU)
#####
#####

##### convert water level data to a time series object
#####
AntMANU$TS<-ts(AntMANU$Nivel.agua.m,start=c(2014,3,1),frequency=105120)
CeleMANU$TS<-ts(CeleMANU$Nivel.agua.m,start=c(2014,3,1),frequency=105120)
MazMANU$TS<-ts(MazMANU$Nivel.agua.m,start=c(2014,3,1),frequency=105120)
#####
###

##### FINDING MAXIMA AND MINIMA FOR EACH 12 HOUR PERIOD AND TIMES OF
PEAKS #####

##### STEP 1 - Create a list of dates for which data are available for
#####
##### each tidal gauge
#####

levsA<-unique(AntMANU$Data)
levsC<-unique(CeleMANU$Data)
levsM<-unique(MazMANU$Data)

##### STEP 2 - Create matrices to store the maxima and minima for each
date #####
##### for which data are available, and populate the first column with
the dates

MinMaxA<-matrix(NA,length(levsA),5)
MinMaxA[,1]<-levsA

MinMaxC<-matrix(NA,length(levsC),5)
MinMaxC[,1]<-levsC

MinMaxM<-matrix(NA,length(levsM),5)
MinMaxM[,1]<-levsM

##### STEP 3 - create separate databases for the am and pm
#####

```

```

A_AM<-AntMANU[AntMANU$hh<=11,]A_PM<-AntMANU[AntMANU$hh>11,]
A_AM$times<-as.character(A_AM$times)
A_PM$times<-as.character(A_PM$times)
summary(A_AM)
summary(A_PM)

C_AM<-CeleMANU[CeleMANU$hh<=11,]
C_PM<-CeleMANU[CeleMANU$hh>11,]
C_AM$times<-as.character(C_AM$times)
C_PM$times<-as.character(C_PM$times)
summary(C_AM)
summary(C_PM)

M_AM<-MazMANU[MazMANU$hh<=11,]
M_PM<-MazMANU[MazMANU$hh>11,]
M_AM$times<-as.character(M_AM$times)
M_PM$times<-as.character(M_PM$times)
summary(M_AM)
summary(M_PM)

##### STEP 4 - extract minima and maxima and store in the matrices
#####

for(x in 1:length(levsA)){

  MinMaxA[x,2]<-
  min(A_AM$Nivel.agua.m[A_AM$Data==levsA[x]&A_AM$Nivel.agua.m!="NaN"])
  MinMaxA[x,3]<-

  max(A_AM$Nivel.agua.m[A_AM$Data==levsA[x]&A_AM$Nivel.agua.m!="NaN"])
  MinMaxA[x,4]<-
  min(A_PM$Nivel.agua.m[A_PM$Data==levsA[x]&A_PM$Nivel.agua.m!="NaN"])
  MinMaxA[x,5]<-
  max(A_PM$Nivel.agua.m[A_PM$Data==levsA[x]&A_PM$Nivel.agua.m!="NaN"])

}

Ant<-as.data.frame(MinMaxA)
colnames(Ant)<-c("Data","MinAM","MaxAM","MinPM","MaxPM")
Ant$Data<-as.Date(Ant$Data, origin = "1970-01-01")

for(x in 1:length(levsC)){

  MinMaxC[x,2]<-
  min(C_AM$Nivel.agua.m[C_AM$Data==levsC[x]&C_AM$Nivel.agua.m!="NaN"])
  MinMaxC[x,3]<-
  max(C_AM$Nivel.agua.m[C_AM$Data==levsC[x]&C_AM$Nivel.agua.m!="NaN"])

  MinMaxC[x,4]<-
  min(C_PM$Nivel.agua.m[C_PM$Data==levsC[x]&C_PM$Nivel.agua.m!="NaN"])
  MinMaxC[x,5]<-
  max(C_PM$Nivel.agua.m[C_PM$Data==levsC[x]&C_PM$Nivel.agua.m!="NaN"])

}

```

```

Cele<-as.data.frame(MinMaxC)
colnames(Cele)<-c("Data", "MinAM", "MaxAM", "MinPM", "MaxPM")
Cele$Data<-as.Date(Cele$Data, origin = "1970-01-01")

for(x in 1:length(levsM)){

MinMaxM[x,2]<-
min(M_AM$Nivel.agua.m[M_AM$Data==levsM[x]&M_AM$Nivel.agua.m!="NaN"])
MinMaxM[x,3]<-
max(M_AM$Nivel.agua.m[M_AM$Data==levsM[x]&M_AM$Nivel.agua.m!="NaN"])

MinMaxM[x,4]<-
min(M_PM$Nivel.agua.m[M_PM$Data==levsM[x]&M_PM$Nivel.agua.m!="NaN"])
MinMaxM[x,5]<-
max(M_PM$Nivel.agua.m[M_PM$Data==levsM[x]&M_PM$Nivel.agua.m!="NaN"])

}

Maz<-as.data.frame(MinMaxM)
colnames(Maz)<-c("Data", "MinAM", "MaxAM", "MinPM", "MaxPM")
Maz$Data<-as.Date(Maz$Data, origin = "1970-01-01")

##### STEP 5 - Find the times of the peaks for the tidal gauge data and
#####
##### extract the corresponding data from the port data
#####

MarPrevA<-MarPrev[MarPrev$DATA.HORA%in%levsA,]
for(y in 1:length(Ant$Data)){

Ant$HorMinAM[y]<-A_AM$times[A_AM$Nivel.agua.m == MinMaxA[y,2] &
A_AM$Data==levsA[y]]
Ant$HorMaxAM[y]<-A_AM$times[A_AM$Nivel.agua.m == MinMaxA[y,3] &
A_AM$Data==levsA[y]]

Ant$HorMinPM[y]<-A_PM$times[A_PM$Nivel.agua.m == MinMaxA[y,4] &
A_PM$Data==levsA[y]]
Ant$HorMaxPM[y]<-A_PM$times[A_PM$Nivel.agua.m == MinMaxA[y,5] &
A_PM$Data==levsA[y]]

Ant$HorMinAM_PS[y]<-
colnames(MarPrevA[,2:13])[which(MarPrevA[y,2:13]==MarPrevA[y,29])]
Ant$HorMaxAM_PS[y]<-
colnames(MarPrevA[,2:13])[which(MarPrevA[y,2:13]==MarPrevA[y,30])]

Ant$HorMinPM_PS[y]<-
colnames(MarPrevA[,14:25])[which(MarPrevA[y,14:25]==MarPrevA[y,32])]
Ant$HorMaxPM_PS[y]<-
colnames(MarPrevA[,14:25])[which(MarPrevA[y,14:25]==MarPrevA[y,33])]

}

x <- unlist(regmatches(Ant$HorMinAM_PS, gregexpr("\\([?][0-9.,]+",
Ant$HorMinAM_PS)))
x <- as.numeric(gsub("\\(", '-', gsub(',', ' ', x)))

```

```

Ant$HorMinAM_PS<-x

x <- unlist(regmatches(Ant$HorMinPM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+",
Ant$HorMinPM_PS)))
x <- as.numeric(gsub("\\(", '-', gsub(',', " ", x)))
Ant$HorMinPM_PS<-x

z <- unlist(regmatches(Ant$HorMaxAM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+",
Ant$HorMaxAM_PS)))
z <- as.numeric(gsub("\\(", '-', gsub(',', " ", z)))
Ant$HorMaxAM_PS<-z

z <- unlist(regmatches(Ant$HorMaxPM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+",
Ant$HorMaxPM_PS)))
z <- as.numeric(gsub("\\(", '-', gsub(',', " ", z)))
Ant$HorMaxPM_PS<-z

MarPrevC<-MarPrev[MarPrev$DATA.HORA%in%levsC,]
for(y in 1:length(Cele$Data)){

Cele$HorMinAM[y]<-C_AM$times[C_AM$Nivel.agua.m == MinMaxC[y,2] &
C_AM$Data==levsC[y]]
Cele$HorMaxAM[y]<-C_AM$times[C_AM$Nivel.agua.m == MinMaxC[y,3] &
C_AM$Data==levsC[y]]

Cele$HorMinPM[y]<-C_PM$times[C_PM$Nivel.agua.m == MinMaxC[y,4] &
C_PM$Data==levsC[y]]
Cele$HorMaxPM[y]<-C_PM$times[C_PM$Nivel.agua.m == MinMaxC[y,5] &
C_PM$Data==levsC[y]]

Cele$HorMinAM_PS[y]<-
colnames(MarPrevC[,2:13])[which(MarPrevC[y,2:13]==MarPrevC[y,29])]
Cele$HorMaxAM_PS[y]<-
colnames(MarPrevC[,2:13])[which(MarPrevC[y,2:13]==MarPrevC[y,30])]

Cele$HorMinPM_PS[y]<-
colnames(MarPrevC[,14:25])[which(MarPrevC[y,14:25]==MarPrevC[y,32])]
Cele$HorMaxPM_PS[y]<-
colnames(MarPrevC[,14:25])[which(MarPrevC[y,14:25]==MarPrevC[y,33])]

}

x <- unlist(regmatches(Cele$HorMinAM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+",
Cele$HorMinAM_PS)))
x <- as.numeric(gsub("\\(", '-', gsub(',', " ", x)))
Cele$HorMinAM_PS<-x

x <- unlist(regmatches(Cele$HorMinPM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+",
Cele$HorMinPM_PS)))
x <- as.numeric(gsub("\\(", '-', gsub(',', " ", x)))
Cele$HorMinPM_PS<-x

z <- unlist(regmatches(Cele$HorMaxAM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+",
Cele$HorMaxAM_PS)))

```



```

z <- as.numeric(gsub("\\(', '-', gsub(',', ' ', z)))
Cele$HorMaxAM_PS<-z

z <- unlist(regmatches(Cele$HorMaxPM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+',
Cele$HorMaxPM_PS)))
z <- as.numeric(gsub("\\(', '-', gsub(',', ' ', z)))
Cele$HorMaxPM_PS<-z

MarPrevM<-MarPrev[MarPrev$DATA.HORA%in%levsM,]
for(y in 1:length(Maz$Data)){

Maz$HorMinAM[y]<-M_AM$times[M_AM$Nivel.agua.m == MinMaxM[y,2] &
M_AM$Data==levsM[y]]
Maz$HorMaxAM[y]<-M_AM$times[M_AM$Nivel.agua.m == MinMaxM[y,3] &
M_AM$Data==levsM[y]]

Maz$HorMinPM[y]<-M_PM$times[M_PM$Nivel.agua.m == MinMaxM[y,4] &
M_PM$Data==levsM[y]]
Maz$HorMaxPM[y]<-M_PM$times[M_PM$Nivel.agua.m == MinMaxM[y,5] &
M_PM$Data==levsM[y]]

Maz$HorMinAM_PS[y]<-
colnames(MarPrevM[,2:13])[which(MarPrevM[y,2:13]==MarPrevM[y,29])]
Maz$HorMaxAM_PS[y]<-
colnames(MarPrevM[,2:13])[which(MarPrevM[y,2:13]==MarPrevM[y,30])]

Maz$HorMinPM_PS[y]<-
colnames(MarPrevM[,14:25])[which(MarPrevM[y,14:25]==MarPrevM[y,32])]
Maz$HorMaxPM_PS[y]<-
colnames(MarPrevM[,14:25])[which(MarPrevM[y,14:25]==MarPrevM[y,33])]

}

x <- unlist(regmatches(Maz$HorMinAM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+',
Maz$HorMinAM_PS)))
x <- as.numeric(gsub("\\(', '-', gsub(',', ' ', x)))
Maz$HorMinAM_PS<-x

x <- unlist(regmatches(Maz$HorMinPM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+',
Maz$HorMinPM_PS)))
x <- as.numeric(gsub("\\(', '-', gsub(',', ' ', x)))
Maz$HorMinPM_PS<-x

z <- unlist(regmatches(Maz$HorMaxAM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+',
Maz$HorMaxAM_PS)))
z <- as.numeric(gsub("\\(', '-', gsub(',', ' ', z)))
Maz$HorMaxAM_PS<-z

z <- unlist(regmatches(Maz$HorMaxPM_PS, gregexpr("\\(?:[0-9,.]+',
Maz$HorMaxPM_PS)))
z <- as.numeric(gsub("\\(', '-', gsub(',', ' ', z)))
Maz$HorMaxPM_PS<-z

```

```
##### STEP 6 - export the data to check manually for errors (see step
7)#####
```

```
write.table(Ant,"Ant.txt",row.names=F)
write.table(Cele,"Cele.txt",row.names=F)
write.table(Maz,"Maz.txt",row.names=F)
```

```
##### STEP 7 - visually check the data for errors as a result of days
with
##### lots of missing data (which were then coded as NAs) or for
instances
##### where the peaks occurred close to midday or close to midnight in
which
##### case sometimes the am and pm peaks (could be maxima or minima))
were both
##### selected as being during the midday peak. When this was the case
the
##### first and second peaks(close to midnight in each case) were checked
and
##### the larger of the two replaced one of the midday values.
```

```
##### STEP 8 - re-import the now corrected data
#####
```

```
AntCorr<-read.table("AntCorr.txt",header=T)
CeleCorr<-read.table("CeleCorr.txt",header=T)
MazCorr<-read.table("MazCorr.txt",header=T)
```

```
##### STEP 9 - Calculate the semi-diurnal amplitudes (from the peak data)
for ##
##### both the tidal gauges and the port data and add to the matrices
#####
```

```
AntCorr$AmpAM<-AntCorr$MaxAM-AntCorr$MinAM
AntCorr$AmpPM<-AntCorr$MaxPM-AntCorr$MinPM
AntCorr$AmpPORTOAM<-MarPrevA$ampAM/100
AntCorr$AmpPORTOPM<-MarPrevA$ampPM/100
```

```
CeleCorr$AmpAM<-CeleCorr$MaxAM-CeleCorr$MinAM
CeleCorr$AmpPM<-CeleCorr$MaxPM-CeleCorr$MinPM
CeleCorr$AmpPORTOAM<-MarPrevC$ampAM/100
CeleCorr$AmpPORTOPM<-MarPrevC$ampPM/100
```

```
MazCorr$AmpAM<-MazCorr$MaxAM-MazCorr$MinAM
MazCorr$AmpPM<-MazCorr$MaxPM-MazCorr$MinPM
MazCorr$AmpPORTOAM<-MarPrevM$ampAM/100
MazCorr$AmpPORTOPM<-MarPrevM$ampPM/100
```

```
##### STEP 10 - export the amplitude data files - they are now ready to
use #####
```

```
write.table(AntCorr,"Ant_Total_MANU.txt",row.names=F)
write.table(CeleCorr,"Cele_Total_MANU.txt",row.names=F)
write.table(MazCorr,"Maz_Total_MANU.txt",row.names=F)
#####
```

```
#####
#####
#####
#####
#####
```

#### ##### CREATING THE FIGURES IN THE PAPER

```
#####
```

#### ##### STEP 1 - Load amplitude data

```
#####
```

```
AmpsAntMANU<-read.table("Ant_Total_MANU.txt",header=T)
AmpsCeleMANU<-read.table("Cele_Total_MANU.txt",header=T)
AmpsMazMANU<-read.table("Maz_Total_MANU.txt",header=T)
```

```
summary(AmpsAntMANU)
summary(AmpsCeleMANU)
summary(AmpsMazMANU)
```

#### ##### STEP 2 - Calculate lags between peaks (i.e. time lag between high and low

```
##### tides at the Port of Santana and the three tidal gauges - to be used for
```

```
##### figure 7). I did this in excel then imported the data here
```

```
#####
```

```
lags<-read.table("All_box_Lag.txt", header=T)
```

```
summary(lags)
```

#### ##### STEP 3 - Plot figure 2 - water level at the three tidal gauges between ###

#### ##### Mar 2014 and Jan 2015

```
#####
```

```
datlabs<-c("28 March 2014", "28 April 2014", "28 May 2014", "28 June 2014", "28 July 2014", "28 August 2014", "28 September 2014", "28 October 2014", "28 November 2014", "28 December 2014", "28 January 2015", "12th February 2015")
```

```
pdf(file="AnoMANU.pdf", family="serif", paper="a4", pointsize=12)
```

```
par(mfrow=c(3,1),las=2)
```

```
plot(AntMANU$TS[7489:length(AntMANU$TS)],type="n",bty="n",ylab="Water level at Ajuruxi (m)",xlab="",ylim=c(0.75,6),xaxt="n") #
```

```
points(AntMANU$TS[7489:length(AntMANU$TS)],col="black",pch=19,cex=0.05)
```

```
axis(side=1, at=c((7921-7489),(16849-7489),(25489-7489),(34417-7489),(43057-7489),(51985-7489),(60913-7489),(69553-7489),(78481-7489),(87121-7489),(96048-7489),(100511-7489)), labels=datlabs )
text(x=2,y=6, "a")
```

```
plot(AntMANU$TS[7489:length(AntMANU$TS)],type="n",bty="n",ylab="Water level at Maracá (m)",xlab="",ylim=c(0.75,6),xaxt="n")
```

```
points(CeleMANU$TS[7489:length(CeleMANU$TS)],col="black",pch=19,cex=0.05)
```

```
axis(side=1, at=c((7921-7489),(16849-7489),(25489-7489),(34417-7489),(43057-7489),(51985-7489),(60913-7489),(69553-7489),(78481-7489),(87121-7489),(96048-7489),(100511-7489)), labels=datlabs )
```

```

text(x=2,y=6, "b")
plot(AntMANU$TS[7489:length(AntMANU$TS)],type="n",bty="n",ylab="Water
level at Mazagão (m)",xlab="",ylim=c(0.75,6),xaxt="n")
points(MazMANU$TS[7489:length(MazMANU$TS)],col="black",pch=19,cex=0.05)
axis(side=1, at=c((7921-7489),(16849-7489),(25489-7489),(34417-
7489),(43057-7489),(51985-7489),(60913-7489),(69553-7489),(78481-
7489),(87121-7489),(96048-7489),(100511-7489)), labels=datlabs )
text(x=2,y=6, "c")

```

```
dev.off()
```

```
##### STEP 4 - Plot figure 3 - water level at the three tidal gauges in
April ##
```

```
##### and October of 2014
```

```
#####
```

```
pdf(file="AprilOctoberManu.pdf", family="serif", paper="a4",
pointsize=12)
```

```
par(mfrow=c(3,2))
```

```
par(mar=c(7, 4, 1, 2.1))
```

```

plot(AntMANU$TS[8929:17568],type="n",bty="n",xlab="",ylab="",xaxt="n",yli
m=c(1,5)) #
points(AntMANU$TS[8929:17568],col="black",pch=19,cex=0.05)
axis(1,at=seq(0,8639,by=576)+144,labels=CeleMANU$Data[c(8929,9505,10081,1
0657,11233,11809,12385,12961,
13537,14113,14689,15265,15841,16417,16993)], tick = FALSE,
ann=FALSE,las=2)
axis(1,at=seq(0,8927,by=288),labels=FALSE, tck=-0.025, ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Water level at Ajuruxi (m)", line = 2.5)
#mtext(side = 1, text = "Date, April", line = 6)
text(x=0.5,y=5, "a")

```

```

plot(AntMANU$TS[61633:70560],type="n",bty="n",xaxt="n",xlab="",ylab="",yl
im=c(1,5))
points(AntMANU$TS[61633:70560],col="black",pch=19,cex=0.05)
axis(1,at=seq(0,8927,by=576)+144,labels=CeleMANU$Data[c(61633,62209,62785
,63361,63937,64513,65089,65665,
66241,66817,67393,67969,68545,69121,69697,70273)], tick = FALSE,
ann=FALSE,las=2)
axis(1,at=seq(0,8927,by=288),labels=FALSE, tck=-0.025, ann=FALSE)
#mtext(side = 2, text = "Nível de água em Ajuruxi (m)", line = 2.5)
#mtext(side = 1, text = "Data, Outubro", line = 6)
text(x=0.5,y=5, "b")

```

```

plot(CeleMANU$TS[8929:17568],type="n",bty="n",xaxt="n",ylab="",xlab="",yl
im=c(1,5))
points(CeleMANU$TS[8929:17568],col="black",pch=19,cex=0.05)
axis(1,at=seq(0,8639,by=576)+144,labels=CeleMANU$Data[c(8929,9505,10081,1
0657,11233,11809,12385,12961,
13537,14113,14689,15265,15841,16417,16993)], tick = FALSE,
ann=FALSE,las=2)
axis(1,at=seq(0,8927,by=288),labels=FALSE, tck=-0.025, ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Water level at Maracá (m)", line = 2.5)
#mtext(side = 1, text = "Data, Abril", line = 6)

```

```
text(x=0.5,y=5, "c")
```

```
plot(CeleMANU$TS[61633:70560],type="n",bty="n",xaxt="n",ylab="",xlab="",ylim=c(1,5))
points(CeleMANU$TS[61633:70560],col="black",pch=19,cex=0.05)
axis(1,at=seq(0,8927,by=576)+144,labels=CeleMANU$Data[c(61633,62209,62785,63361,63937,64513,65089,65665,66241,66817,67393,67969,68545,69121,69697,70273)], tick = FALSE,ann=FALSE,las=2)
axis(1,at=seq(0,8927,by=288),labels=FALSE, tck=-0.025, ann=FALSE)
#mtext(side = 2, text = "Nível de água em Maracá (m)", line = 2.5)
#mtext(side = 1, text = "Data, Outubro", line =6)
text(x=0.5,y=5, "d")
```

```
plot(MazMANU$TS[8929:17568],type="n",bty="n",xaxt="n",ylab="",xlab="",ylim=c(1,5)) #
points(MazMANU$TS[8929:17568],col="black",pch=19,cex=0.05)
axis(1,at=seq(0,8639,by=576)+144,labels=CeleMANU$Data[c(8929,9505,10081,10657,11233,11809,12385,12961,13537,14113,14689,15265,15841,16417,16993)], tick = FALSE,ann=FALSE,las=2)
axis(1,at=seq(0,8927,by=288),labels=FALSE, tck=-0.025, ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Water level at Mazagão (m)", line = 2.5)
mtext(side = 1, text = "Date", line =6)
text(x=0.5,y=5, "e")
```

```
plot(MazMANU$TS[61633:70560],type="n",bty="n",xaxt="n",ylab="",xlab="",ylim=c(1,5))
points(MazMANU$TS[61633:70560],col="black",pch=19,cex=0.05)
axis(1,at=seq(0,8927,by=576)+144,labels=CeleMANU$Data[c(61633,62209,62785,63361,63937,64513,65089,65665,66241,66817,67393,67969,68545,69121,69697,70273)], tick = FALSE,ann=FALSE,las=2)
axis(1,at=seq(0,8927,by=288),labels=FALSE, tck=-0.025, ann=FALSE)
#mtext(side = 2, text = "Nível de água em Mazagão (m)", line = 2.5)
mtext(side = 1, text = "Date", line =6)
text(x=0.5,y=5, "f")
```

```
dev.off()
```

```
##### STEP 5 - Plot Figure 4 - amplitudes on 16th April and 9th October
```

```
#####
```

```
##### plot 16 of April and 9 of October
```

```
#####
```

```
##### find the data
```

```
#####
```

```
which(AntMANU$Data=="16/04/2014") #13249:13536
```

```
which(AntMANU$Data=="09/10/2014") #63937:64224
```

```
which(CeleMANU$Data=="16/04/2014") #13249:13536
```

```
which(CeleMANU$Data=="09/10/2014") #63937:64224
```

```
which(MazMANU$Data=="16/04/2014") #13249:13536
```

```
which(MazMANU$Data=="09/10/2014") #63937:64224
```

```
##### find the minima #####
min(AntMANU$Nivel.agua.m[13249:13392]) # 16 Abril AM 2.335
min(AntMANU$Nivel.agua.m[13393:13536]) # 16 Abril PM 2.346
```

```
min(AntMANU$Nivel.agua.m[63937:64080]) # 09 Outubro AM 1.66
min(AntMANU$Nivel.agua.m[64081:64224]) # 09 Outubro PM 1.648
```

```
min(CeleMANU$Nivel.agua.m[13249:13392]) # 16 Abril AM 2.073
min(CeleMANU$Nivel.agua.m[13393:13536]) # 16 Abril AM 2.089
```

```
min(CeleMANU$Nivel.agua.m[63937:64080]) # 09 Outubro AM 1.543
min(CeleMANU$Nivel.agua.m[64081:64224]) # 09 Outubro AM 1.538
```

```
min(MazMANU$Nivel.agua.m[13249:13392]) # 16 Abril AM 1.763
min(MazMANU$Nivel.agua.m[13393:13536]) # 16 Abril AM 1.77
```

```
min(MazMANU$Nivel.agua.m[63937:64080]) # 09 Outubro AM 1.191
min(MazMANU$Nivel.agua.m[64081:64224]) # 09 Outubro AM 1.189
```

```
##### calculate the amplitudes and plot for these days
#####
```

```
AJ1allAM<-AntMANU$Nivel.agua.m[13249:13392]-2.335
AJ1allPM<-AntMANU$Nivel.agua.m[13393:13536]-2.346
```

```
AJ1all<-c(AJ1allAM,AJ1allPM)
AJ2allAM<-AntMANU$Nivel.agua.m[63937:64080]-1.66
AJ2allPM<-AntMANU$Nivel.agua.m[64081:64224]-1.648
```

```
AJ2all<-c(AJ2allAM,AJ2allPM)
```

```
MR1allAM<-CeleMANU$Nivel.agua.m[13249:13392]-2.073
MR1allPM<-CeleMANU$Nivel.agua.m[13393:13536]-2.089
```

```
MR1all<-c(MR1allAM,MR1allPM)
```

```
MR2allAM<-CeleMANU$Nivel.agua.m[63937:64080]-1.543
MR2allPM<-CeleMANU$Nivel.agua.m[64081:64224]-1.538
```

```
MR2all<-c(MR2allAM,MR2allPM)
```

```
MZ1allAM<-MazMANU$Nivel.agua.m[13249:13392]-1.763
MZ1allPM<-MazMANU$Nivel.agua.m[13393:13536]-1.77
```

```
MZ1all<-c(MZ1allAM,MZ1allPM)
```

```
MZ2allAM<-MazMANU$Nivel.agua.m[63937:64080]-1.191
MZ2allPM<-MazMANU$Nivel.agua.m[64081:64224]-1.189
```

```
MZ2all<-c(MZ2allAM,MZ2allPM)
```

```
##### find the amplitude data for these dates
#####
```

```
MIN MAX # MIN MAX
```

```

which(AmpsAntMANU$Data=="16/04/2014") #20 2.335 01:50 4.592 05:50
2.346 13:55 4.597 18:10
which(AmpsAntMANU$Data=="09/10/2014") #175 1.66 01:15 4.312 05:10
1.648 13:30 4.352 17:25

```

```

which(AmpsCeleMANU$Data=="16/04/2014") #21 2.073 01:30 4.557 05:20
2.089 13:30 4.531 17:15
which(AmpsCeleMANU$Data=="09/10/2014") #176 1.543 00:45 4.306 04:40
1.538 13:10 4.334 16:50

```

```

which(AmpsMazMANU$Data=="16/04/2014") #21 1.763 01:00 4.392 04:45
1.77 13:10 4.384 17:05
which(AmpsMazMANU$Data=="09/10/2014") #174 1.191 00:10 4.09 04:10
1.189 12:30 4.13 16:25

```

```

#### find the times of the peaks (to use below in figure)

```

```

# first max, min, second max 16/04/2014 - Ant
which(AntMANU$times[1:288]=="05:50") # 71
which(AntMANU$times[1:288]=="13:55") # 168
which(AntMANU$times[1:288]=="18:10") # 219

```

```

# first max, min, second max 16/04/2014 - Cele
which(AntMANU$times[1:288]=="05:20") # 65
which(AntMANU$times[1:288]=="13:30") # 163
which(AntMANU$times[1:288]=="17:15") # 208

```

```

# first max, min, second max 16/04/2014 - Maz
which(AntMANU$times[1:288]=="04:45") # 58
which(AntMANU$times[1:288]=="13:10") # 159
which(AntMANU$times[1:288]=="17:05") # 206

```

```

# first max, min, second max 16/04/2014 - Ant
which(AntMANU$times[1:288]=="05:10") # 63
which(AntMANU$times[1:288]=="13:30") # 163
which(AntMANU$times[1:288]=="17:25") # 210

```

```

# first max, min, second max 16/04/2014 - Cele
which(AntMANU$times[1:288]=="04:40") # 57
which(AntMANU$times[1:288]=="13:10") # 159
which(AntMANU$times[1:288]=="16:50") # 203

```

```

# first max, min, second max 16/04/2014 - Maz
which(AntMANU$times[1:288]=="04:10") # 51
which(AntMANU$times[1:288]=="12:30") # 151
which(AntMANU$times[1:288]=="16:25") # 198

```

```

pdf(file="Amp16Apr09OctManu.pdf", family="serif", paper="a4",
pointsize=12)

```

```

par(mfrow=c(2,1))

```

```

plot(AJ1all,ylim=c(0,3.5),bty="n",xaxt="n",yaxt="n", ann=FALSE,tck=-
0.025,pch= 20,cex=0.5)
#points(AJ1allPM,pch= 20,cex=0.5,col="black")

```

```

points(MR1all,pch= 20,cex=0.5,col="gray")
#points(MR1allPM,pch= 20,cex=0.5,col="gray")
points(MZ1all,pch= 17,cex=0.5,col="black")
#points(MZ1allPM,pch= 20,cex=0.5,col="light gray")
axis(1, at=seq(0,288,by=8),
labels=AntMANU$times[c(1,8,16,24,32,40,48,56,64,72,80,88,96,104,112,120,1
28,136,144,152,160,168,176,184,192,200,208,216,224,232,240,248,256,264,27
2,280,288)]
, tck=-0.025, mgp=c(3,1,0),ann=FALSE,las=2)
axis(2, at=seq(0,3.5,by=0.25), labels=seq(0,3.5,by=0.25),tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Tidal amplitude(m)", line = 2.5)
mtext(side = 1, text = "Time, 16/04/2014", line = 3.5)
#legend("topright", bty="n", c("Ajuruxi","Maracá","Mazagão"),
lty=c(1,1,1), lwd=c(2,2,2),col=c("black","red","blue"))
legend(x=235,y=3.7, bty="n", c("Ajuruxi","Maracá","Mazagão"),
lty=c(1,1,2), lwd=c(2,2,2),col=c("black","gray","black"))
text(x=2,y=3.55, "a")
abline(v=71,col = "black", lty = 1,lwd=2)
abline(v=168,col = "black", lty = 1,lwd=2)
abline(v=219,col = "black", lty = 1,lwd=2)
abline(v=65,col = "gray", lty = 1,lwd=2)
abline(v=163,col = "gray", lty = 1,lwd=2)
abline(v=208,col = "gray", lty = 1,lwd=2)
abline(v=58,col = "black", lty = 2,lwd=2)
abline(v=159,col = "black", lty = 2,lwd=2)
abline(v=206,col = "black", lty = 2,lwd=2)

plot(AJ2all,ylim=c(0,3.5),bty="n",xaxt="n",yaxt="n", ann=FALSE,tck=-
0.025,pch= 20,cex=0.5)
points(MR2all,pch= 20,cex=0.5,col="gray")
points(MZ2all,pch= 17,cex=0.5,col="black")
axis(1, at=seq(0,288,by=8),
labels=AntMANU$times[c(1,8,16,24,32,40,48,56,64,72,80,88,96,104,112,120,1
28,136,144,152,160,168,176,184,192,200,208,216,224,232,240,248,256,264,27
2,280,288)]
, tck=-0.025, mgp=c(3,1,0),ann=FALSE,las=2)
axis(2, at=seq(0,3.5,by=0.25), labels=seq(0,3.5,by=0.25),tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Tidal amplitude(m)", line = 2.5)
mtext(side = 1, text = "Time, 09/10/2014", line = 3.5)
text(x=2,y=3.55, "b")
abline(v=63,col = "black", lty = 1,lwd=2)
abline(v= 163,col = "black", lty = 1,lwd=2)
abline(v=210,col = "black", lty = 1,lwd=2)
abline(v=57,col = "gray", lty = 1,lwd=2)
abline(v=159,col = "gray", lty = 1,lwd=2)
abline(v=203,col = "gray", lty = 1,lwd=2)
abline(v=51,col = "black", lty = 2,lwd=2)
abline(v=151,col = "black", lty = 2,lwd=2)
abline(v=198,col = "black", lty = 2,lwd=2)

dev.off()

```



```
##### STEP 6 - Plot figure 5 - frequency histogram of tidal amplitudes
#####
##### throughout the sampling period at the three tidal gauges
#####
```

```
AntAmp<-rbind(AmpsAntMANU$AmpAM,AmpsAntMANU$AmpPM)
CeleAmp<-rbind(AmpsCeleMANU$AmpAM,AmpsCeleMANU$AmpPM)
MazAmp<-rbind(AmpsMazMANU$AmpAM,AmpsMazMANU$AmpPM)
```

```
bins<-seq(1.2,3,0.1)
#width=3.5, height=3.5,
```

```
pdf(file="FreqAmpsMANU.pdf", family="serif", paper="a4", fontsize=12)
par(mfrow=c(3,1), mar=c(5, 4, 4, 2))
xrange <- range( c(1.2,3.0) )
```

```
Gra<-hist(AntAmp, breaks=bins, col="black", border="white", las=2,
ann=FALSE,tck=-0.025, mgp=c(3,0.3,0), main=NULL, family="serif",
xlim=xrange, xaxt="n", ylim=c(0,110),tck=0.025)
mtext(side = 2, text = "Frequency", line = 1.5)
axis(1, at=seq(1.2,3.0,by=0.1), labels=seq(1.2,3.0,by=0.1),las=2,
tck=0.025, mgp=c(3,0.3,0),ann=FALSE)
mtext(side = 1, text = "Tidal amplitude at Ajuruxi (m)", line = 2.25)
text(x=1.2,y=100, "a")
```

```
Gra<-hist(CeleAmp, breaks=bins, col="black", border="white", las=2,
ann=FALSE,tck=-0.025, mgp=c(3,0.3,0), main=NULL, family="serif",
xlim=xrange, xaxt="n", ylim=c(0,110),tck=0.025)
mtext(side = 2, text = "Frequency", line = 1.5)
axis(1, at=seq(1.2,3.0,by=0.1), labels=seq(1.2,3.0,by=0.1),las=2,
tck=0.025, mgp=c(3,0.3,0),ann=FALSE)
mtext(side = 1, text = "Tidal amplitude at Maracá (m)", line = 2.25)
text(x=1.2,y=100, "b")
```

```
Gra<-hist(MazAmp, breaks=bins, col="black", border="white", las=2,
ann=FALSE,tck=-0.025, mgp=c(3,0.3,0), main=NULL, family="serif",
xlim=xrange, xaxt="n", ylim=c(0,110),tck=0.025)
mtext(side = 2, text = "Frequency", line = 1.5)
axis(1, at=seq(1.2,3.0,by=0.1), labels=seq(1.2,3.0,by=0.1),las=2,
tck=0.025, mgp=c(3,0.3,0),ann=FALSE)
mtext(side = 1, text = "Tidal amplitude at Mazagão (m)", line = 2.25)
text(x=1.2,y=100, "c")
```

```
dev.off()
```

```
##### STEP 7 - Plot figure 6 - tidal amplitudes at the three tidal gauges
#####
```

```
##### against tidal amplitudes at the port
#####
pdf(file="TodosManu.pdf", family="serif", paper="a4",
pointsize=12)#width=3.5, height=3.5,
par(mfrow=c(3,1))#, mar=c(5, 4, 4, 2))
plot(AmpsAntMANU$AmpAM~AmpsAntMANU$AmpPORTOAM,xlim=c(1.7,3.5),ylim=c(1.
2,
```

```

3),
bty="n",xaxt="n",yaxt="n",main=NULL, ann=FALSE,tck=-0.025,pch=
20,cex=0.5)
points(AmpsAntMANU$AmpPM~AmpsAntMANU$AmpPORTOPM,pch=
20,cex=0.5,col="black")

```

```

axis(1, at=seq(1.7,3.5,by=0.3), labels=seq(1.7,3.5,by=0.3), tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
axis(2, at=seq(1.2,3,by=0.2), labels=seq(1.2,3,by=0.2),tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Tidal amplitude at Ajuruxi (m)", line = 2)
mtext(side = 1, text = "Tidal amplitude at the Port of Santana (m)", line
= 2.25)
text(x=1.7,y=3, "a")

```

```

plot(AmpsCeleMANU$AmpAM~AmpsCeleMANU$AmpPORTOAM,xlim=c(1.7,3.5),ylim=c(
1.2,3),
bty="n",xaxt="n",yaxt="n",main=NULL, ann=FALSE,tck=-0.025,pch=
20,cex=0.5)
points(AmpsCeleMANU$AmpPM~AmpsCeleMANU$AmpPORTOPM,pch=
20,cex=0.5,col="black")

```

```

axis(1, at=seq(1.7,3.5,by=0.3), labels=seq(1.7,3.5,by=0.3), tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
axis(2, at=seq(1.2,3,by=0.2), labels=seq(1.2,3,by=0.2),tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Tidal amplitude at Maracá (m)", line = 2)
mtext(side = 1, text = "Tidal amplitude at the Port of Santana (m)", line
= 2.25)
text(x=1.7,y=3, "b")

```

```

plot(AmpsMazMANU$AmpAM~AmpsMazMANU$AmpPORTOAM,xlim=c(1.7,3.5),ylim=c(
1.2,3),
bty="n",xaxt="n",yaxt="n",main=NULL, ann=FALSE,tck=-0.025,pch=
20,cex=0.5)
points(AmpsMazMANU$AmpPM~AmpsMazMANU$AmpPORTOPM,pch=
20,cex=0.5,col="black")

```

```

axis(1, at=seq(1.7,3.5,by=0.3), labels=seq(1.7,3.5,by=0.3), tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
axis(2, at=seq(1.2,3,by=0.2), labels=seq(1.2,3,by=0.2),tck=-0.025,
mgp=c(3,1,0),ann=FALSE)
mtext(side = 2, text = "Tidal amplitude at Mazagão (m)", line = 2)
mtext(side = 1, text = "Tidal amplitude at the Port of Santana (m)", line
= 2.25)
text(x=1.7,y=3, "c")

```

```
dev.off()
```

```

AntAmps1<-AmpsAntMANU[,c(1,22,24)]
colnames(AntAmps1)<-c("Data","Amp","AmpPorto")
AntAmps2<-AmpsAntMANU[,c(1,23,25)]
colnames(AntAmps2)<-c("Data","Amp","AmpPorto")
AntAmpsAll<-rbind(AntAmps1,AntAmps2)

```

```

CeleAmps1<-AmpsCeleMANU[,c(1,22,24)]
colnames(CeleAmps1)<-c("Data","Amp","AmpPorto")
CeleAmps2<-AmpsCeleMANU[,c(1,23,25)]
colnames(CeleAmps2)<-c("Data","Amp","AmpPorto")
CeleAmpsAll<-rbind(CeleAmps1,CeleAmps2)

MazAmps1<-AmpsMazMANU[,c(1,22,24)]
colnames(MazAmps1)<-c("Data","Amp","AmpPorto")
MazAmps2<-AmpsMazMANU[,c(1,23,25)]
colnames(MazAmps2)<-c("Data","Amp","AmpPorto")
MazAmpsAll<-rbind(MazAmps1,MazAmps2)

modAnt<-glm(AntAmpsAll$Amp~AntAmpsAll$AmpPorto)
modCele<-glm(CeleAmpsAll$Amp~CeleAmpsAll$AmpPorto)
modMaz<-glm(MazAmpsAll$Amp~MazAmpsAll$AmpPorto)

##### STEP 8 - Plot figure 7 - time taken for the tide to rise and fall
in the #
##### months of April and October at the three tidal gauges
#####

AntApril<-AmpsAntMANU[5:34,]
AntOctober<-AmpsAntMANU[167:197,]

AntFillApr1<-AntApril[,c(1,14)]
colnames(AntFillApr1)<-c("Data","Fill")
AntFillApr2<-AntApril[,c(1,16)]
colnames(AntFillApr2)<-c("Data","Fill")
AntFillAllAPR<-rbind(AntFillApr1,AntFillApr2)

AntFillOct1<-AntOctober[,c(1,14)]
colnames(AntFillOct1)<-c("Data","Fill")
AntFillOct2<-AntOctober[,c(1,16)]
colnames(AntFillOct2)<-c("Data","Fill")
AntFillAllOCT<-rbind(AntFillOct1,AntFillOct2)

AntEmptyApr1<-AntApril[,c(1,15)]
colnames(AntEmptyApr1)<-c("Data","Empty")
AntEmptyApr2<-AntApril[,c(1,17)]
colnames(AntEmptyApr2)<-c("Data","Empty")
AntEmptyAllAPR<-rbind(AntEmptyApr1,AntEmptyApr2)

AntEmptyOct1<-AntOctober[,c(1,15)]
colnames(AntEmptyOct1)<-c("Data","Empty")
AntEmptyOct2<-AntOctober[,c(1,17)]
colnames(AntEmptyOct2)<-c("Data","Empty")
AntEmptyAllOCT<-rbind(AntEmptyOct1,AntEmptyOct2)

CeleApril<-AmpsCeleMANU[6:35,]
CeleOctober<-AmpsCeleMANU[168:198,]

CeleFillApr1<-CeleApril[,c(1,14)]
colnames(CeleFillApr1)<-c("Data","Fill")
CeleFillApr2<-CeleApril[,c(1,16)]

```

```
colnames(CeleFillApr2)<-c("Data", "Fill")
CeleFillAllAPR<-rbind(CeleFillApr1,CeleFillApr2)
```

```
CeleFillOct1<-CeleOctober[,c(1,14)]
colnames(CeleFillOct1)<-c("Data", "Fill")
CeleFillOct2<-CeleOctober[,c(1,16)]
colnames(CeleFillOct2)<-c("Data", "Fill")
CeleFillAllOCT<-rbind(CeleFillOct1,CeleFillOct2)
```

```
CeleEmptyApr1<-CeleApril[,c(1,15)]
colnames(CeleEmptyApr1)<-c("Data", "Empty")
CeleEmptyApr2<-CeleApril[,c(1,17)]
colnames(CeleEmptyApr2)<-c("Data", "Empty")
CeleEmptyAllAPR<-rbind(CeleEmptyApr1,CeleEmptyApr2)
```

```
CeleEmptyOct1<-CeleOctober[,c(1,15)]
colnames(CeleEmptyOct1)<-c("Data", "Empty")
CeleEmptyOct2<-CeleOctober[,c(1,17)]
colnames(CeleEmptyOct2)<-c("Data", "Empty")
CeleEmptyAllOCT<-rbind(CeleEmptyOct1,CeleEmptyOct2)
```

```
MazApril<-AmpsMazMANU[6:35,]
MazOctober<-AmpsMazMANU[166:196,]
```

```
MazFillApr1<-MazApril[,c(1,14)]
colnames(MazFillApr1)<-c("Data", "Fill")
MazFillApr2<-MazApril[,c(1,16)]
colnames(MazFillApr2)<-c("Data", "Fill")
MazFillAllAPR<-rbind(MazFillApr1,MazFillApr2)
```

```
MazFillOct1<-MazOctober[,c(1,14)]
colnames(MazFillOct1)<-c("Data", "Fill")
MazFillOct2<-MazOctober[,c(1,16)]
colnames(MazFillOct2)<-c("Data", "Fill")
MazFillAllOCT<-rbind(MazFillOct1,MazFillOct2)
```

```
MazEmptyApr1<-MazApril[,c(1,15)]
colnames(MazEmptyApr1)<-c("Data", "Empty")
MazEmptyApr2<-MazApril[,c(1,17)]
colnames(MazEmptyApr2)<-c("Data", "Empty")
MazEmptyAllAPR<-rbind(MazEmptyApr1,MazEmptyApr2)
```

```
MazEmptyOct1<-MazOctober[,c(1,15)]
colnames(MazEmptyOct1)<-c("Data", "Empty")
MazEmptyOct2<-MazOctober[,c(1,17)]
colnames(MazEmptyOct2)<-c("Data", "Empty")
MazEmptyAllOCT<-rbind(MazEmptyOct1,MazEmptyOct2)
```

```
pdf(file="FillEmptyManu.pdf", family="serif", paper="a4",
pointsize=12)#width=3.5, height=3.5,
par(mfrow=c(3,2))
plot.default(AntFillAllAPR$Fill~AntFillAllAPR$Data,type="n",ylim=c(200,55
0),bty="n",ylab="Time (minutes)",xlab="",xaxt="n")
points(AntFillAllAPR$Fill~AntFillAllAPR$Data)
```

```

points(AntEmptyAllAPR$Empty~AntFillAllAPR$Data,pch=19)
#axis(1,at=seq(4,240,by=8),labels=AntFillAllAPR$Data[1:30],las=2)#, tick
= FALSE, ann=FALSE,las=2)
text(x=1,y=550, "a")

```

```

plot.default(AntFillAllOCT$Fill~AntFillAllOCT$Data,type="n",ylim=c(200,55
0),bty="n",ylab="",xlab="",xaxt="n")
points(AntFillAllOCT$Fill~AntFillAllOCT$Data)
points(AntEmptyAllOCT$Empty~AntFillAllOCT$Data,pch=19)
#axis(1,at=seq(4,248,by=8),labels=AntFillAllOCT$Data[1:31],las=2)#, tick
= FALSE, ann=FALSE,las=2)
text(x=2,y=550, "b")

```

```

plot.default(CeleFillAllAPR$Fill~CeleFillAllAPR$Data,type="n",ylim=c(200,
550),bty="n",ylab="Time (minutes)",xlab="",xaxt="n")
points(CeleFillAllAPR$Fill~CeleFillAllAPR$Data)
points(CeleEmptyAllAPR$Empty~CeleFillAllAPR$Data,pch=19)
#axis(1,at=seq(4,240,by=8),labels=CeleFillAllAPR$Data[1:30],las=2)#, tick
= FALSE, ann=FALSE,las=2)
text(x=1,y=550, "c")

```

```

plot.default(CeleFillAllOCT$Fill~CeleFillAllOCT$Data,type="n",ylim=c(200,
550),bty="n",ylab="",xlab="",xaxt="n")
points(CeleFillAllOCT$Fill~CeleFillAllOCT$Data)
points(CeleEmptyAllOCT$Empty~CeleFillAllOCT$Data,pch=19)
#axis(1,at=seq(4,248,by=8),labels=CeleFillAllOCT$Data[1:31],las=2)#, tick
= FALSE, ann=FALSE,las=2)
text(x=2,y=550, "d")

```

```

plot.default(MazFillAllAPR$Fill~MazFillAllAPR$Data,type="n",ylim=c(200,55
0),bty="n",ylab="Time (minutes)",xlab="",xaxt="n")
points(MazFillAllAPR$Fill~MazFillAllAPR$Data)
points(MazEmptyAllAPR$Empty~MazFillAllAPR$Data,pch=19)
axis(1,at=seq(1,237,by=8),labels=MazFillAllAPR$Data[1:30],las=2)#, tick =
FALSE, ann=FALSE,las=2)
text(x=1,y=550, "e")

```

```

plot.default(MazFillAllOCT$Fill~MazFillAllOCT$Data,type="n",ylim=c(200,55
0),bty="n",ylab="",xlab="",xaxt="n")
points(MazFillAllOCT$Fill~MazFillAllOCT$Data)
points(MazEmptyAllOCT$Empty~MazFillAllOCT$Data,pch=19)
axis(1,at=seq(1,245,by=8),labels=MazFillAllOCT$Data[1:31],las=2)#, tick =
FALSE, ann=FALSE,las=2)
text(x=2,y=550, "f")

```

```
dev.off()
```

```

##### STEP 9 - Plot figure 8 - time lag between the high and low tides at
the
##### port of Santana and at the three tidal gauges
#####

```

```

pdf(file="LagsManu.pdf", family="serif", paper="a4",
pointsize=12)#width=3.5, height=3.5,

```

```

High<-subset(lags,lags$Tide=="High")
Low<-subset(lags,lags$Tide=="Low")

par(mfrow=c(1,2))
plot(as.numeric(High$Lag)~High$Site,bty="n",frame.plot=F,ylim=c(0,250),no
tch=T,xlab="HIGH TIDE",ylab="Time lag (mins)")
plot(as.numeric(Low$Lag)~Low$Site,bty="n",frame.plot=F,ylim=c(0,250),notc
h=T,xlab="LOW TIDE",ylab=NULL,yaxt="n")
dev.off()
#####
###

##### FINDING DURATION OF HIGH AND LOW TIDE PEAKS
#####

##### STEP 1 - Load water level data without missing days
#####

noNA_AntMANU<-read.table("Ant_MANU_noNA.txt",header=T)
noNA_CeleMANU<-read.table("Cele_MANU_noNA.txt",header=T)
noNA_MazMANU<-read.table("Maz_MANU_noNA.txt",header=T)

summary(noNA_AntMANU)
summary(noNA_CeleMANU)
summary(noNA_MazMANU)

##### STEP 2 - Find the times of the start and end of low and high tides
in #####
##### the am and pm using a variation around the peak of 5cm and output
to #####
##### separate text files. Shown here
#####

HorMin2<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))
HorMax2<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))

for(i in 1:253){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_AntMANU[as.character(noNA_AntMANU$Dat
a) ==
as.character(AmpsAntMANU$Data[i+1])&noNA_AntMANU$Nivel.agua.m==AmpsAntMAN
U$MinAM[i+1],c(1,9,5))))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]<(AmpsAntMANU$MinAM[i+1]+0.05)) else
which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
<(AmpsAntMANU$MinAM[i+1]+0.05))

HorMin2[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax2[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

```

```

MinAM_ANTMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsAntMANU$Data),HorMin2,HorMax2))
write.table(MinAM_ANTMANU,"MinAM_ANTMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin3<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))
HorMax3<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))

for(i in 1:253){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_AntMANU[as.character(noNA_AntMANU$Dat
a) ==
as.character(AmpsAntMANU$Data[i+1])&noNA_AntMANU$Nivel.agua.m==AmpsAntMAN
U$MinPM[i+1],c(1,9,5)])))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]<(AmpsAntMANU$MinPM[i+1]+0.05)) else
which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
<(noNA_AmpsAntMANU$MinPM[i+1]+0.05))

HorMin3[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax3[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MinPM_ANTMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsAntMANU$Data),HorMin3,HorMax3))
write.table(MinPM_ANTMANU,"MinPM_ANTMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin4<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))
HorMax4<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))

for(i in 1:253){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_AntMANU[as.character(noNA_AntMANU$Dat
a) ==
as.character(AmpsAntMANU$Data[i+1])&noNA_AntMANU$Nivel.agua.m==AmpsAntMAN
U$MaxAM[i+1],c(1,9,5)])))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]>(AmpsAntMANU$MaxAM[i+1]-0.05)) else
which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
>(AmpsAntMANU$MaxAM[i+1]-0.05))

HorMin4[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax4[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MaxAM_ANTMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsAntMANU$Data),HorMin4,HorMax4))
write.table(MaxAM_ANTMANU,"MaxAM_ANTMANU_5cm.txt",row.names=F)

```

```

HorMin5<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))
HorMax5<-array(NA,length(AmpsAntMANU$Data))

for(i in 1:253){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_AntMANU[as.character(noNA_AntMANU$Dat
a) ==
as.character(AmpsAntMANU$Data[i+1])&noNA_AntMANU$Nivel.agua.m==AmpsAntMAN
U$MaxPM[i+1],c(1,9,5)])))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]>(AmpsAntMANU$MaxPM[i+1]-0.05)) else
which(noNA_AntMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
>(AmpsAntMANU$MaxPM[i+1]-0.05))

HorMin5[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax5[i+1]<-as.character(noNA_AntMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MaxPM_ANTMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsAntMANU$Data),HorMin5,HorMax5))
write.table(MaxPM_ANTMANU,"MaxPM_ANTMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin2<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))
HorMax2<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))

for(i in 1:247){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_CeleMANU[as.character(noNA_CeleMANU$D
ata) ==
as.character(AmpsCeleMANU$Data[i+1])&noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m==AmpsCele
MANU$MinAM[i+1],c(1,9,5)])))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]<(AmpsCeleMANU$MinAM[i+1]+0.05)) else
which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
<(AmpsCeleMANU$MinAM[i+1]+0.05))

HorMin2[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax2[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MinAM_CELEMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsCeleMANU$Data),HorMin2,HorMax2))
write.table(MinAM_CELEMANU,"MinAM_CELEMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin3<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))
HorMax3<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))

```



```

for(i in 1:247){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_CeleMANU[as.character(noNA_CeleMANU$D
ata) ==
as.character(AmpsCeleMANU$Data[i+1])&noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m==AmpsCele
MANU$MinPM[i+1],c(1,9,5))))))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]<(AmpsCeleMANU$MinPM[i+1]+0.05)) else
which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
<(noNA_AmpsCeleMANU$MinPM[i+1]+0.05))

HorMin3[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax3[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MinPM_CELEMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsCeleMANU$Data),HorMin3,HorMax3))
write.table(MinPM_CELEMANU,"MinPM_CELEMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin4<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))
HorMax4<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))

for(i in 1:247){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_CeleMANU[as.character(noNA_CeleMANU$D
ata) ==
as.character(AmpsCeleMANU$Data[i+1])&noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m==AmpsCele
MANU$MaxAM[i+1],c(1,9,5))))))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]>(AmpsCeleMANU$MaxAM[i+1]-0.05)) else
which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
>(AmpsCeleMANU$MaxAM[i+1]-0.05))

HorMin4[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax4[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MaxAM_CELEMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsCeleMANU$Data),HorMin4,HorMax4))
write.table(MaxAM_CELEMANU,"MaxAM_CELEMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin5<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))
HorMax5<-array(NA,length(AmpsCeleMANU$Data))

for(i in 1:247){

```

```

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_CeleMANU[as.character(noNA_CeleMANU$D
ata) ==
as.character(AmpsCeleMANU$Data[i+1])&noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m==AmpsCele
MANU$MaxPM[i+1],c(1,9,5))))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]>(AmpsCeleMANU$MaxPM[i+1]-0.05)) else
which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
>(AmpsCeleMANU$MaxPM[i+1]-0.05))

HorMin5[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax5[i+1]<-as.character(noNA_CeleMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MaxPM_CELEMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsCeleMANU$Data),HorMin5,HorMax5))
write.table(MaxPM_CELEMANU,"MaxPM_CELEMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin2<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))
HorMax2<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))

for(i in 1:239){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_MazMANU[as.character(noNA_MazMANU$Dat
a) ==
as.character(AmpsMazMANU$Data[i+1])&noNA_MazMANU$Nivel.agua.m==AmpsMazMA
NU$MinAM[i+1],c(1,9,5))))

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]<(AmpsMazMANU$MinAM[i+1]+0.05)) else
which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
<(AmpsMazMANU$MinAM[i+1]+0.05))

HorMin2[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax2[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MinAM_MAZMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsMazMANU$Data),HorMin2,HorMax2))
write.table(MinAM_MAZMANU,"MinAM_MAZMANU_5cm.txt",row.names=F)

HorMin3<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))
HorMax3<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))

for(i in 1:239){

val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_MazMANU[as.character(noNA_MazMANU$Dat
a) ==

```

```
as.character(AmpsMazMANU$Data[i+1])&noNA_MazMANU$Nivel.agua.m==AmpsMazMA
NU$MinPM[i+1],c(1,9,5))))
```

```
lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]<(AmpsMazMANU$MinPM[i+1]+0.05)) else
which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
<(noNA_AmpsMazMANU$MinPM[i+1]+0.05))
```

```
HorMin3[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax3[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])
```

```
}
```

```
MinPM_MAZMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsMazMANU$Data),HorMin3,HorMax3))
write.table(MinPM_MAZMANU,"MinPM_MAZMANU_5cm.txt",row.names=F)
```

```
HorMin4<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))
HorMax4<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))
```

```
for(i in 1:239){
```

```
val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_MazMANU[as.character(noNA_MazMANU$Dat
a) ==
as.character(AmpsMazMANU$Data[i+1])&noNA_MazMANU$Nivel.agua.m==AmpsMazMA
NU$MaxAM[i+1],c(1,9,5)))))
```

```
lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]>(AmpsMazMANU$MaxAM[i+1]-0.05)) else
which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
>(AmpsMazMANU$MaxAM[i+1]-0.05))
```

```
HorMin4[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax4[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])
```

```
}
```

```
MaxAM_MAZMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsMazMANU$Data),HorMin4,HorMax4))
write.table(MaxAM_MAZMANU,"MaxAM_MAZMANU_5cm.txt",row.names=F)
```

```
HorMin5<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))
HorMax5<-array(NA,length(AmpsMazMANU$Data))
```

```
for(i in 1:239){
```

```
val<-
as.numeric(rownames(na.exclude(noNA_MazMANU[as.character(noNA_MazMANU$Dat
a) ==
as.character(AmpsMazMANU$Data[i+1])&noNA_MazMANU$Nivel.agua.m==AmpsMazMA
NU$MaxPM[i+1],c(1,9,5)))))
```

```

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]>(AmpsMazMANU$MaxPM[i+1]-0.05)) else
which(noNA_MazMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
>(AmpsMazMANU$MaxPM[i+1]-0.05))

HorMin5[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-21)+lims[1]])
HorMax5[i+1]<-as.character(noNA_MazMANU$times[(val[1]-
21)+lims[length(lims)]])

}

MaxPM_MAZMANU<-
as.data.frame(cbind(as.character(AmpsMazMANU$Data),HorMin5,HorMax5))
write.table(MaxPM_MAZMANU,"MaxPM_MAZMANU_5cm.txt",row.names=F)

##### STEP 3 - re-run step 2 using values between 1 cm and 20cm, storing
all ###
##### data as a sensitivity analysis to find the best value to use around
the ##
##### mean to define the duration of the peak. Use code above changing
only the
##### values indicated below (measured in m as our data are in
m)#####

lims<-if(val[1]>=20)which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[(val[1]-
20):(val[1]+20)]<(AmpsCeleMANU$MinAM[i+1]+#THIS VALUE SHOULD BE 0.02 TO
0.1
)) else which(noNA_CeleMANU$Nivel.agua.m[val[1]-val[1]:val[1]+20]
<(AmpsCeleMANU$MinAM[i+1]+#THIS VALUE SHOULD BE 0.01 TO 0.2
))

##### STEP 4 - Calculate durations using the times calculated at steps 2
and ##
##### 3 then find the modal duration at each range, for each tidal gauge,
for ##
##### the minima and maxima separately(I did this in excel).
#####

##### STEP 5 - plot modal values for figure S1
#####
minsMod<-read.table("Minima_Medias.txt",header=T)
maxMod<-read.table("Maxima_Medias.txt",header=T)

summary(minsMod)
summary(maxMod)

pdf(file="SuppMatFig.pdf", family="serif", paper="a4", pointsize=12)

par(mfrow=c(3,2))

plot(minsMod$Ajuruxi~minsMod$Range, xlab="Variation around the peak
(cm)", ylab="Modal duration of the low tide peak (mins)",pch=19, bty="l",
ylim=c(10,160))
text(c(0.7),c(157),labels=c("a"))

```

```
plot(maxMod$Ajuruxi~maxMod$Range, xlab="Variation around the peak (cm)",
ylab="Modal duration of the high tide peak (mins)",pch=19, bty="l",
ylim=c(10,160))
text(c(0.7),c(157),labels=c("b"))
```

```
plot(minsMod$Maraca~minsMod$Range, xlab="Variation around the peak (cm)",
ylab="Modal duration of the low tide peak (mins)",pch=19, bty="l",
ylim=c(10,160))
text(c(0.7),c(157),labels=c("c"))
```

```
plot(maxMod$Maraca~maxMod$Range, xlab="Variation around the peak (cm)",
ylab="Modal duration of the high tide peak (mins)",pch=19, bty="l",
ylim=c(10,160))
text(c(0.7),c(157),labels=c("d"))
```

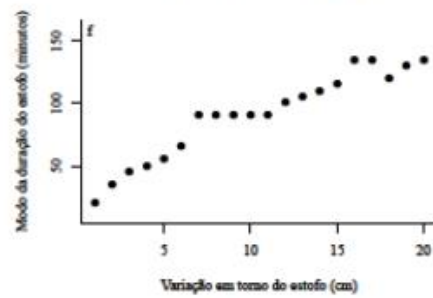
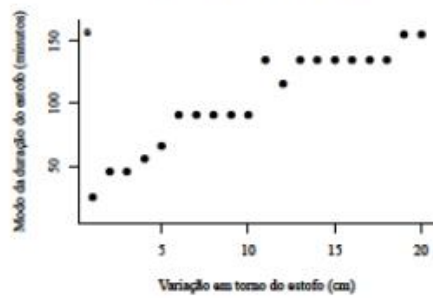
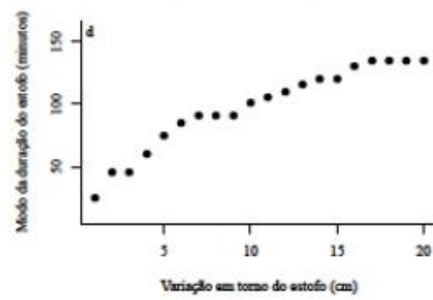
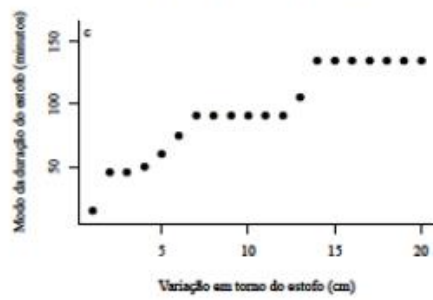
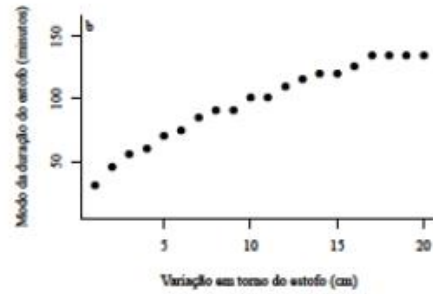
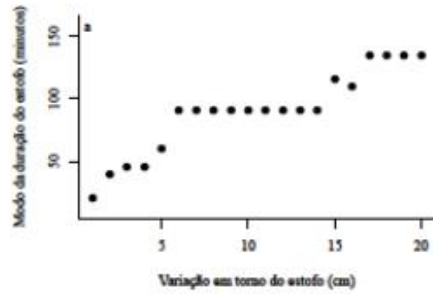
```
plot(minsMod$Mazagão~minsMod$Range, xlab="Variation around the peak
(cm)", ylab="Modal duration of the low tide peak (mins)",pch=19, bty="l",
ylim=c(10,160))
text(c(0.7),c(157),labels=c("e"))
```

```
plot(maxMod$Mazagão~maxMod$Range, xlab="Variation around the peak (cm)",
ylab="Modal duration of the high tide peak (mins)",pch=19, bty="l",
ylim=c(10,160))
text(c(0.7),c(157),labels=c("f"))
```

```
dev.off()
```

```
##### STEP 6 - Identify where the modal value stabilises (in our results
#####
##### between 6 and 14cm), to identify the duration of the low and high
tide ###
##### peaks
#####
#####
##### END OF SCRIPT
#####
#####
#####
```

**APÊNDICE 2** - Durações dos estofos de preamares e baixamares, utilizando diferentes intervalos em torno dos valores de estofos (1-20 cm).



**APÊNDICE 3** - Tabela com as precisões dos dados de rastreamento da BASE

<b>Dia de Rastreamento da BASE</b>	<b>29/10/2014</b>	<b>30/10/2014</b>	<b>31/10/2014</b>
<b>Duração do Rastreamento (horas)</b>	7,75	8,33	5,28
<b>Precisão para a Latitude (Sigma 95%) m</b>	0,004	0,005	0,006
<b>Precisão para a Longitude (Sigma 95%) m</b>	0,014	0,014	0,027
<b>Precisão para a Altitude (Sigma 95%) m</b>	0,017	0,024	0,018

**APÊNDICE 4** - Tabela do processamento dos dados de DGPS para determinação das altitudes dos locais estudados.

<b>Pós-processamento do ROWER</b>	<b>Marco inicial do microrelevo</b>	<b>Local instalado o marégrafo</b>
<b>Latitude original (geográficas)</b>	0°16'22,46627"S	0°15'18,62370"S
<b>Longitude original (geográficas)</b>	51°21'08,38168"W	51°21'27,55220"W
<b>Altitude elipsoidal original (m)</b>	-17,531	-24,655
<b>Latitude pós-processamento (geográficas)</b>	0°16'22,41152"S	0°15'18,60236"S
<b>Longitude pós processamento (geográficas)</b>	51°21'08,34400"W	51°21'27,60116"W
<b>Altitude elipsoidal pós processamento (m)</b>	-21,226	-24,555
<b>Desvio Padrão para Altitude - Std Dev e (m)</b>	0,008	0,001
<b>Desvio Padrão para Longitude - Std Dev hz (m)</b>	0,011	0,002
<b>Desvio Padrão para Latitude - Std Dev u (m)</b>	0,022	0,002
<b>Altitude geoidal (MAPGEO) (m)</b>	-23,67	-23,68
<b>Altitude ortométrica (m)</b>	2,444	-0,875

### **Flood pulse patterns in floodplain forest of the Amazon estuary**

Jonas Rodrigues Nunes Filho<sup>1</sup>, Karen Mustin<sup>2</sup>, Valdenira Ferreira dos Santos<sup>3</sup> and Marcelino Carneiro Guedes\*<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Masters Student in the “Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical”, Universidade Federal do Amapá, Macapá, AP, Brazil.

<sup>2</sup>Post-doctoral Scholar with the “Coordenação de Apoio ao Pessoal de nível Superior (CAPES), at Embrapa Amapá, Macapá, AP, Brazil.

<sup>3</sup>Researcher at the Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, Macapá, AP, Brazil

<sup>4</sup>Researcher at Embrapa Amapá, Macapá, AP, Brazil.

\*corresponding author:

E-mail: marcelino.guedes@embrapa.br, telephone: +55 96 4009 9535, fax: +55 96 4009 9501

#### **Abstract**

The Amazon Basin is formed by the most extensive hydrographic network in the world producing approximately 20% of the world's freshwater discharge. Both biodiversity and human livelihoods in the Amazon Basin are affected by water levels, which vary throughout the year and along the spatial gradient of the river system, with those in the estuary affected not only by precipitation upstream but also by semi-diurnal tides. Here we present data from three tidal gauges at increasing distances from the coast and show that tidal ranges in tributaries of the Amazon estuary are strongly related to predicted tides at the coast, presenting possibilities to extrapolate coastal tidal predictions throughout the estuary. We present both seasonal and tidal effects in all three tributaries and show that the tidal ranges are, on average between 2.1 and 2.4m, identifying the region as one of “mesotides”. The results further show that tidal ranges decrease with distance from the coast and high and low tide peaks occur later further inland. These results have important implications for management of tidal várzea, and for the planning of fluvial transport of all types in the Amazon estuary.



**Keywords**

Várzea, flooded areas, Amazon river, semi-diurnal tides

**Acknowledgements**

This study was carried out as a collaboration between the “Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária” (EMBRAPA), the “Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análises Espaciais” (IEPA), and the “Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical” (PPGBio, UNIFAP), with funding from the “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior” (Capes) as part of the project FLORESTAM.

**Word count:** 5014

## Introduction

The Amazon Basin is formed by the most extensive hydrographic network in the world, occupying a total area of 6,110,000k<sup>2</sup>. It extends over seven South American countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela and Guiana) and produces approximately 20% of the world's freshwater discharge (Agência Nacional de Águas 2016; Salati and Vose 1984). During periods of climatic extremes, the Amazon estuary becomes an important monitoring point such as during the droughts of 2005 (Tomasella et al. 2011), and extreme floods of 2009 (Marengo et al. 2011). The region is home to around one quarter of the earth's terrestrial species (Dirzo and Raven 2003) and the forests of the region account for approximately 15% of global terrestrial photosynthesis (Field et al. 1998).

The Amazon region is also home to an estimated 38 million human inhabitants, with over 60% living in major cities (United Nations Environment Program 2008). Outside of these major cities, the lives of the human population are intimately tied to the forests of the Amazon, in both flooded (wetlands) and un-flooded ecosystems. In flooded wetland forests of the Amazon (hereafter referred to as várzea), characterised by an aquatic and terrestrial phase during the year in Central Amazonia, and also by semidiurnal tides in the Amazon Estuary, livelihoods are even more dependent upon forest and water resources. The Amazon channel serves as a corridor for the transport of timber (Schöngart 2008), fish, fruits and vegetables which originate in these forests (Junk et al. 2000). Woody and non-woody plant species such as *Euterpe oleracea*, *Carapa guianensis*, *Virola surinamensis*, *Mora paraensis* and *Platymiscium filipes* (de Queiroz 2004), and shrimp species such as *Macrobrachium amazonicum* and *Macrobrachium carcinus* (Lima and Santos 2014) are of economic interest, and their production and transport are dependent upon waterways.

As such, both biodiversity and human livelihoods in the Amazon Basin are affected by water levels, which vary throughout the year and along the spatial gradient of the river system (Hida et al. 1998). The broad-scale geographic variation along the river can be seen reflected in the

diversity and structure of the várzea (Wittmann et al. 2006). In general, várzea has lower species diversity than terra firme as it is characterised by species adapted to periodically anoxic conditions (Rogge et al. 1998). While there is a body of work investigating how tidal flood pulses vary along rivers which discharge in to the Pacific Ocean (e.g. Devlin et al. 2014; Jay et al. 2015; Matte et al. 2013; Mofstakhari et al. 2013; Mofstakhari et al. 2015; Zaron and Jay 2014), and these phenomena have been examined in the Amazon region (Beardsley et al. 1995; Gabioux 2002; Gabioux et al. 2005; Gallo and Vinzon 2005; Kosuth et al. 2009; Ribeiro 2013), a knowledge gap exists in relation to local scale patterns of tidal flood pulses and their influence in várzea ecosystems.

These ecosystems are influenced by periodic floods of sediment-loaded, nutrient rich white-water, enriching the soil (Prance 1979). The flood pulses and accompanying sediment influxes have been shown to be controlled principally by two different mechanisms. Flood pulses upstream of Óbidos (Central Amazonia), approximately 870 km above the river mouth, are mainly controlled by the variation in precipitation regime which is strongly seasonal (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1977), whereas downstream of Óbidos (Amazon Estuary) they are also influenced by semidiurnal tides which push the sediment-loaded water further in to the várzea (National Geospatial-Intelligence Agency 2014). Above Óbidos the forest is referred to as “seasonal” várzea, below Óbidos as “tidal” várzea (Prance 1979). The twice-daily inundations caused by semidiurnal tides lead to lower species diversity in tidal várzea as compared to seasonal várzea, with the former characterised by species adapted to variable periods of exposure to the air, extremes of temperature, desiccation, wind and rain (Widdows and Brinsley 2002; Wittmann et al. 2006). Furthermore, the diaspores of the majority of tree species in várzea have specific tissues or other adaptations to provide buoyancy, such that they are able to float for long periods of time facilitating their dispersal by water (hydrochory) (Kubitzki and Ziburski 1994). Dispersal of seeds by fish (ichthyochory) is also common, and in both cases the diaspores ultimately sink to the forest floor where they begin to germinate shortly after the end of the submerged period (Kubitzki and Ziburski 1994).

Tidal flooding of the tributaries of the Amazon and tidal várzea occurs when, during the rising tide the waters of the River Amazon and its tributaries are dammed by the incoming water from the Atlantic Ocean, and the water level of the river begins to rise. This phenomenon results from the combination of seasonally variable water levels owing to the precipitation regime, and the tidal effects. In between the rising and falling tides there are high and low tide “slacks” – periods in which the water level remains constant. The Amazon Estuary is characterized by a semidiurnal tidal cycle in a mesotidal regime. The effect of the tide decreases with distance from macrotidal (>4m tidal range) in the river mouth to a mesotidal regime (2-4m tidal range) further inland (Beardsley et al. 1995). In the Amazon as in other tidal rivers, the tide itself, and therefore the river level, are influenced by variations in gravitational force exerted during the lunar cycle. Spring tides occur during New and Full moons, and represent the periods in which the high tide water level is at its highest; whereas when the moon is waxing and waning the lowest high tide water levels occur (Kosuth et al. 2009). The penetration of the tide in to an estuary results from the interaction between river flow and the tide, with the latter being deadened and progressively distorted by the forces of friction from the river bed and river flow (Godin 1999). The tide is further influenced by the geometry of the river channel (Ippen and Harleman 1966). In reality, at any given location along the Amazon river system, and at any time of year, control of the water levels is much more complex and is related to depth of the river, physiography of the river-mouth, morphology of the riverbed and river discharge (Gabioux 2002; The Open University 1999).

The Amazon is the most biodiverse region of the planet, and the livelihoods of millions of people directly depend upon the resources provided by the rivers and forests of the basin. The Amazon estuary is influenced by the tides, but relatively little is known about how this influence plays out to affect both biodiversity and human communities’ dependent upon the world’s largest freshwater river. Given this, the objective of this study was to monitor tidal levels in three distinct tributaries of the Amazon river, and specifically to: 1) verify the relationships between measured tidal levels in the tributaries and official tidal predictions at the nearest port; 2) characterize the

tidal range of the flood pulse throughout the year; and 3) characterize geographic variation in tidal flood pulse between the three tributaries.

## Material and methods

### Study área

The study was conducted in the municipality of Mazagão in the state of Amapá, in the Brazilian Amazon. Tidal gauges were installed at three locations (Mazagão Velho - 0°15'18.59"S and 51°21'27.60"W; Maracá - 0°26'50.12"S and 51°27'36.60"W and Ajuruxi - 0°32'3.41"S and 51°32'24.08"W; Fig 1) within the estuarine zone where the rivers Mazagão, Maracá and Ajuruxi join with the northern channel of the Amazon river.

The study region has a hot and humid tropical climate, classified as a Tropical Monsoon climate (type Am(i) in the Köppen classification), receiving a large quantity of solar energy throughout the year owing to its position along the equator. The region has an average annual rainfall of 2423 mm, irregularly distributed throughout the year, with highest rainfall between January and June, and a season of little rainfall which peaks between September and November. This large seasonal variation in rainfall is due to the annual migration of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), which is associated with the confluence of the Trade Winds, the low atmospheric pressure over the equator, and the areas of maximum sea surface temperature (Melo et al. 2009). The bimodal variation in rainfall is also influenced by the *El-Niño-Southern Oscillation* - ENSO (Richey et al. 1989) and influences the hydrological cycle and water levels in the region that are also affected by semi-diurnal meso- and macro-tides (Salomão et al. 2007). The maximum and minimum levels are reached in March and September during the equinox periods (Santos 2006). The average annual temperature is 27.66°C (Instituto Nacional de Meteorologia 2015).

The soil is characterized by a silt-clay texture that can be classified as a Gleysol (Pinedo-Vásquez et al. 1999). The predominant vegetation is tall várzea, with a high frequency of palm trees (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2012). The region is relatively flat with only small

oscillations in elevation and areas of more sunken relief, which limits drainage of the soil, a limitation further intensified by the shallowness of the water table (Zoneamento Ecológico-Econômico 2008).

### **Data collection**

Data on water pressure and temperature were collected every five minutes in a period from January 2013 to February 2015 using Hobo tidal gauges (water level logger U20) installed adjacent to várzea forest in each of the three tributaries of the Amazon river – Ajuruxi (~67.23 km from the Port of Santana), Maracá (~54.15 km from the Port of Santana) and Mazagão (~30.67km from the Port of Santana). These distances were calculated along the coastline of the northern channel of the Amazon River, in ArcGIS version 10.1 (ESRI 2012). Accounting for distance along the northern channel of the Amazon and then along the tributaries, the distances become approximately 69, 59 and 32km respectively and therefore the pattern of distances from the ocean holds, regardless of how the distances are measured. The tidal gauge at Mazagão was moved approximately 100 m in early 2015. The tidal gauges were attached to wooden posts in a position chosen based on the water depth, as the pressure sensor must always be submerged at a minimum depth of 60 cm to function correctly. With this in mind the tidal gauges were installed during the lowest tide of summer (when the river level is lower), in locations with a depth of at least 1 m, such that the sensor would Always be submerged at a minimum depth of 60 cm regardless of tide height. Data were uploaded from the sensors monthly. Water pressure data were converted to water level above the sensor using the relationship between the last registration of water pressure and the water level at the time of data upload, which was verified using the wooden ruler upon which the sensors were installed. The calculation was made automatically by the tidal gauge software (Onset 2016) using the pressure readings every five minutes during the collection period, providing ultimately water level readings every five minutes. After each reading the tidal gauges were re-set in the same positions. Validations were conducted in the field manually monitoring water levels using a wooden ruler, every five minutes for 4 hours around the tidal peak.

## **Data Analysis**

Water level data from the three tidal gauges were uploaded in to excel spreadsheets for processing. Owing to technical problems with the tidal gauges there were a number of gaps in the data over these time periods, and as such the period between March 2014 and February 2015 was selected for use in these analyses as it represented the most complete 12-month period, and was therefore best suited to capture seasonal variation in water levels owing to both tidal and climatic effects. All data analyses were carried out using scripts written in R version 3.2.2 and in Microsoft Excel 2016 (R Core Team 2015 - Online Resource 1).

### ***Relationship between tidal ranges in the tributaries and at the Port of Santana***

The tide in the region is semi-diurnal, characterised by two high tides and two low tides per 24-hour period. The times and levels of the two high tide peaks and two low tide peaks were identified for each day for which data were available, for each tidal gauge. The total amplitude of each tide was calculate by finding the absolute difference between the water level of the low and high tides in each 12-hour period. These were then modelled against predicted tidal ranges at the coast in the Port of Santana (data made available by the Centro de Hidrografia da Marinha - Banco Nacional de Dados Oceanográficos) using Generalised Linear Models, to confirm whether the amplitude of the tide at the coast is a strong predictor of tidal range further inland.

### ***Pattern of temporal variation in water level throughout the year***

Water level data were plotted for each tidal gauge throughout the twelve-month period. Data were also separated for two representative months – April and October (wet and dry seasons, respectively). The duration of the flood tide (time taken for the tide to rise between the low tide minima and high tide maxima) was calculated, as was the duration of the ebb tide (time taken for the tide level to fall from high to low tide), and these values were also averaged across the year.

### ***Geographic variation in tidal patterns between the three tributaries***

An overall average amplitude at each tidal gauge location across the twelve-month period was



calculated and these were compared using ANOVAs to test for significant differences in the average amplitudes at the three locations.

In order to calculate the slack period of the low and high tides (duration of the low and high tide peaks) it was first necessary to identify an appropriate variation around the maximum or minimum value in each cycle which would capture the true duration of the peak, or the period in which the water level remains practically constant until the tide reverses, without the influence of waves resulting from wind or passing boats. Values between 1cm and 20cm were tested and the modal duration found (Online resource 2).

For one day in each of the representative months (16<sup>th</sup> April and 9<sup>th</sup> October) water level data were converted to amplitudes by subtracting the minimum in each 12-hour period.

## Results

### *Relationship between tidal ranges in the tributaries and at the Port of Santana*

The tidal ranges at all three tidal gauges are in the range of 1.2 – 2.8 m, with average tidal ranges throughout the year in the range of 2 – 2.5m demonstrating that the region can be classified as one of mesotides. The relationship between tidal range at the coast in the Port of Santana and tidal range at each tidal gauge location was significant and positive (Fig 2; Ajuxuri GLM  $p < 0.001$ ,  $\beta = 0.580$ ,  $s.e. = 0.021$ ; Maracá GLM  $p < 0.001$ ,  $\beta = 0.574$ ,  $s.e. = 0.015$ ; Mazagão GLM  $p < 0.001$ ,  $\beta = 0.644$ ,  $s.e. = 0.016$ ).

### *Pattern of temporal variation in water levels throughout the year*

The water level at all three tidal gauges can be seen to vary along the twelve-month period with highest levels seen at all three locations in the first half of the year, and lowest levels in the second half of the year (Fig. 3), with the highest levels being recorded in April 2014 and the lowest in October 2014 (Fig. 3 and 4).

Flood tide duration was approximately half the duration of the ebb tide, regardless of location or time of the year, and with no overlap in 95% confidence intervals (Table 1 and Fig 5).

A pattern can be observed such that when the duration of the ebb tide is longer, the duration of the flood tide is shorter, and these peaks in flood and ebb tide durations occur on the days when overall tidal range is lowest (Figs 4 and 5).

The analysis of possible ranges to account for variation around the peak values due to wind and boat generated waves showed that within a variation of 6-14cm the modal low and high tide peaks at all three tidal gauge locations stabilise around 90-100 minutes (Table 1, Online resource 2).

These results are further supported by validations conducted in the field manually monitoring water levels using a wooden ruler, every five minutes for 4 hours around the tidal peak. The duration of the peak does not differ between high and low tides (Online resource 2).

***Geographic variation in tidal patterns between the three tributaries***

Average tidal range was lowest at Ajuruxi, higher at Maracá and higher still at Mazagão, with no overlap in 95% confidence intervals (Table 1 and Fig 6 and 7).

High and low tide peaks occur first at Mazagão (~30.67 km from the coast), then at Maraca (~54.15 km from the coast), then at Ajuruxi (~67.23 km from the coast) (Fig 6). At each of the three tidal gauge locations the lag between the high tide at the Port of Santana and the high tide at the tidal gauge locations is shorter on average than the lag between the low tides, with no overlap in the 95% confidence intervals (Table 1, Fig 8).

The lag between the high and low tides at the Port of Santana and at Ajuruxi (furthest from the coast) is always longest, with the length of the lags decreasing with proximity to the coast, without overlap in 95% confidence intervals (Table 1, Fig 8).

## Discussion

These results show that tidal ranges in tributaries of the Amazon estuary are strongly related to predicted tides at the coast (Fig. 2), presenting possibilities to extrapolate coastal tidal predictions throughout the estuary. Furthermore, both seasonal effects throughout the year (Fig. 3) and tidal effects during individual months and as the lunar cycle progresses (Fig. 4) can be seen in water levels in all three tributaries. Lunar phase influences tidal range, with the highest high tides (Spring Tides), and tidal ranges occurring at new and full moons, with smaller tidal ranges seen when the moon is waxing and waning (Neap Tides) (Fig. 4 and see Larcombe and Jago 1996; Ribeiro 2013). Furthermore, while the overall water levels are higher in the first half of the year, the amplitudes of the tides (most clearly seen in the Neap Tides when the moon is waxing and waning) are smaller than the amplitudes of the tides in the second half of the year (Fig. 4). This may be the result of the lower gravitational force of these lunar phases, and the resultant difficulty in moving a larger body of water (Nordtvedt 2001). Finally, the results show that the tidal range decreases with distance from the coast and that high and low tide peaks occur later further inland (Fig. 6), with further implications for understanding inundation of várzea throughout the Amazon estuary. In Mazagão, the region closest to the ocean, higher tidal ranges of more than 2.8m can be seen, whereas in Ajuruxi, the region furthest from the ocean, lower tidal amplitudes of less than 1.6m can be seen (Fig. 7). This pattern can be explained by the force of the tide entering the Amazon, such that at the mouth of the river the force of the tide is higher and increases the difference between low and high tide peaks, leading to a higher amplitude. Further away from the ocean the force of the fluvial discharge from the Amazon dissipates the force of the tide, and as such the high tide peak is diminished and thus the tidal range is smaller due to an effect known as “damping” (Gallo and Vinzon 2005).

The timing and durations of inundations of várzea have important ecological and management implications. Tidal várzea has been relatively under-studied compared with seasonal várzea, and

specifically relatively little is known about the tidal flood pulses. The flood tides of these pulses carry sediment loaded water further in to the várzea, and the ebb tides wash seeds, other biological material and sediments from the forest floor back in to the river channel to be dispersed throughout the estuary (Kubitzki and Ziburski 1994; Prance 1979). The length and spatial extent of tidal inundations can be modelled, however one of the required inputs to make such predictions is water level, as defined by tidal dynamics and rainfall seasonality. As such, water level data measured by tidal gauges are key to understanding the dynamics of tidal várzea, and therefore for planning for its management. Our results show that inundation time does not vary with distance from the ocean, with modal high and low tide slacks being 90-100 minutes at all three monitoring sites (Table 1), which may imply that smaller-scale elevation and soil drainage times are more important predictors of inundation extent and time, though this warrants further investigation. Another important use of tidal pulse data would be in the interpretation of data from radar images. Specifically, in order to use radar images to calculate forest biomass it is important to know the water level when radar images were taken as the radar reflects in the water and this can influence the definition of the digital terrain model used to show ground level, and to compare with canopy height to make the biomass calculations (Sambatti et al. 2012).

The effects of seasonal variations in water level throughout the year can be verified mainly by the water levels at low tide, with this level representing the volume of water in the river channel depending upon precipitation upstream of the site of measurement and the strength of the damming effect of the tide. As such the highest water levels at low tide can be seen in the first half of the year, when the most intensive rains occur in the region, and this level begins to reduce when the rains lessen in the second half of the year (Fig. 3). However, as can be seen in figure 3, this effect is also modulated by distance from the coast. In the Ajuruxi tributary, furthest from the coast, the low tide water level reduces more abruptly from August onwards, as compared with the water level at Mazagão, closest to the coast where the observed reduction in water level at low tide is smoother and more accentuated from October onwards. This shows that the seasonal effect of the changing precipitation levels is more pronounced, relative to the tidal effect, further from

the coast, even though the distances are still relatively small in comparison with Óbidos, 870km from the coast. When comparing typical months of the first and second halves of the year (April and October respectively) this same seasonal pattern can be observed (Fig. 4). At all three locations the water level is lower in October than in April. This is primarily due to the increase in the water level in the river channel in the rainy season. While March is the month of highest precipitation in the Amazon region (Instituto Nacional de Meteorologia 2015), the highest water levels in the mouth of the Amazon occur in May (Santos 2006), as a result of the time taken for the rains which fall in the Eastern and Central Amazon to arrive in the estuary. The duration of the flood and ebb tides also varies throughout the year, with an increase in the duration of flood tide, and a decrease in the duration of ebb tide, when the fluvial discharge of the Amazon is less in the second half of the year and more so at Neap Tides. Even though the force of the tide is theoretically the same throughout the year, only varying with the lunar cycle, that same force pushing a smaller volume of water could result in a longer duration of flood tide.

A key next step will be to analyse water level data from the Amazon estuary, such as those collected in this study, in relation to precipitation data, to verify these relationships with rainfall seasonality. Such analyses would be further strengthened by using a longer sampling period (here the data cover a 12 month period), which would potentially allow for investigating effects of climate change on the observed patterns. However, there are logistical difficulties and relatively high costs associated with installing and monitoring these types of tidal gauges in the Amazon Estuary as the locations are relatively remote and difficult to access, and data storage on the gauges is currently limited. Indeed, there is a necessity for cheaper sensors with more data storage capacity, in order to increase the number of monitoring points, to have more geographically representative monitoring, as well as to facilitate longer-term monitoring. There are also challenges associated with the management and analysis of large databases which warrant further attention to produce simple and accessible routines for analysing this type of data using freely available software. In this study the data were analysed mainly using the open-access

programming language R (R Core Team 2015), and the scripts produced have been provided for use in similar studies (Online Resource 1).

Besides the implications of tidal flood pulses for ecology and management of várzea, there are also important implications for human communities living in and dependent upon tidal várzea environments. Specifically, planning of fluvial travel is highly dependent upon tidal state, and in the study region local people time travel to the Port of Santana such that they depart from tributaries during the half-way point of the ebb tide, and as such they are descending the river with the tide, economizing both time and fuel used in the journey. The results of this study show that high and low tide peaks occur first at Mazagão (closest to the coast), then at Maraca, then at Ajuruxi (furthest from the coast) (Fig 6). At each of the three tidal gauge locations the lag between the high tide at the Port of Santana and the high tide at the tidal gauge locations is shorter on average than the lag between the low tides, with no overlap in the 95% confidence intervals (Table 1, Fig 8). This results from the fact that the duration of the ebb tide is greater than the duration of the flood tide. This together with the strong and directly proportional relationship between the measured tidal ranges and the official tidal predictions at the Port of Santana (Fig. 2), suggest that predicted tidal levels and times of high and low tides could be extrapolated to the study regions and throughout the estuary, calculating the time lag for the tide to arrive at each location. Planning of fluvial travel in small vessels and large cargo barges alike would be facilitated by such an ability to estimate tidal levels and peak times based on tidal predictions from the port.

In conclusion, the data presented here represent valuable measurements of tidal flood pulses in tidal várzea of the Amazon estuary. Long-term datasets monitoring water levels in the region should be supported and technologies made more accessible in order to increase sampling in the region, particularly as the global climate continues to change. Analyses such as those presented here help to understand the ecology of a relatively under-studied ecosystem, and support forest management and the livelihoods and well-being of riverine communities dependent on the waterways of the Amazon.

## References

- Agência Nacional de Águas (2016) Região hidrográfica Amazônica: A maior do mundo em disponibilidade de água. Available at: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>. Last accessed: 07/03/2016.
- Beardsley RC et al. (1995) The M2 tide on the Amazon shelf. *Journal Geophysical Research* 100:2283–2319.
- de Queiroz JAL (2004) Fitossociologia e Distribuição Diamétrica em Floresta de Várzea do Estuário do Rio Amazonas no Estado do Amapá. Masters Thesis. Pós-Graduação em Engenharia Florestal – UFPR. Curitiba.
- Devlin AT, Jay DA, Talke SA, Zaron E (2014) Can tidal perturbations associated with sea level variations in the western Pacific Ocean be used to understand future effects of tidal evolution? *Ocean Dynamics* 64:1093-1120.
- Dirzo R, Raven PH (2003) Global state of biodiversity and loss *Annu Rev Environ Resour* 28:137- 167 doi:10.1146/annurev.energy.28.050302.105532.
- ESRI (2012) ArcGIS desktop: Release 10.1. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P (1998) Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components *Science* 281:237-240 doi:10.1126/science.281.5374.237.
- Gabioux M (2002) Influência da lama em suspensão sobre a propagação da maré na plataforma amazônica. Thesis. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gabioux M, Vinzon SB, Paiva AM (2005) Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf *Cont Shelf Res* 25:113-125.
- Gallo MN, Vinzon SB (2005) Generation of overtides and compound tides in the Amazon Estuary *Ocean Dynamics* 55:441-448.
- Godin G (1999) The Propagation of Tides up Rivers With Special Considerations on the Upper Saint Lawrence River *Estuar Coast Shelf Sci* 48:307-324 doi:<http://dx.doi.org/10.1006/ecss.1998.0422>.
- Hida N, Guilherme MJ, Shimmi O, Hiraoka M, Mizutani N (1998) Annual and daily changes of river water level at Breves and Caxiuana, Amazon Estuary *Geogr Rev Japan* 71:100-105.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1977) *Geografia do Brasil: Região Norte*. Rio de Janeiro. 466pp.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012) *Manual técnico da vegetação brasileira*. Rio de Janeiro. 271pp.
- Instituto Nacional de Meteorologia (2015) <http://www.inmet.gov.br> Last accessed 20th December 2015.
- Ippen AP, Harleman DRF (1966) Chapter ten: Tidal Dynamics in Estuaries. In: Ippen AP (ed) *Estuary of Coastline Hydrodynamics*. McGraw Hill, New York, USA.
- Jay DA, Leffler K, Diefenderfer HL, Borde AB (2015) Tidal-fluvial and estuarine processes in the lower Columbia River: I. Along-channel water level variations, Pacific Ocean to Bonneville Dam *Estuaries and Coasts* 38:415-433.
- Junk WJ, Ohly JJ, Piedade MTF, Soares MGM (2000) *The Central Amazon Floodplain: Actual Use and Options for a Sustainable Management*. Backhuys Publishers, Leiden.
- Kosuth P et al. (2009) Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River *Hydrological Processes* 23:3141–3150.
- Kubitzki K, Ziburski A (1994) Seed dispersal in flood plain forests of Amazonia *Biotropica* 26:30-43.
- Larcombe P, Jago CF (1996) The morphological dynamics of intertidal megaripples in the Mawddach Estuary, North Wales, and the implications for palaeoflow reconstructions *Sedimentology* 43:541-559.



- Lima JdF, Santos TdSe (2014) Aspectos econômicos e higiênico-sanitários da comercialização de camarões de água doce em feiras livres de Macapá e Santana, estado de Amapá 2014 4:8 doi:10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v4n1p1-8.
- Marengo JA, Tomasella J, Soares WR, Alves LM, Nobre CA (2011) Extreme climatic events in the Amazon basin *Theoretical and Applied Climatology* 107:73-85 doi:10.1007/s00704-011-0465-1.
- Matte P, Jay DA, Zaron ED (2013) Adaptation of classical tidal harmonic analysis to nonstationary tides, with application to river tides *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30:569-589.
- Melo ABC, Cavalcanti IFA, Souza PF (2009) Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos.
- Moftakhari H, Jay DA, Talke SA, Kukulka T, Bromirski PD (2013) A novel approach to flow estimation in tidal rivers *Water Resources Research* 49:4817-4832.
- Moftakhari H, Jay DA, Talke SA, Schoellhamer DH (2015) Estimation of historic flows and sediment loads to San Francisco Bay, 1849–2011 *Journal of Hydrology* 529:1247-1261.
- National Geospatial-Intelligence Agency (2014) Publication 124, Sailing Directions (en route): East coast of South America. Fourteenth Addition. Available on-line here: [http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV\\_PUBS/SD/Pub124/Pub124bk.pdf](http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV_PUBS/SD/Pub124/Pub124bk.pdf) Last accessed: 08/03/2016.
- Nordtvedt K (2001) Testing Newton's third law using lunar laser ranging *Classical and Quantum Gravity* 18:L133.
- Onset (2016) Available at: [http://www.onsetcomp.com/files/manual\\_pdfs/12315-G%20MANU20.pdf](http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/12315-G%20MANU20.pdf). Last accessed: 28/04/2016.
- Pinedo-Vásquez M, Padoch C, Ayres J, Henderson A (1999) Changes in soil formation and vegetation on silt bars and backslopes of levees following intensive production of rice and jute. In: Padoch C, Ayres JM, Pinedo-Vasquez M, Henderson A (eds) *Várzea: diversity, development, and conservation of Amazonia's whitewater floodplains*. pp 301-311.
- Prance GT (1979) Notes on the vegetation of Amazonia III. The terminology of Amazonian forest types subject to inundation *Brittonia* 31:26-38.
- R Core Team (2015) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ribeiro JL (2013) Aplicação da técnica de wavelets para análise e previsão de marés no estuário do Amazonas. Thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Richey JE, Nobre C, Deser C (1989) Amazon River discharge and climate variability: 1903 to 1985 *Science* 246:101-103.
- Rogge GD, Pimenta JA, Bianchini E, Medri ME, Colli S, Alves LMT (1998) Metabolismo respiratório de raízes de espécies arbóreas tropicais submetidas à inundação *Brazilian Journal of Botany* 21:153-158.
- Salati E, Vose PB (1984) Amazon Basin: A System in Equilibrium *Science* 225:129-138 doi:10.1126/science.225.4658.129.
- Salomão P, Terezo EFM, Jardim MAG (2007) Manejo florestal nas várzeas: oportunidades e desafios. Publication of the Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém. 210 p. ISBN: 978-85-7098-144-8.
- Sambatti J, Leduc R, Lubeck D, Roberto Moreira J, Roberto dos Santos J (2012) Assessing forest biomass and exploration in the Brazilian Amazon with airborne InSAR: an alternative for REDD *The Open Remote Sensing Journal* 5:21-36.
- Santos VF (2006) Ambientes Costeiros Amazônicos: Avaliação de Modificações por Sensoriamento Remoto. Thesis. Universidade Federal de Fluminense, Niterói, RJ, Brazil.
- Schöngart J (2008) Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains *For Ecol Manag* 256:46-58 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.037>.
- The Open University (1999) *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. Butterworth-Heinemann, Oxford. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-008036372-1/50000-3>.

- Tomasella J, Borma LS, Marengo JA, Rodriguez DA, Cuartas LA, A. Nobre C, Prado MCR (2011) The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem *Hydrological Processes* 25:1228-1242 doi:10.1002/hyp.7889.
- United Nations Environment Program (2008) *Environment Outlook in the Amazonia – GEO Amazonia*. Available at: <http://www.unep.org/pdf/GEOAMAZONIA.pdf> Last accessed 11/02/2016.
- Widdows J, Brinsley M (2002) Impact of biotic and abiotic processes on sediment dynamics and the consequences to the structure and functioning of the intertidal zone *J Sea Res* 48:143-156 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00148-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00148-X).
- Wittmann F et al. (2006) Tree species composition and diversity gradients in white-water forests across the Amazon Basin *J Biogeogr* 33:1334-1347 doi:10.1111/j.1365-2699.2006.01495.x.
- Zaron ED, Jay DA (2014) An analysis of secular change in tides at open-ocean sites in the Pacific *J Phys Oceanogr* 44:1704-1726.
- Zoneamento Ecológico-Econômico (2008) *Macrodiagnóstico do estado do Amapá primeira aproximação do ZEE*. Macapá: IEPA, 2008. 3ª edição. 142p. URL <http://www.iepa.ap.gov.br/arquivopdf/macrodiagnostico.pdf>.

**Figure legends (can be up to 9 figures and tables)**

**Fig.1** Map of study area showing the locations of the three tidal gauges.

**Fig.2** Tidal range (m) at the three tidal gauge locations, in relation to tidal range at the coast in the Port of Santana between March 2014 and February 2015. At decreasing distance from the coast - (a) Ajuruxi, (b) Maracá e (c) Mazagão.

**Fig.3** Water level (m) as measured by the tidal gauges between March 2014 and February 2015 at decreasing distances from the coast - (a) Ajuruxi, (b) Maracá and (c) Mazagão.

**Fig.4** Water level (m) as measured by the tidal gauges in April 2014 (highest annual levels) and October 2014 (lowest annual levels) at decreasing distances from the coast - (a,b) Ajuruxi, (c,d) Maracá and (e,f) Mazagão.

**Fig.5** Duration (in minutes) of flood tides (empty circles) and ebb tides (filled circles) in the months of April (a,c,e) and October (b,d,f) 2014, at the three tidal gauge locations at decreasing distance from the coast - Ajuruxi (a,b), Maracá (c,d) e Mazagão (e,f).

**Fig.6** Tidal range (m) calculated by subtracting the semi-diurnal minima from each value of water level, for two representative days during the months of highest and lowest water levels (14th April 2014 (a) and 9th October 2014 (b) respectively).

**Fig.7** Frequency distribution of tidal ranges (m) over the 12-month period between March 2014 and February 2015 at the three tidal gauge locations – (a) Ajuruxi, (b) Maracá and (c) Mazagão.

**Fig.8** Time (in minutes) between low and high tide peaks at the Port of Santana and the peaks at the three tidal gauge locations at decreasing distance from the ocean. Bold lines represent the median across March 2014 – February 2015, the notches show the 95% confidence interval around the median, the boxes represent the limits of the first and third quartiles, the whiskers represent 1.5 times the interquartile range, and the points the full range of the data.

**Supporting Information Captions**

**Table 1** Average tidal range, duration of flood and ebb tides, duration of high and low tide slacks and lags between high and low tides at the Port of Santana and at the three tidal gauge locations between March 2014 and February 2015 with sample sizes (n - measured in days) and 95% confidence interval based on a normal distribution (C.I.) presented in parentheses.

**S1** Script used in R.

**S2** Modal durations of the low and high tide peaks using different ranges around the peak values (1 to 20 cm).