



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL**

**MODELAGEM (BIDIMENSIONAL - 2DH) HIDRODINÂMICA APLICADA NO  
ESTUÁRIO DO RIO GUAMÁ (ESTADO DO PARÁ/BRASIL)**

**JOSÉ RODRIGO CRISTO CUNHA**

**Belém – PA**

**Outubro/2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL**

**MODELAGEM (BIDIMENSIONAL - 2DH) HIDRODINÂMICA APLICADA NO  
ESTUÁRIO DO RIO GUAMÁ (ESTADO DO PARÁ/BRASIL)**

**JOSÉ RODRIGO CRISTO CUNHA**

Dissertação de Mestrado Submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Naval.  
Área de Concentração: Transporte Hidroviário  
Orientador: Prof. Dr. Maamar El-Robrini

**Belém – PA**

**Setembro/2017**

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

**Sistemas de Biblioteca da UFPA**

---

Cunha, José Rodrigo Cristo, 1984-

Modelagem (Bidimensional- 2DH) hidrodinâmica aplicada no estuário do Rio Guamá (Estado do Pará/Brasil)/ José Rodrigo Cristo Cunha.- 2017.

Orientador: Maâmar El-Robrini

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, Belém,2017

1.Estuários - Guamá, Rio, Bacia(PA) 2. Hidrodinâmica 3. Correntes de maré 4. Engenharia naval I. Título

CDD 23.ed.551.4618098115

---

Bibliotecária:CRB

JOSÉ RODRIGO CRISTO CUNHA

**MODELAGEM (BIDIMENSIONAL - 2DH) HIDRODINÂMICA APLICADA NO  
ESTUÁRIO DO RIO GUAMÁ (ESTADO DO PARÁ/BRASIL)**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. DSc Maamar El-Robrini, UFPA

Doutor pela Universidade de Sorbonne Paris, França.

Banca Examinadora:

Prof. DSc Said Mounsif, UFPA

Pós Doutorado pela Ecole Central de Lyon – Lyon, França.

Prof. DSc Nélio Moura de Figueiredo, UFPA

Doutor pela Universidade Federal do Pará – Belém, Brasil

Prof. DSc Maria de Lourdes Souza Santos, UFPA

Doutora pela Universidade Federal do Pernambuco – Recife, Brasil

Coordenador do PPGENAV: \_\_\_\_\_

Prof.D.Sc Hito Braga de Moraes

Belém, Setembro de 2017.

Dedico este trabalho a minha amada família, que nunca deixou de acreditar em mim e aos amigos que estiveram ao meu lado.

## AGRADECIMENTO

Agradeço a Pai Celeste pela minha vida, e por ter permitido que esse trabalho acontecesse.

À minha mãe e meu irmão pela compreensão, apoio na logística da minha vida acadêmica.

Ao meu orientador Maâmar El-Robrini pelas oportunidades de trabalho.

À PPGENAV pelas estruturas e oportunidades oferecidas.

À Estação Meteorológica da UFPA que forneceram alguns dados utilizados neste trabalho.

À toda equipe de professores que compõe o corpo de professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Naval da UFPA por todo o conhecimento transferido.

Aos que me ajudaram no laboratório para que este trabalho acontecesse, Jéssica, Rafaela, Taynan, Augusto, Sérgio, Paulo Victor, Ronaldo, Bárbara pelas sugestões referentes ao trabalho e momentos de descontração e companheirismo. Assim como todos os outros que frequentam o laboratório.

A meus amigos que foram indispensáveis neste processo, Leilanne Ranieri por estar sempre desejosa em ajudar, Alan e Matheus. E todos meus amigos que me incentivaram a continuar perseverante nos piores momentos.

Ao Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros (GEMC) pela estrutura física do laboratório, softwares fornecidos e todos os momentos de alegrias e dificuldades.

## RESUMO

O estuário do rio Guamá com 160 Km de extensão é localizado entre os municípios de Belém (1° 27' 21" S e 48° 30' 14" W) e de São Miguel do Guamá (1° 37' 37" S e 47° 28' 58" W), faz parte da bacia do rio Guamá e é afluente do rio Pará, a sua nascente está situada às proximidades de Ourém. Procurou-se determinar as características morfológicas, o padrão de circulação hidrodinâmica, através de simulações do estuário do rio Guamá durante as marés de sizígia e quadratura. Ainda, foram determinadas as magnitudes de correntes de maré nesses períodos e identificadas áreas com potencial energético por correntes de macromaré. A metodologia seguiu as seguintes etapas: (1) levantamento bibliográfico (2) aquisição de dados (batimetria, nível de maré, vazão, precipitação, temperatura), (3) processamento de dados: batimetria no Surfer; séries temporais de nível de maré em ambiente Excel; (4) os dados processados foram submetidos em seguida a análises, e realizada a implementação do modelo, por fim, o modelo passa a gerar as simulações propriamente ditas: de maré vazante, enchente, quadratura e sizígia. A partir dos mapas foram gerados padrões de correntes médias na vertical, ao longo de um ciclo de maré de sizígia e de quadratura (meia maré vazante, meia maré enchente, estufa de preamar e estufa de baixamar). Através do SisBaHiA foi feita a simulação de 30 dias a partir do dia 15/06/2009, a curva de nível foi gerada de acordo com os dados medidos em campo por um período de 4 dias (19/06/2009 à 22/06). A curva de elevação da maré medida durante esses dias teve seus valores variando no mínimo 0.51 m e no máximo 3.6 m, comparando com o resultado do modelo onde teve como resultado de elevação de maré mínima 0.5872 e máxima de 3.6187. Por fim, identificaram-se áreas com potencial energético por correntes de macromaré no estuário do rio Guamá. Na maré de sizígia, 4 áreas com potencial energético foram verificadas, estas com velocidade de corrente entre 1.12 m/s e 1.47 m/s na meia maré enchente, estufa de preamar e meia maré vazante e suas densidades respectivamente 955, 2290 e 855 W/m<sup>2</sup>. Na maré de quadratura, 2 áreas com potencial energético foram verificadas, estas com velocidade de corrente entre 1.16 m/s e 1.17 m/s na meia maré enchente, e meia maré vazante e suas densidades respectivamente 780, 500 W/m<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** Estuário do rio Guamá, Modelagem, Circulação Hidrodinâmica.

## ABSTRACT

This research was carried out in the Guamá river estuary, which has 160 km of extension, located between the cities of Belém ( $1^{\circ} 27' 21''$  S and  $48^{\circ} 30' 14''$  W) and São Miguel do Guamá ( $1^{\circ} 37' 37''$  S and  $47^{\circ} 28' 58''$  W), it is part of the Guamá river basin and it is a tributary of the Pará River, its source is located near Ourém on its right bank. The analysis of the hydrodynamic circulation of the Guamá river estuary aimed to determine its bathymetric characteristics and to produce simulations of circulation scenarios in the estuary during spring and neap tides and also to compare the variations in the two tidal stages. Also, the magnitudes of tidal currents in these periods were determined as well as the areas with potential energy by macro-tide currents were identified. The methodology followed the following script: (1) bibliographic survey (2) acquisition of data of bathymetry, tidal level, flow, precipitation, temperature, (3) bathymetric data processing in Surfer; (4) the time series of tide level were submitted to data processing routines elaborated in the Excel windows software. The processed data were then analyzed, and inserted into the model, then the model generated scenarios of ebb, flood, neap and spring tide. From the maps, vertical current patterns were generated along a neap and spring tide cycle (ebb, flood, neap and spring tide). Through SisBaHiA software, a 30 days simulation was performed from 06/15/2009, the tide curve was generated according to the data collected in the field for a period of 4 days (from 06/19/2009 to 06/22/2009). The tide elevation curve measured during these days had values ranging from 0.51 m (minimum) to 3.6 m (maximum), comparing with the model result, the tidal elevation had 0.5872 (minimum) and 3.6187 (maximum). Through these simulations, surface maps of currents were generated to observe the different circulation patterns and, finally, areas with energy potential were identified by macro-tidal currents in the Guamá River estuary. In the spring tide, 4 areas potential with energy were verified, with current velocities between 1.12 m/s and 1.47 m/s in the ebbing tide, rising tide, and in the slack. Their respective densities respectively 955, 2290 and 855 W / m<sup>2</sup>. In the neap tide, two areas with potential energy were verified, with current velocities between 1.16 m/s and 1.17 m/s in the rising tide and ebbing tide and their densities, respectively are 780 and 500 W / m<sup>2</sup>.

**Keywords:** Guama river estuary, Modeling, Hydrodynamic Circulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Estuário do rio Guamá (LANDSAT, 2015) .....	20
Figura 2 - Esquema simplificado de um estuário bem misturado. ....	26
Figura 3 - Esquema simplificado de um estuário parcialmente misturado (Amaral, 2003). ....	27
Figura 4 - Esquema simplificado de um estuário altamente estratificado. ....	27
Figura 5 - Área de Localização do estuário do rio Guamá. Fonte: LANDSAT 2014. ....	30
Figura 6 - Mapa batimétrico do estuário do rio Guamá no trecho de Belém até São Miguel do Guamá na confluência com o rio Capim. ....	32
Figura 7 - Média pluviométrica mensal em mm. (ANA, 2014) .....	33
Figura 8 - Dados de temperatura (UFPA, 2015). ....	34
Figura 9 - Dados de vento de julho a dezembro/2015 (Fonte: Estação meteorológica do Instituto de Geociências, UFPA) .....	35
Figura 10 - Regiões do mundo com marés exploráveis. (Hammons, 1993). ....	42
Figura 11 - Barragem de maré. Fonte: Aquaret (2012). ....	43
Figura 12 - Lagoa de maré Offshore e junto à costa. Fonte: Aquaret (2012). ....	44
Figura 13 - Lagoa de maré Offshore e junto à costa. Fonte: Aquaret (2012). ....	44
Figura 14 - SeaGen S com turbinas submersas. Fonte: MCT (2017). ....	45
Figura 15 - SeaGen S com turbinas emersas. Fonte: MCT (2017). ....	45
Figura 16 - Esquema de SeaGen U. MCT (2017). ....	46
Figura 17 - Exemplos de passo para Modelagem Hidrodinâmica Computacional (ROSMAN et al., 2001). ....	47
Figura 18 - Malha do estuário do rio Guamá confeccionada no ArgusOne. ....	53
Figura 19 - Malha do estuário do rio Guamá gerada no Surfer e exportada para o Sisbahia. ...	54
Figura 20 - Batimetria do estuário do rio Guamá gerada no Surfer e exportada para o Sisbahia. .....	54
Figura 21 - Exemplo da distribuição dos 9 nós de conectividade de um elemento quadrangular. Os números em azul indicam o número dos nós na malha, enquanto que a numeração em preto representa a localização dos nós no elemento. ....	55
Figura 22 - Imagem sobreposta ao mapa. ....	61
Figura 23 - Sobreposição do croquis digitalizado sobre o mapa do estuário do rio Guamá. ...	61
Figura 24 - Batimetria do estuário do rio Guamá obtida. ....	62
Figura 25 - Curva de maré do estuário do rio Guamá gerada a partir das constantes harmônicas da área, por um período de 30 dias. Esta é uma das condições adotadas na modelagem deste estuário. Fonte: Autor .....	66
Figura 26 - Curva de elevação da maré gerada pelo SISBAHIA pelo período de 30 dias, iniciando no dia 15 de junho de 2009. ....	70
Figura 27 - U (velocidade longitudinal) e a V (velocidade transversal) no nó 3318 conforme localizado na figura 32. ....	71
Figura 28 - Altura de maré no estuário do rio Guamá: máximo 3.6 m e mínimo: 0.51 m. ....	72
Figura 29 - Relação entre os dados de elevação do estuário do rio Guamá coletados em campo e os dados gerados pelo modelo no SISBAHIA. ....	72

Figura 30 - Instante de altura de maré de sizígia (meia maré enchente, estofo de preamar, meia maré vazante, estofo de baixamar) representado pelos triângulos. ....	74
Figura 31 - Instante de meia maré enchente durante a sizígia onde observa-se uma variação muito dinâmica na elevação do estuário do rio Guamá próximo a UFPA. ....	75
Figura 32 - Elevação (m) - Meia maré enchente de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá. ....	75
Figura 33 - Elevação (m) - Meia maré enchente de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá. ....	76
Figura 34 - Elevação (m) - Meia maré enchente de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá. ....	76
Figura 35 - Detalhamento no padrão das correntes de maré na simulação 1, mostrando o comportamento de uma meia maré enchente de sizígia. Pode-se perceber uma maior velocidade na área em que as elevações estão variando com mais intensidade no estuário do rio Guamá próximo à UFPA.....	76
Figura 36 - Velocidade (m/s) - Meia maré enchente de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.....	77
Figura 37 - Velocidade (m/s) - Meia maré enchente de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.....	77
Figura 38 - Velocidade (m/s) - Meia maré enchente de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.....	77
Figura 39 - Padrão de elevação gerado pela simulação 2 (estofo de preamar). Pode-se observar que neste instante a elevação fica uniforme em vários perímetros do estuário do rio Guamá. ....	78
Figura 40 - Elevação (m) - Estofo de preamar na maré de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.....	78
Figura 41 - Elevação (m) - Estofo de preamar na maré de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.....	79
Figura 42 - Elevação (m) - Estofo de preamar na maré de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.....	79
Figura 43 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estofo de preamar de sizígia. Neste instante, os valores da velocidade estão próximo de 0 m/s perto de Belém e 0.25 m/s em Bujaru. ....	79
Figura 44 - Velocidade - Estofo de preamar de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá. ..	80
Figura 45 - Velocidade - Estofo de preamar de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá. ..	80
Figura 46 - Velocidade - Estofo de preamar de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá. ..	80
Figura 47 - Padrão de elevação gerado pela simulação 3 (meia maré vazante), observar o detalhamento das faixas de elevação bastantes curtas devido ao fato da maré estar vazando. Assim, ocorre um movimento de grande de massa d'água próximo à UFPA em direção a Baía de Guajará.....	81
Figura 48 - Elevação (m) - Meia maré vazante de sizígia – área 1 do estuário do rio Guamá..	81
Figura 49 - Elevação (m) - Meia maré vazante na maré de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.....	82
Figura 50 - Elevação (m) - Meia maré vazante de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá. ....	82

Figura 51- Padrão das correntes de maré na simulação 3, mostrando o comportamento de uma meia maré vazante de sizígia. Uma maior velocidade na área que as elevações estão variando com mais intensidade próximo a UFPA. ....	82
Figura 52 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.....	83
Figura 53 -Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.....	83
Figura 54 -Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.....	83
Figura 55 - Padrão de elevação gerado pela simulação 4 (estofa de baixa mar), neste instante a elevação fica uniforme em vários perímetros do domínio do estuário do rio Guamá próximo à UFPA, com pouca diferença de elevação até Bujaru. ....	84
Figura 56 - Elevação (m) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá. ....	84
Figura 57 - Elevação (m) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá. ....	85
Figura 58 - Elevação (m) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá. ....	85
Figura 59 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estofa de baixamar de sizígia. No momento do estofa de preamar as velocidade estão entre 0 m/s a 0.37 m/s ao longo do estuário do rio Guamá.....	85
Figura 60 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.....	86
Figura 61 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.....	86
Figura 62 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.....	86
Figura 63 - Instante de maré de quadratura (meia maré enchente, estofa de preamar, meia maré vazante, estofa de baixamar) representado pelos retângulos (preto, amarelo, verde e azul). ....	87
Figura 64 - Padrão de elevação gerado pela simulação 5 (meia maré vazante), observar o detalhamento das faixas de elevação devido ao fato da maré estar vazando, tem-se, um movimento grande de massa d'água próximo à UFPA em direção a Baía de Guajará. ....	88
Figura 65 - Elevação (m) - Meia maré vazante de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.....	88
Figura 66 - Elevação (m) - Meia maré vazante de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.....	89
Figura 67 - Elevação (m) - Meia maré vazante de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.....	89
Figura 68 - Observar a similaridade na simulação no momento de meia maré vazante de sizígia, uma vez que a maior velocidade das correntes de maré concentra-se na orla da UFPA. ....	89
Figura 69 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.....	90

Figura 70 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.....	90
Figura 71 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.....	90
Figura 72 - A elevação da altura d'água tem pouca variação no estuário do rio Guamá, o que caracteriza um estofa de baixa mar. ....	91
Figura 73 - Padrão de velocidade no estofa de baixamar de quadratura. Neste instante a velocidade das correntes de maré estão entre 0 m/s a 0.35 m/s.....	91
Figura 74 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixa mar de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.....	92
Figura 75 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixamar de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.....	92
Figura 76 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixamar de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.....	92
Figura 77 - Padrão de elevação gerado pela simulação 7 (meia maré enchente), observar que neste instante a elevação da altura de maré fica uniforme em vários perímetros do domínio do estuário do rio Guamá, caracterizando assim o momento de estofa. ....	93
Figura 78 - Elevação (m) - Meia maré enchente de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.....	93
Figura 79 - Elevação (m) - Meia maré enchente de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.....	94
Figura 80 - Elevação (m) - Meia maré enchente de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.....	94
Figura 81 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estofa de preamar de quadratura. Neste instante pode-se verificar que no estofa de preamar os valores da velocidade das correntes de maré estão na sua maioria entre 0 m/s e 0.17 m/s.....	94
Figura 82 - Velocidade (m/s) – Meia maré enchente de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.....	95
Figura 83 - Velocidade (m/s) – Meia maré enchente de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.....	95
Figura 84 - Velocidade (m/s) – Meia maré enchente de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.....	95
Figura 85 - Padrão de elevação gerado pela simulação 8 (estofa de preamar), neste instante a elevação fica uniforme em vários perímetros do domínio caracterizando assim o momento de estofa. ....	96
Figura 86 - Elevação(m) - Estofa de preamar de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.....	96
Figura 87 - Elevação(m) - Estofa de preamar de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.....	97
Figura 88 - Elevação(m) - Estofa de preamar de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.....	97
Figura 89 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estofa de preamar durante a maré de quadratura. Neste momento as velocidades de correntes de maré estão na sua maioria entre 0 m/s e 0.17 m/s.....	98

Figura 90 - Velocidade das correntes de maré durante o estofa de preamar de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.....	98
Figura 91 - Velocidade das correntes de maré durante o estofa de preamar de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.....	98
Figura 92 - Velocidade das correntes de maré durante o estofa de preamar de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.....	99
Figura 93 - Na área 1 da simulação 1 (meia maré enchente), durante a maré de sizígia os vetores mostram uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.24 m/s na área indicada pelos retângulos. ....	99
Figura 94 - Na área 2 da simulação 2 (estofa de preamar), durante a maré de sizígia mostra uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.47 m/s. ....	100
Figura 95 - Na área 3 da simulação 2 (estofa de preamar), durante a maré de sizígia há uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.12 m/s. ....	100
Figura 96 - Na área 1 da simulação 3 (meia maré vazante), durante a maré de sizígia os vetores mostram uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.21 m/. ....	101
Figura 97 - Na área 1 da simulação 5 (meia maré vazante), durante a maré de quadratura os vetores mostram uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.16 m/s.....	101
Figura 98 - Área 1 do estuário do rio Guamá da simulação 7 (meia maré enchente). Nesta simulação durante a maré de quadratura os vetores na área indicada pelos retângulos uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.17 m/s. ....	102

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Trabalhos de modelagem realizados na região amazônica .....	38
Tabela 2 - Informações sobre as malhas de elementos quadrangulares utilizadas no estuário do rio Guamá. ....	53
Tabela 3 - Significado dos termos das equações governantes do modulo 2DH.....	60
Tabela 4 - Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo, $\epsilon$ , para uso do modelo 2DH. Fonte: (ROSMAN, 2006). ....	63
Tabela 5 - Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica do porto de Belém, listadas pela significância da amplitude (Fonte: <a href="http://www.femar.com.br">http://www.femar.com.br</a> ).....	65
Tabela 6 - Vazão do estuário do rio Guamá mensal máxima, mínima e média. Fonte: (ANA, 2014). ....	67
Tabela 7 - Elementos da equação de vento.....	67
Tabela 8 - Dados de parâmetros de entrada utilizados para simulação hidrodinâmica no SISBAHIA.....	69
Tabela 9 - Comparação entre os dados reais e modelados de elevação da superfície. ....	73
Tabela 10 - Velocidade e densidade energética das simulações na maré de sizígia nas áreas com potenciais energéticos.....	102
Tabela 11 - Velocidade e densidade energética das simulações na maré de quadratura nas áreas com potenciais energéticos.....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHIMOR - Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental

SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

NE - Nordeste

NW-NE - Noroeste-Nordeste

SEMAS - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade

ANA - Agência Nacional das Águas

UFPA - Universidade Federal do Pará

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

FEMAR - Fundação de Estudo do Mar

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

IRNS - Institut National de la Recherche Scientifique

EQM - Erro Quadrático Médio

2DH - 2 Dimension Hydrodynamics

COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia/Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FIST - Filter in Space and Time

UTM - Universal Transverse de Mercator

MRP - Método Rugoso-Poroso

MMP - Método de Meio Poroso

MFS - Método de Filme Superficial

CEH - Conversores de Energia Hidrocinética

MCT - Marine Current Turbines

DFC - Dinâmica dos Fluidos Computacional

## SUMÁRIO

1.	Introdução.....	18
2	Objetivos.....	23
2.1	Geral.....	23
2.2	Específicos.....	23
3	Estuário.....	24
3.1	Apresentação.....	24
3.1.1	Classificação estuarina de acordo com a circulação das águas.....	25
3.1.2	Estuário bem misturado.....	26
3.1.3	Estuário parcialmente misturado.....	26
3.1.4	Estuário altamente estratificado.....	27
3.2	Classificação Geomorfológica de Estuários.....	28
3.2.1	Estuário de Planície Costeira.....	28
3.2.2	Fiordes.....	28
3.2.3	Estuário construído por Barra.....	28
4.	Caracterização do estuário do rio Guamá.....	30
4.1	Localização da área de investigação.....	30
4.2	Geomorfologias do estuário do rio Guamá.....	30
4.3	Clima e parâmetros meteorológicos.....	33
4.3.1	Precipitação.....	33
4.3.2	Temperatura do ar.....	34
4.3.2	Ventos.....	34
4.4	Hidrologia.....	36
4.5	Parâmetros oceanográficos.....	37
4.5.1	Maré: altura e correntes.....	37
4.5.2	Ondas.....	37
5.	Estudos de Modelagem Hidrodinâmica realizados na Bacia Amazônica.....	38
6	Geração de energia elétrica.....	41
6.1	Apresentação.....	41
6.2	Energia elétrica por Maremotriz.....	41
6.3	Tecnologias para geração de energia.....	43
7	Metodologia.....	47
7.1	Processos de modelagem hidrodinâmica em estuários.....	47
7.2	Importância da utilização dos modelos.....	49
7.3	Modelos de circulação hidrodinâmica.....	50
7.4	Classificações dos modelos hidrodinâmicos.....	50
7.5	Integralização dos dados.....	52
7.6	Características da malha adotada.....	52
7.7	Cálculo da densidade energética.....	55
8.	Modelo Hidrodinâmico.....	57
8.1	Modelo Hidrodinâmico do Sisbahia.....	57
8.2	Parâmetros Ambientais.....	60
8.2.1	Batimetria.....	60
8.2.2	Rugosidade de fundo.....	62
8.2.3	Marés.....	64
8.2.4	Vazão do rio.....	66
8.2.5	Ventos.....	67
8.2.6	Método de alagamento e secamento.....	68
9	Resultados.....	69
9.1	Maré de Sízígia.....	74

9.1.1	Simulação 1 (meia maré Enchente).....	75
9.1.2	Simulação 2 (Estofa de Preamar).....	78
9.1.3	Simulação 3 (Meia Maré Vazante).....	81
9.1.4	Simulação 4 (Estofa de Baixamar).....	84
9.2	Maré de Quadratura.....	87
9.2.1	Simulação 5 (Meia Maré Vazante).....	88
9.2.2	Simulação 6 (Estofa de Baixamar).....	91
9.2.3	Simulação 7 (Meia Maré Enchente).....	93
9.2.4	Simulação 8 (Estofa de Preamar).....	96
9.3	Densidade energética a partir das correntes de maré.....	99
10.	Conclusões.....	104
11.	Referências Bibliográficas.....	106

## 1. Introdução

Nos últimos anos a Zona Costeira e Estuarina da Amazônia têm passado por grandes transformações, tanto de origens inerentes a sua natureza quanto antrópicas. No estuário do rio Guamá, estes impactos estão associados principalmente à poluição com lixo e efluentes domésticos e industriais que são lançados sem nenhum tratamento ou controle de preservação (RIBEIRO, 2001) oriunda de vários bairros de Belém, vindo através dos inúmeros canais de maré que recortam a cidade, bem como a processos de erosão (reco das margens), entre outros (DIAS, 2011).

De acordo com (DYER, 1997) a introdução da água proveniente da maré em um estuário é resultante da interação do escoamento fluvial assim como do movimento oscilatório gerado por esta. As ondas geradas são longas e normalmente amortecidas e progressivamente distorcidas pela vazão fluvial e forças de atrito no fundo e nas laterais do estuário. Esse processo leva a um esquema hidrodinâmico que é bastante complexo, visto que o número de variáveis a serem consideradas é relativamente grande.

A hidrodinâmica condiciona a distribuição e o transporte de matéria orgânica particulada, sedimentos, nutrientes, clorofila a, larvas, plâncton, etc. Além de prever o comportamento do estuário para possíveis tomadas de decisão quando se tratam de navegação, construções portuárias, etc. Desta forma, este conhecimento é fundamental para o entendimento de processos ecológicos, geológicos, físicos, químicos além da qualidade da água (KJERFVE, 1990; KJERFVE et al., 1982).

A aplicação da modelagem numérica para a determinação da circulação em áreas costeiras justifica-se pelo fato de determinar o padrão de circulação em todo o corpo d'água para permitir a previsão das alterações na circulação hidrodinâmica. Para o estudo do padrão de circulação em todo o domínio é necessário medir a intensidade de correntes durante vários ciclos de maré em diversos pontos na área de estudo, exigindo uma equipe de campo numerosa e diversos equipamentos, sendo, portanto, este método, caro e demorado. Com a utilização do modelo hidrodinâmico, basta fazer medições de correntes de maré em alguns poucos pontos para a sua calibração.

Modelos que descrevam a hidrodinâmica em sistemas estuarinos são ferramentas poderosas, tanto no que se refere a sua contribuição na avaliação de impactos ambientais como na definição de estratégias para o gerenciamento costeiro. O conhecimento do padrão de circulação de um corpo d'água é fundamental para diversos estudos ambientais. Os estudos de qualidade de água em função do lançamento de poluentes no mar, em lagunas;

bem como estudos de determinação de níveis de cheias e possibilidade de assoreamento em desembocaduras.

A popularização dos *personal computers* (PC's), com a capacidade de processamento cada vez maior e mais eficiente, além da existência de softwares livres relacionados à modelagem de processos costeiros, assim como a difusão de técnicas sofisticadas de levantamento de dados em campo associado ao aumento da capacidade de registro de equipamentos tem ocasionado um crescimento na utilização desses modelos, onde é possível prever cenário de causa e efeito.

Os modelos computacionais são considerados importantes na simulação hidrodinâmica, e na validação dos modelos referentes à circulação hidrodinâmica em estuários. Com o auxílio dos modelos hidrodinâmicos, a visão dinâmica de processos em complexos sistemas aquáticos, a exemplo dos estuários amazônicos, torna-se muito mais claro.

Podem ser citados pesquisas desenvolvidas em estuários das regiões Sul/Sudeste do Brasil: Uma nova abordagem para a solução numérica de problemas de advecção e difusão multidimensional em corpos de água naturais (ANDRADE 2006); Modelagem do padrão de escoamento no canal da passagem (Vitória – Espírito Santos) (MACIEL, 2004); Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá (RIBAS 2004); Estudo de circulação hidrodinâmica 3D e trocas de massas d'água da Baía de Guanabara – Rio de Janeiro (SAMPAIO 2003); Modelagem Hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina Paranaguá - Paraná (SOTO 2004);

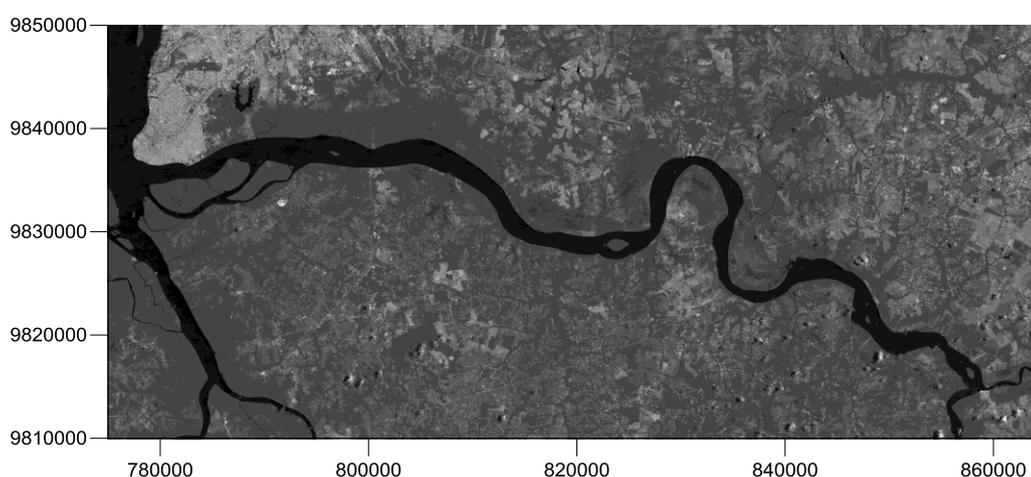
Na região Nordeste: Análise da hidrodinâmica da baía de Todos os Santos (Bahia) (XAVIER, 2002); Modelagem de pluma de emissários com T90 variável na costa oceânica de Salvador - Bahia (TOPÁZIO 2003).

Na região Norte: Modelagem numérica da circulação de correntes de maré da Baía de Marajó e rio Pará (Pará) (Souza, 2006); Aplicação da Modelagem Hidrodinâmica na Circulação do Estuário do rio Maracanã (NE do Pará) (BARBOSA, 2007); Modelagem Hidrodinâmica 2DH no furo da Laura – Nordeste Paraense (LOPES, 2016); A influência da vazão fluvial sobre a propagação da maré no estuário do rio Amazonas (GALLO, 2004); Aplicação do modelo hidrodinâmico no estuário do rio Caeté (Ne do Pará) (Abreu, 2006); Modelagem hidrodinâmica aplicada ao estuário amazônico – uma abordagem em malha flexível (Borba, 2014).

De acordo com MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2012, o crescimento da atividade econômica sempre esteve relacionado aos estuários; eles são vias de acesso para o interior

do continente importante para a navegação; as águas que compõem os estuários são renovadas periodicamente pelo efeito das marés e são habitats para as espécies biológicas.

Outro viés aplicado na modelagem hidrodinâmica é em relação ao potencial energético existente nas marés. A geração de energia elétrica é obtida mediante diferentes tecnologias. As fontes de energia empregadas para a geração de eletricidade são agrupadas basicamente em duas categorias: fontes de energia renováveis ou não renováveis. Uma das tecnologias, com fonte de energia renovável, ainda em estado incipiente de desenvolvimento, é a que utiliza a energia procedente das marés. Esta tecnologia consiste em transformar em potencial elétrico, a energia cinética oriunda da propagação contínua da onda de maré astronômica, com utilização de Conversores de Energia Hidrocinética (CEHs). Pode ser utilizada para obtenção de energia de qualquer corrente hidrodinâmica.



**Figura 1 - Localização do Estuário do rio Guamá (LANDSAT, 2015)**

Os estuários são ambientes diferenciados devido ao seu gradiente de salinidade por conta da diluição da água do mar com água doce, e são importantes para a sobrevivência humana. Cerca de 60% das grandes cidades distribuídas ao redor do mundo são edificadas na proximidade de um estuário (Geophysics Study Committee, 1977). Os estuários são importantes ainda no âmbito socioeconômico, visto que por conta de sua riqueza biológica e localização, servem como um ambiente propício para o turismo, aquicultura e pesca.

O estuário do rio Guamá (Figura 1) é usado para navegação de transporte de passageiros e de comércio, pesca e representa, ainda, a principal fonte de abastecimento da rede de distribuição de água na cidade de Belém.

Desta forma, o desenvolvimento de estudos hidrodinâmicos no estuário do rio Guamá é de grande relevância para produzir simulações durante o ciclo de maré das águas, e consequentemente a prevenção ambiental destas.

O modelo utilizado para modelagem da hidrodinâmica da área de interesse faz parte do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBAHIA®).

Esta dissertação de mestrado está subdividida em 9 capítulos:

Capítulo 1 - Introdução;

Capítulo 2 - Objetivos geral e específicos;

Capítulo 3 - Conhecimento teórico sobre os estuários e suas classificações;

Capítulo 4 - Caracterização do estuário do rio Guamá;

Capítulo 5 - Estudos de modelagem hidrodinâmica realizados na Amazônia;

Capítulo 6 - Geração de Energia Elétrica;

Capítulo 7 - Metodologia, destacando a aquisição de dados multidisciplinares, o processamento dos programas/software e a integralização dos dados;

Capítulo 8 – Modelos Hidrodinâmicos;

Capítulo 9 – Resultados;

Capítulo 10 - Conclusões;

Capítulo 11 - Referências Bibliográficas.

A aplicação da modelagem computacional pode ser aplicada em vários campos de estudo, dentre eles, a identificação de áreas com potencial energético em estuários com macromaré.

Segundo DOE/EIA 2011/b, a demanda de energia mundial entre o ano de 2008 e 2035 aumentará em 53%, com projeção anual de cerca de 2,3% ao ano. Esta demanda provoca uma busca natural por fontes alternativas de energia para supri-la, portanto é de suma importância realizar novas pesquisas relacionadas ao assunto. Ainda, numerosas empresas têm desenvolvido tecnologias relacionadas à energia de maré. Esta dissertação se enquadra na linha de pesquisa desenvolvida no âmbito do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia Fluvial e Oceânica (INEOF) em andamento (2017-2022).

A tecnologia para obter energia elétrica por meio de correntes de maré tem se tornado cada vez mais atrativa para estudos uma vez que o impacto ambiental é razoavelmente brando em comparação às usinas nucleares e outras fontes de energia. As marés constituem uma fonte de energia promissora haja vista sua periodicidade e previsibilidade. Segundo HAMMONS, 2007 *apud* Neto, 2011 o potencial global de energia proveniente das marés é da ordem de 500 a 1000TW/h/ano, infelizmente poucos lugares no mundo possuem uma amplitude de maré significativa o suficiente para ser viável. Quanto às desvantagens, está o fato dos locais com condições potencialmente viáveis serem limitados e espalhados ao redor do mundo. (HARDISTY, 2009).

Esta dissertação à nível de mestrado objetiva produzir simulações hidrodinâmicas do estuário do rio Guamá e identificar as áreas com potencial energético consideráveis.

Questionamentos:

- O SiSBaHiA rodou de forma satisfatória no estuário do rio Guamá?
- Os padrões de correntes e níveis da altura das marés do estuário reais estão próximos do modelo hidrodinâmico nas diferentes fases da maré?
- A batimetria e o canal do estuário estão de acordo com a característica geomorfológica dele?
- O SISBAHIA é capaz de identificar locais com potencial energético por correntes de maré no estuário do rio Guamá?

## **2. Objetivos**

### **2.1 Geral**

- Analisar a circulação hidrodinâmica do estuário do rio Guamá identificando as áreas com potencial energético por correntes de macromaré

### **2.2 Específicos**

- Determinar as características morfológicas do estuário do rio Guamá;
- Simular cenários de circulação hidrodinâmica no estuário do rio Guamá nas marés de sizígia e quadratura e comparar as variações nos dois estágios de maré;
- Determinar a variação e a magnitude das correntes de maré durante estes períodos;
- Identificar as áreas com potencial energético por correntes de macromaré no estuário do rio Guamá.

### 3. Estuário

#### 3.1 Apresentação

A palavra estuário tem sua origem derivada do latim *aestuarium*, que significa maré ou onda abrupta de grande altura. A própria definição da palavra já faz jus a um ambiente extremamente dinâmico e mudanças constantes (Kjerfve *et al.*, 2012).

São vários os conceitos de estuários na literatura. Isso denota a diversidade do perfil dos pesquisadores, bem como a interdisciplinaridade do objeto de estudo, além de sua importância. Estuário pode ser definido como um corpo d'água confinado na costa que tem ligação livre com o mar, que se estende ao longo do baixo curso de rio e sofre influência de maré. É uma região de encontro da água do mar com água proveniente da descarga fluvial advinda da drenagem do interior das terras. (DYER, 1997).

O estuário pode ser definido de várias maneiras, dentre as mais comumente adotadas na oceanografia física é a clássica definição de Pritchard (1955) e Cameron e Pritchard (1963):

*“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela drenagem continental”.*

Na definição acima, está implícito que a circulação, os processos de mistura e a estratificação de salinidade no estuário dependem, de sua geometria, da descarga de água doce, da maré, da salinidade, da circulação oceânica adjacente, do vento que atua sobre a superfície livre (Miranda, et al., 2012).

Ainda sobre a definição clássica, as fronteiras do estuário limitam sua dimensão e condicionam de forma decisiva o tipo de circulação. A distribuição dos gradientes de densidade é, também, responsável pelas características químicas e biológicas próprias dos estuários (Miranda, et al., 2012).

Kjerfve (1987) considerou principalmente o gradiente de salinidade e a maré dinâmica:

*“Sistema estuarino é um ambiente costeiro com conexão restrita com o oceano adjacente. Tal conexão permanece aberta pelo menos intermitentemente. Esse ambiente pode ser dividido em três zonas:*

*I. Zona de maré de rio (ZR): setor fluvial com salinidade menor que 1, porém ainda sujeito à interferência da maré;*

*II. Zona de Mistura (ZM): onde ocorre a mistura da drenagem continental com água do mar;*

*III. Zona Costeira (ZC): corresponde à região adjacente a costa, delimitada pela pluma de maré vazante”.*

Os limites entre as “zonas” acima são dinâmicos e variam em diferentes escalas de tempo (períodos da maré, sazonal, anual e de longo período) como resposta à intensidade das forçantes: descarga fluvial, altura da maré, vento e circulação da região costeira próxima (Bérgamo, 2000; Miranda, 2012).

A definição de Kjerfve abrange todos os segmentos do sistema estuarino e a zona costeira, a qual assinala a região adjacente à desembocadura do rio que está sob influência da massa de água estuarina. Em situação de grande descarga fluvial, pode apresentar estratificação de salinidade semelhante à da zona de mistura. A ZR e ZM correspondem ao estuário da definição clássica (Bérgamo, 2000; Miranda, 2012).

Porém, a definição de estuário mais adequada é uma adaptação da definição clássica de Pritchard sugerida por DYER, 1997, conforme parafraseada acima, que inclui a ZR, setor do rio ainda influenciado pelo movimento unidirecional estuário acima e abaixo durante o ciclo de maré (Miranda, 2012):

*“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite de influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é diluída pela água doce oriunda da drenagem continental”.*

Estuários estão localizados em diversas partes do globo e são frequentemente encontrados nas planícies costeiras de médias latitudes. Os movimentos nesses ambientes são consequências da oscilação do nível do mar, da descarga de água doce, do gradiente de pressão devido à influência de salinidade, do vento agindo sobre a superfície livre e da circulação hidrodinâmica na plataforma continental adjacente. O estuário é subdividido em três setores:

- a) Baixo estuário ou estuário inferior, no qual tem livre comunicação com o oceano aberto;
- b) Estuário médio, onde ocorre a mistura da água do mar com a água do rio;
- c) Estuário superior, ou estuário fluvial, formado por água doce, porém recebe influência diariamente da maré.

### **3.1.1 Classificação estuarina de acordo com a circulação das águas**

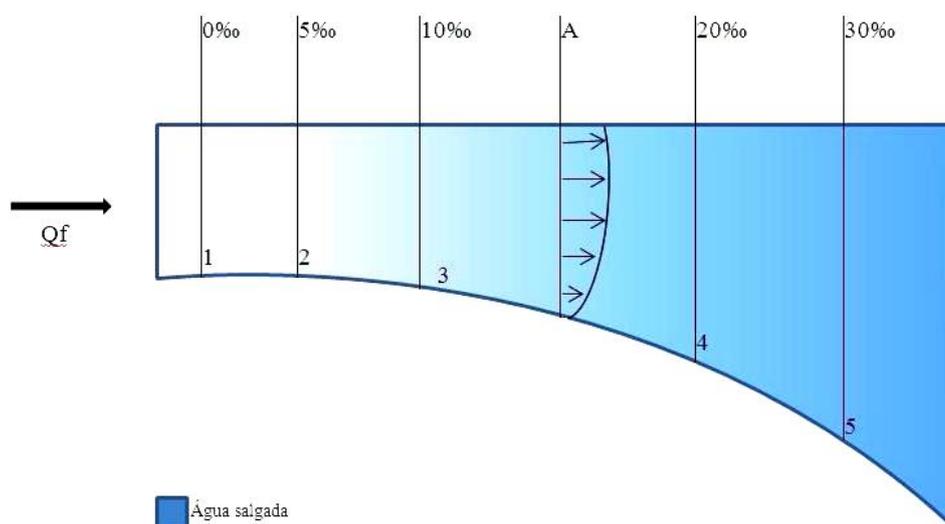
Todos os tipos de estuários apresentam diversos tipos de circulação de águas, visto que é um ambiente de transição entre oceano e continente e além disso, sofrem influência das marés, ondas, ventos e da descarga fluvial (CUNHA, 2005). O estuário pode ser subdividido em três zonas.

Na zona estuarina fluvial, onde a salinidade das águas é sempre menor (menor que 1), mesmo assim pode-se observar a influência da maré; na zona estuarina (salinidade varia entre 1 e 35), nesta área é onde, pode-se perceber a maior turbidez; na zona estuarina costeira, em que a salinidade coincide com a salinidade oceânica

Diversos critérios são usados para classificar os estuários, uma das formas de classificar os estuários, a exemplo é pela sua topografia, a morfologia, a maré, outra forma de classificar é basear-se na estrutura salina adaptada de Dyer (1997).

### 3.1.2 Estuário bem misturado

O estuário pode ser bem misturado, neste caso a salinidade das águas superficiais é igual à salinidade das águas do fundo. Assim, a salinidade só varia horizontalmente, sendo maior na região onde sofre a influência oceânica e menor em direção de continente(Figura 2).



**Figura 2 - Esquema simplificado de um estuário bem misturado.**  
A – Perfil de velocidade média; 1, 2, 3, 4, 5 – Isohalinas; Qf – Vazão fluvial(Amaral, 2003).

### 3.1.3 Estuário parcialmente misturado

Quando a salinidade aumenta de maneira gradativa, em ambas as escalas verticais e horizontais, o estuário se torna parcialmente misturado. Esse aumento gradativo não permite identificar fisicamente a cunha salina. Neste tipo de estuário a amplitude de maré é maior (Figura 3).

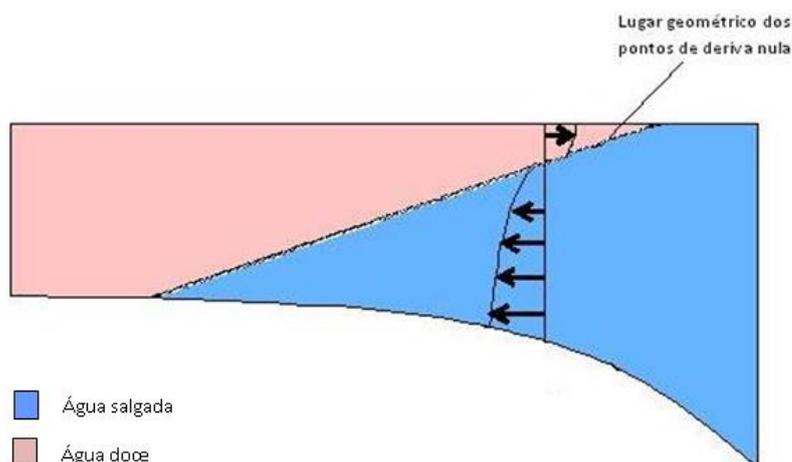


Figura 3 - Esquema simplificado de um estuário parcialmente misturado (Amaral, 2003).

### 3.1.4 Estuário altamente estratificado

No estuário altamente estratificado de cunha salina, as águas de superfície têm uma salinidade muito menor que as águas de fundo. Não há movimentação da cunha salina além de não haver mistura de água salgada e doce (Figura 4).

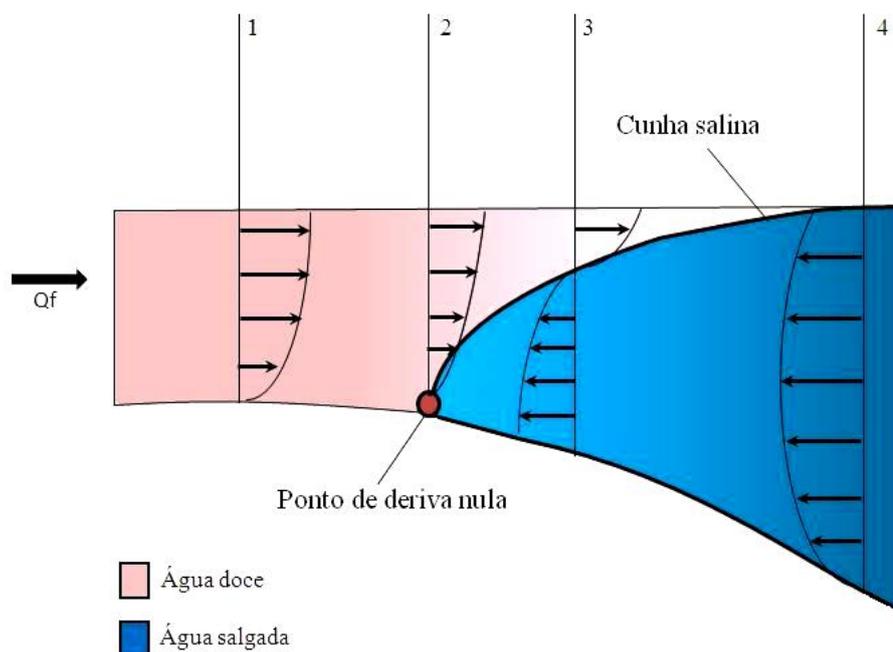


Figura 4 - Esquema simplificado de um estuário altamente estratificado. 1, 2, 3, 4 – perfis de velocidade média;  $Q_f$  – Vazão fluvial (Amaral, 2003).

Um estuário parcialmente misturado, por exemplo, devido à grande precipitação, pode vir a tornar-se altamente estratificado. Um estuário pode apresentar diversos tipos de estratificação simultaneamente nas suas águas (Patchineelam, 2000).

Os processos biológico, químicos e geológicos são influenciados por variáveis físicas que acontecem no estuário. Por conta disso, é relevante desenvolver um estudo interdisciplinar visto a complexidade que envolve os processos em estuários.

### **3.2 Classificação Geomorfológica de Estuários**

Os estuários podem ser classificados pela sua geomorfologia como, de planície costeira, “fiordes”, rias, construídos por barras e delta. (PRITCHARD, 1952; MIRANDA et al., 2002)

#### **3.2.3 Estuário de Planície Costeira**

Os estuários de planície costeira são localizados em regiões tropicais e subtropicais. Eles são comuns na costa Leste da América do Norte assim como no Brasil. Neste tipo de estuário a razão de largura/profundidade é grande, portanto é raso. O transporte de sedimento em suspensão é grande em estuários, alimentados por rios meandrantés. (MIRANDA;CASTRO; KJERVE;2002).

#### **3.2.4 Fiordes**

Os fiordes ocorrem em altitudes altas como Alaska, Noruega, Chile, Nova Zelândia, etc. As trocas das águas nos fiordes com o oceano adjacente são restringidas pelas soleiras, o que pode ocasionar condições anóxicas e adversas às camadas biológicas nas zonas mais profundas durante o verão. Durante esta época, a estabilidade vertical da coluna de água se torna mais intensa. Neste tipo de estuário, em comparação com os estuários de planície costeira, a razão largura/profundidade é relativamente pequena e sua seção é aproximadamente retangular. Geralmente, a descarga fluvial é pequena em relação ao volume do sistema, embora possa ser grande ao prisma de maré. Durante o período de inverno a descarga fluvial é presente nestes tipos de estuários (MIRANDA; CASTRO; KJERVE; 2002).

#### **3.2.3 Estuário construído por Barra**

Os estuários construídos por barra formam-se em regiões tropicais, e são conhecidos como estuarino-lagunares. As profundidades destes estuários não são superiores a 20-30 m. Podem se apresentar, no seu interior, lagunas e canais extensos. Devido ao fato do rio ou sistema de rios que deságuam nesse estuário, a descarga torna-se variável em função da estação do ano, conseqüentemente pode haver um grande transporte de concentração de sedimento em suspensão. Ocorrem alterações sazonais na geometria de entrada destes estuários, por exemplo a formação de barras.

Segundo Silva (1998), a entrada de água doce é pequena, sendo característica de áreas influenciadas por micromaré. Dependendo da magnitude da variação sazonal da entrada de água, estes estuários podem ser estratificados a bem misturados. Os ventos desempenham um papel importante no processo de mistura, isso se dá devido à baixa profundidade do estuário.

## 4. Caracterização do estuário do rio Guamá

### 4.1 Localização da área de investigação

O estuário do rio Guamá está localizado entre os municípios de Belém ( $1^{\circ} 27' 21''$  S e  $48^{\circ} 30' 14''$  W) e São Miguel do Guamá ( $1^{\circ} 37' 37''$  S e  $47^{\circ} 28' 58''$  W) (Figura 5). Este estuário faz parte da bacia do rio Guamá e é afluente do rio Pará, a sua nascente está situada às proximidades de Ourém, em sua margem direita. Segue para o Oeste, encontrando-se com o rio Capim.

Este estuário se localiza no domínio que define o limite NE da Amazônia, na subárea da parte alta do rio Capim na região Bragantina, que corresponde à célula espacial número 20 na setorização de acordo com Ab'Saber (1994).

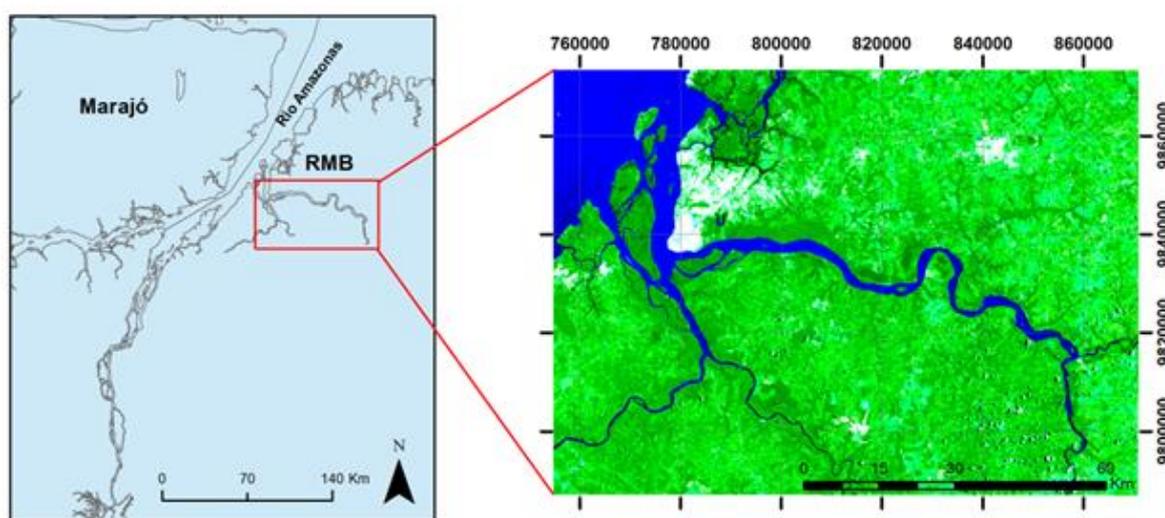


Figura 5 - Área de localização do estuário do rio Guamá. Fonte: LANDSAT 2014.

### 4.2 Geomorfologias do estuário do rio Guamá

O estuário do rio Guamá por ser um rio que possui meandros obedece as Leis de Fargue, as quais descrevem a sua morfologia. A morfologia fluvial é o ramo da hidráulica fluvial que estuda a formação, evolução e estabilização dos cursos d'água naturais produzida pelo escoamento. Várias leis regem essa evolução, dentre elas destaca-se Leis de Louis Jérôme Fargue, que são leis fundamentadas nas curvas; Leis de Girardon, leis fundamentadas nas leis naturais; Leis de Guiglielmini as quais são fundamentadas na declividade, dentre outras. Alguns princípios das leis de Fargue serão brevemente explicados.

As leis de Fargue, sendo este considerado o “pai da Engenharia Fluvial” são essenciais para o desenvolvimento de projetos e execução de obras de melhoramentos em rios, de modo que as viabilidades técnica, econômica, financeira, jurídica, social, política e ambiental sejam atendidas. São 7 (sete) as leis de Fargue: Lei dos Afastamentos; Lei das fossas (Sorvedouro) ou da maior profundidade; Lei dos desenvolvimentos; Lei do ângulo, ou da curvatura média; Lei da continuidade; Lei da declividade (inclinação) de fundo e a Lei do Talvegue.

A primeira lei é chamada Lei dos Afastamentos. Nesta lei, as profundidades máximas das fossas (sorvedouros) na margem côncava e mínimas (soleiras), correspondentes aos vértices das curvas, e os pontos de inflexão acham-se afastados desses pontos para jusante, de aproximadamente  $0,25 B$ , sendo  $B$  a largura da seção, por efeito da inércia. Verifica-se que as profundidades variam com a curvatura (diretamente).

A segunda é a Lei das fossas (sorvedouro) ou da maior profundidade, neste caso, a profundidade de uma fossa, é tanto maior quanto maior a curvatura no vértice da curva [talvegue ( $1/R$ )] correspondente (maior efeito erosivo). Verificou-se que os comprimentos das curvas variam, e assim, também, variam as profundidades médias.

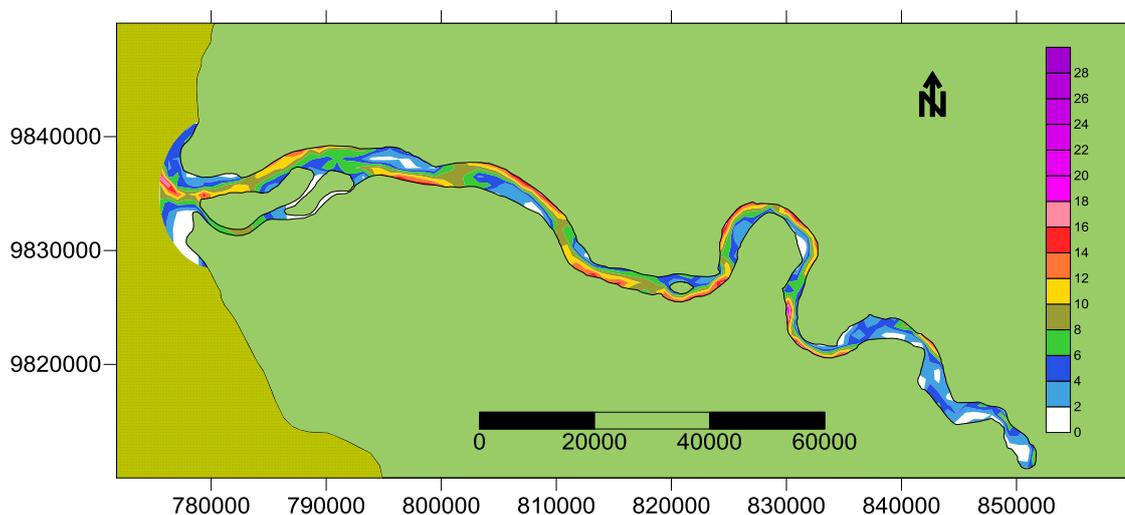
A Lei dos desenvolvimentos (terceira lei), diz que a curva não deve ser nem muito curta (raio pequeno) nem muito longa (raio grande). Na primeira a profundidade  $H$  deverá ser elevada (canal fundo), na 2ª  $H$  deverá ser raso (canal de assoreamento).

A Lei do ângulo dita que para comprimentos iguais, a profundidade média do estirão ou curva é tanto maior quanto mais aberto for o ângulo das duas tangentes extremas da curva. E a Lei da continuidade enuncia que o perfil de fundo de um curso é regular quando há uma variação contínua da curvatura, e por consequência, toda mudança brusca de curvatura produz uma redução brusca de profundidade.

A Lei da declividade (inclinação) de fundo diz que se a curvatura varia de uma maneira contínua, a inclinação da tangente a curva das curvaturas determina, em qualquer ponto, a declividade do fundo, isto é, a variação da curvatura é proporcional à variação da declividade de fundo. E por fim, a Lei do Talvegue que define a linha de máxima profundidade (talvegue) ao longo do curso d'água tende a se aproximar da margem côncava e o material ali escavado se deposita na margem convexa.

A figura 6 mostra que as partes mais profundas do rio (talveg) são observadas na parte côncava do canal e a parte mais assoreada coincide com o lado oposto da curva, isto nos mostra que o estuário está de acordo com as teorias de Louis Jérôme Fargue (1827 – 1910). O estuário é meandrante no trecho entre São Miguel do Guamá e Bujaru, a partir daí ele fica menos meandrante. O estuário leva mais tempo na sua vazante do que em sua enchente. Isso

se dá ao fato do rio ter uma maior resistência na sua vazante devida às correntes de maré na Baía de Guajará que estão perpendicular em relação a corrente de maré no estuário do rio Guamá gerando um efeito de barragem.



**Figura 6 - Mapa batimétrico do estuário do rio Guamá no trecho de Belém até São Miguel do Guamá na confluência com rio Capim.**

O rio Guamá tem suas cabeceiras numa extensa e contínua área de platô (Formação Barreiras), seguindo através de trechos de chapadas formadas por rochas do Paleozóico e Cenozóico, até alcançar a planície sedimentar de inundação (Quaternário), onde este se alarga (TORRES, 2007). A região do município de Peixe-Boi é banhado por um rio homônimo, onde existe um alto estrutural que se estende entre o rio Capim e seu afluente da margem direita, o rio Surubim. Esta área está recoberta pelos sedimentos da Formação Itapecuru, a qual se mostra levemente arqueada e fraturada no sentido NW–NE, o que determina o direcionamento dos rios desta região. (SECTAM, 2006).

## 4.3 Clima e parâmetros meteorológicos

### 4.3.1 Precipitação

A precipitação na região apresenta um comportamento típico de áreas tropicais de alta pluviosidade, com uma estação chuvosa correspondendo aos meses de dezembro a maio e uma estação seca ou menos chuvosa ocorrendo nos meses de junho a novembro; o mês de maior precipitação é março, seguido de abril, e o de menor precipitação é o de novembro, seguido de outubro. (MONTEIRO, 2009). Lima; Santos (2001) consideram a área como estuarina atípica, por serem registradas baixas salinidades, mesmo em períodos de menor intensidade pluviométrica, quando ocorre com mais intensidade penetração das águas oceânicas do Atlântico.

Segundo Moraes (2005), a precipitação total anual do rio Guamá estava entre 2.400 e 3.330 ml, cuja distribuição variou consideravelmente ao longo deste ano, quando a precipitação média total é 1.657 ml, com média de 487 ml. No ano de 2014 os seguintes dados pluviométricos foram registrados para o período de janeiro a dezembro no estuário do rio Guamá (Estação Bujaru, código: 00148017). O mês de maior média pluviométrica é abril e o de menor média é agosto (Figura 7).

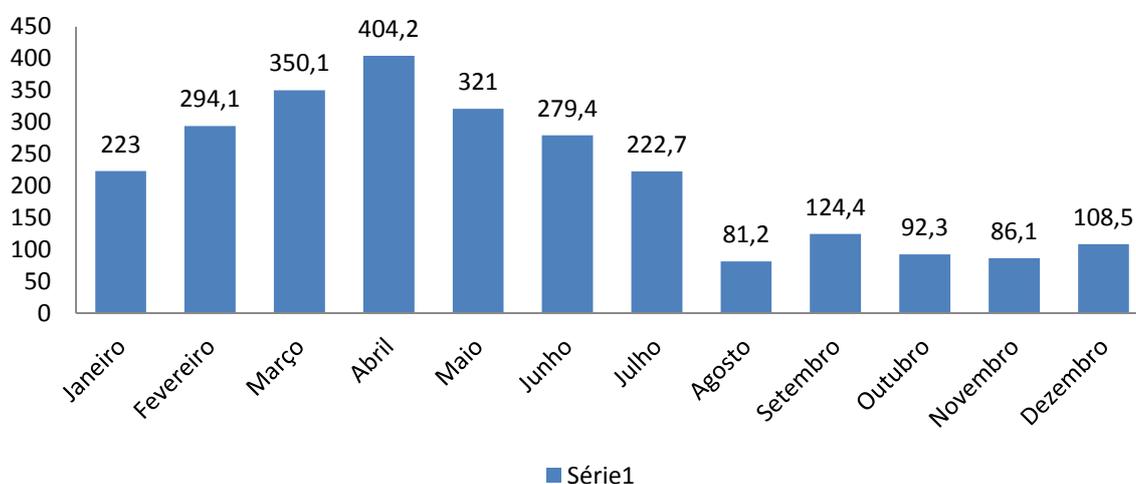
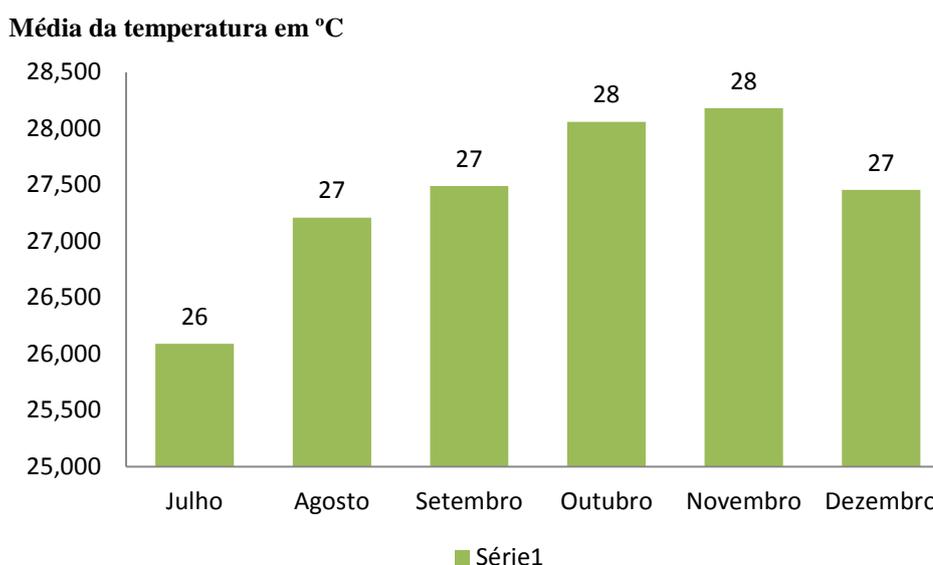


Figura 7 - Média pluviométrica mensal em mm. (ANA, 2014)

### 4.3.2 Temperatura do ar

Os dados relativos de temperatura foram obtidos em registro na estação meteorológica do Instituto de Geociências (UFPA) no ano de 2015, de acordo com os dados obtidos na estação a maior temperatura medida entre os meses de julho a dezembro de 2015 foi no mês de novembro aonde esta chegou a 28° C (Figura 8).



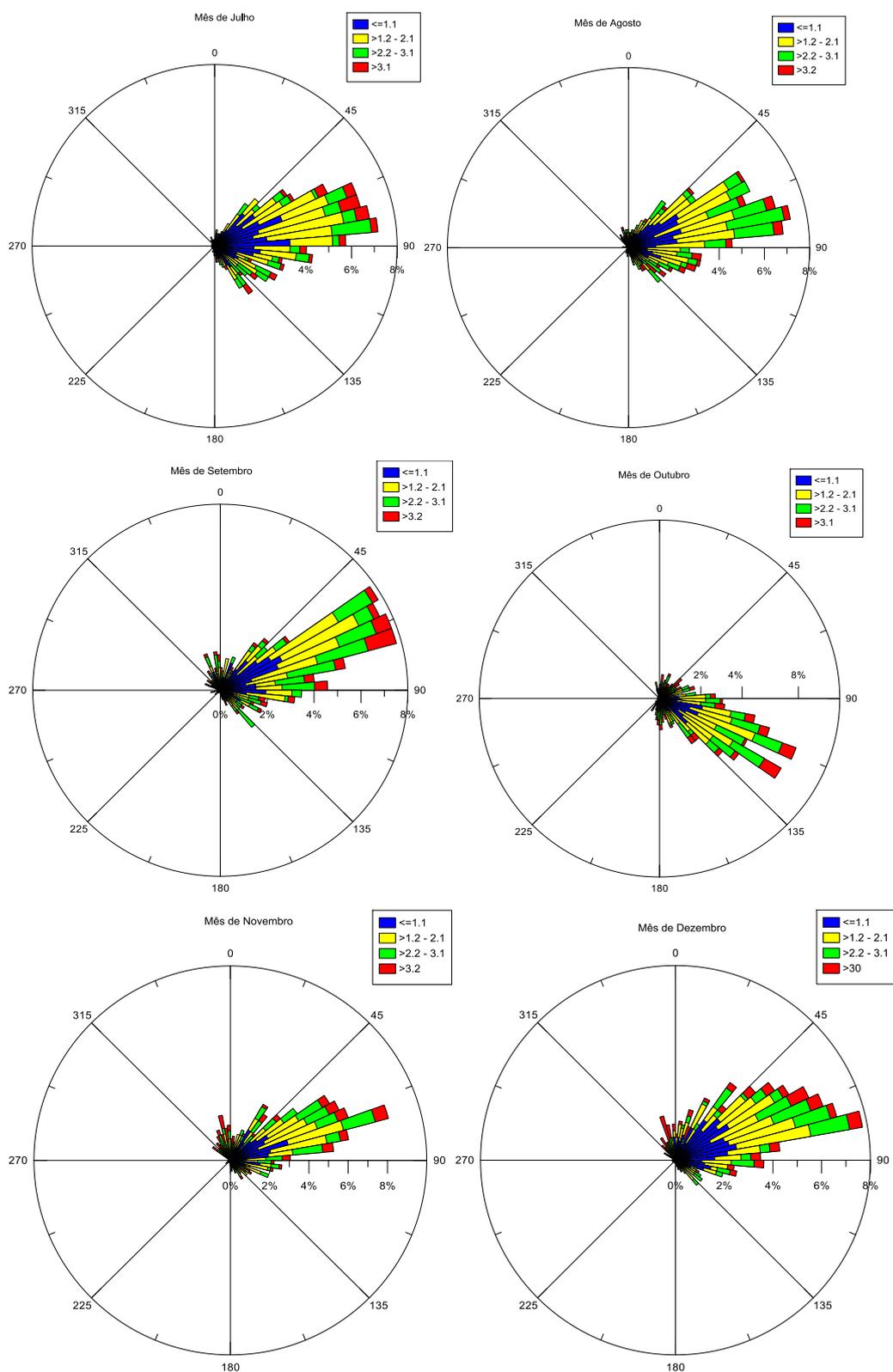
**Figura 8 - Dados de temperatura (UFPA, 2015).**

### 4.3.3 Ventos

Os ventos são formados pelo aquecimento irregular da atmosfera, visto que os raios solares não incidem uniformemente na superfície terrestre e em virtude da não uniformidade da orientação dos raios solares e dos movimentos da terra (SOUZA, 2006). Eles desempenham na região, uma força que não contribui de forma tão relevante no modelo hidrodinâmico.

Na Zona Costeira entre o Oiapoque (Amapá) e o Cabo de São Roque (Rio Grande do Norte), os ventos são controlados primariamente pelos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas (AMARANTE et al., 2001).

Os dados relativos a velocidade e direção do vento foram obtidos em registro na estação meteorológica do Instituto de Geociências (UFPA) no ano de 2015, de acordo com os dados obtidos na estação. Os dados relacionados aos dados de vento foram coletados a partir de julho a dezembro de 2015 (Figura 29). A média do vento observada neste período foi de 1.50 m/s.



**Figura 9 - Dados de vento de julho a dezembro/2015 (Fonte: Estação meteorológica do Instituto de Geociências, UFPA)**

#### 4.4 Hidrologia

De acordo com ANA (2014), o rio Guamá pertence à bacia amazônica e faz parte da sub-bacia 31. A área que é drenada pela sua bacia é de 87.389,54 km<sup>2</sup> quase 7% da área do estado do Pará e abrange vários municípios: Goianésia do Pará, Rondon do Pará, Paragominas, Tailândia, Breu-Branco, Tomé-Açu, Belém e Ipixuna do Pará. Os principais rios da bacia 31 são Moju, Acará, Guamá e Capim, com regime perene.

Segundo Paiva (2006), a foz do rio Guamá, recebe constantes injeções de sedimentos da baía do Guajará e sofre influência das marés. Dentre os seus principais afluentes, estão os rios Acará, Capim e Moju, o Cuxiú cruza o município de Garrafão do Norte, além dos igarapés Jipuúba, Tucumã, Paixão, Mamorana e Araçarana. O rio Irituia, afluente da margem esquerda do rio Guamá, que tem a direção sul-norte, pela margem direita, possui como outros afluentes, os igarapés Borges, Itabocal, Açu-de-Cima, Açu-de-Baixo, Patauteua, Ajará, Puraquequara e Peripindeua, que serve de limite entre os municípios de Irituia e Mãe do Rio. Destaca-se ainda o rio Caeté, com início na foz do rio Grande, em Ourém. (TORRES, 2007).

O rio Guamá nasce em cotas menores de 100 m, percorrendo aproximadamente 400 km, até lançar suas águas na Baía de Guajará, próximo a Belém. Além da capital do Pará, localizam-se às suas margens as cidades de Bujaru, São Domingos do Capim, São Miguel do Guamá e Ourém, todas elas sedes de municípios. A foz do rio Guamá juntamente com a foz do rio Acará forma a Baía de Guajará, com 900 m de largura de margem a margem (na parte direita do rio, Belém e à esquerda do rio, a ilha do Combú).

Em seus 55 km iniciais até a cidade de Bujaru, o rio Guamá apresenta conformação praticamente retilínea, com larguras variando de 2 a 5,5 km e profundidades variando respectivamente de 2,0 a 16 m. Nos 55 km seguintes até a cidade de São Domingos do Capim (km 110), observa-se uma sinuosidade suave no rio Guamá, com larguras variando de 1 a 2,5 km e profundidades mínimas da ordem de 1,6 m. Este rio é também dominado por marés semidiurnas.

O rio Guamá é navegável até os últimos 160 km do rio, entre a Baía do Guajará e o município de São Miguel do Guamá. Neste trecho a navegabilidade é possível em qualquer época do ano, na cidade de São Miguel do Guamá para embarcações com calados de até 2 m. A partir de São Miguel do Guamá, devido a afloramentos rochosos, até as primeiras corredeiras, próximo à cidade de Ourém, a navegação é impraticável. (AHIMOR, 2014).

O processo de modelagem leva em consideração tanto a influência fluvial (ciclo anual) quanto os ciclos lunares (sizígia e quadratura). A influência da maré é observada até São

Miguel do Guamá. Pode-se ver a influência da maré que oscila diariamente alterando o nível do rio. O rio Guamá é classificado como de “águas brancas”, isto é devido à grande quantidade de sedimentos em suspensão, que ocasiona águas pouco transparentes (SIOLI, 1964).

A hidrovia compreende o trecho que vai da sua foz na baía de Guajará, junto a Belém, até São Miguel do Guamá, com uma extensão de 70 km. Passando pela confluência do seu afluente de margem esquerda, o rio Capim, no km 110.

#### **4.5 Parâmetros oceanográficos**

##### **4.5.1 Maré: altura e correntes**

Nos estuários amazônicos, o regime de marés é considerado do tipo semi-diurno com subida e descida ocorrendo duas vezes ao dia. Nas quadraturas, o tempo de duração das marés enchente e vazante são aproximadamente iguais, enquanto que nas sizígias observam-se marés vazantes com duração de 8h e enchentes com apenas 5h (PINHEIRO, 1987).

A corrente de maré no estuário do rio Guamá no ano de 2009 foi predominantemente para o sentido noroeste durante o período de maré vazante, as correntes de maré atingiram velocidade máxima de 1,29 m/s em abril de 2010 (Wanderley, 2010), o que está em uma boa concordância com os resultados obtidos no modelo. Para a análise dos níveis de mar, foram utilizados dados do Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2011) (Tabela 6).

##### **4.5.2 - Ondas**

O rio Guamá apesar de ser um estuário dominado por regime de marés, as ondas, que segundo Leinze Amaral (1998) são o resultado da força de atrito do vento em contato com a superfície d'água, e tem sua contribuição para a hidrodinâmica do estuário, costuma-se haver ainda o fenômeno da pororoca (Pinheiro, 1987). As condições hidrodinâmicas sofrem variações anuais ligadas principalmente aos padrões sazonais de precipitação (Pinheiro, 1987), que influenciam fortemente as descargas fluviais.

## 5. Estudos de Modelagem Hidrodinâmica realizados na Bacia Amazônica

A bacia amazônica representa um dos maiores sistemas hidrológicos do mundo que drena aproximadamente 6 milhões de km<sup>2</sup> e contribui com 15% do volume de água doce afluente dos oceanos. (Molinieret al., 1996). Além disso, seus processos hidrológicos podem ter impactos em escalas tanto locais como globais (IPCC, 2007). De acordo com Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016) a maior parte da energia elétrica consumida no Brasil é de origem hidráulica e devido ao aproveitamento do potencial dos ainda pouco explorados rios amazônicos. São apresentados alguns trabalhos de modelagem hidrodinâmica realizados na região amazônica (Tabela 1).

**Tabela 1- Trabalhos de modelagem realizados na região amazônica**

Trabalhos	Área de estudo	Autor, ano	Título	Objetivo	Modelo
1	Lago Água Preta - Belém- Pa	Holanda, 2010	Modelagem hidrodinâmica e estudo morfológico do Lago Água Preta: um dos Mananciais da Grande Belém	Modelagem hidrodinâmica e morfológica do lago da Água Preta	Modeleur e Hydrosim
2	Ilha do Marajó - Pará	Nascimento, 2014	Aplicação de modelo hidrodinâmico 2dh em Canais de Maré da Costa Leste da ilha do Marajó – Pará	Calibração e validação do Modelo hidrodinâmico 2DH gerando simulação da hidrodinâmica e do transporte sedimentar para 1 ano	Sisbahia
3	Furo da Laura, rio Guajara-Mirim, Pará	Lopes, 2016	Modelagem hidrodinâmica 2DH no Furo da Laura Nordeste Paraense	Calibração e validação de um modelo hidrodinâmico, ponto de convergência	Sisbahia
4	Rio Maracanã, NE do Pará	Barbosa, 2007	Aplicação da modelagem hidrodinâmica na circulação do estuário do rio Maracanã (NE do Pará)	Circulação hidrodinâmica do estuário do rio Maracanã	Sisbahia

5	Baía de Guajará, Belém-Pa	Batista, 2005	Construção de um modelo de dispersão de poluentes na Baía do Guajará	Construção de um modelo hidrodinâmico com transporte de detritos na Baía do Guajará	Sisbahia
---	---------------------------	---------------	--	---	----------

Holanda (2010) utilizou as ferramentas computacionais e Modelleur Hydrosim, que foram desenvolvidos pelo Institut National de la Recherche Scientifique – Eau (INRS-Eau) na Universidade de Quebec para desenvolver o trabalho intitulado: “Modelagem hidrodinâmica e estudo morfológico do Lago Água Preta: um dos mananciais da Grande Belém”

O mesmo autor mostra as profundidades encontradas no lago nos anos de 1975 e 2009. Em 1975, o modelo demonstrou que a profundidade máxima do lago era de 5,60 m, entretanto, em 2009, ficou igual a 5,0 m, demonstrando o assoreamento do lago.

O modelo apresenta o padrão do escoamento simulado no lago Água Preta que foi satisfatório. As velocidades variam entre 0,00 e 0,33 m/s entre a adução do rio Guamá e a saída pelo canal de interligação, enquanto que na maior parte do lago a velocidade ficou próxima à zero. A velocidade máxima foi de 0,33 m/s na entrada do canal de interligação, a mudança de seção se dá por esse fator, a qual passa de uma maior área para uma menor, isto explica o perfil de velocidade encontrado nessa região.

Em 2013, Nascimento, em sua dissertação: “Aplicação de modelo hidrodinâmico 2DH em canais de maré da costa Leste da ilha do Marajó – Pará” com objetivo de ambientar, calibrar e validar o modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA® para aplicação em canais de maré na Amazônia. O referido autor aplicou o modelo 2DH em dois canais de maré da costa Leste da ilha do Marajó, o canal Andiroba (praia do Pesqueiro, Soure, Pará) e o canal Limão (Vila de Joanes, Salvaterra, Pará), gerando simulação da hidrodinâmica e do transporte sedimentar para o período de 1 ano. Foram gerados cenários com presença e ausência dos ventos com a finalidade de identificar a influência deles sobre a hidrodinâmica dos canais.

A malha para cada canal foi confeccionada através do programa Argus ONE Student®, utilizando-se da opção *quadmesh* para elementos quadrangulares. Durante a confecção da malha, considerou-se uma área maior que o canal principal, por se tratar de áreas de alagamento, o que não é o caso do rio Guamá visto que a área de alagamento é irrisória, se comparada com a área do domínio em questão.

No canal Andiroba a elevação e corrente de maré (Figura 15) apresentam uma defasagem aceitável quanto à medição real das variáveis tratadas, o que confirma a

confiabilidade do modelo. A medição foi feita em dois pontos chamados estações “Baía” e “Canal”.

O modelo hidrodinâmico do canal de maré Andiroba correspondeu aos padrões observados em campo o que reflete em bons resultados. Para o modelo de transporte sedimentar, os resultados foram razoáveis com a realidade do seu canal quando comparado com o modelo gerado. Mesmo com o resultado satisfatório, o levantamento altimétrico e a delimitação da área de manguezal associada ao canal, bem como as medições de correntes e elevação da maré nessas áreas, poderiam trazer mais consistência aos resultados. Entretanto, no canal de maré Limão, o modelo hidrodinâmico não apresentou resultados satisfatórios, fazendo-se necessária uma revisão das condições de contorno e malha, para obter uma representação mais acurada e discretização da área modelada.

No Furo da Laura, no rio Guajara-Mirim, foi aplicado o modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA® simulando as condições hidrodinâmicas no domínio do furo, além de calibrar e validar o modelo para identificar as regiões de convergência barotrópica nos períodos seco e chuvoso (Lopes, 2016). O objetivo deste trabalho foi de alcançar com eficácia resultados dentro dos padrões estatísticos mínimos para aceitação do modelo. O Erro Quadrático Médio (EQM) do campo velocidade está dentro dos parâmetros aceitáveis de até 20% (Rosman 2015). Ainda, o modelo identificou o principal ponto de convergência.

Barbosa (2007) fez a modelagem do estuário do rio Maracanã (NE do Pará). Usando o SisBaHiA, objetivando a circulação do rio Maracanã. Em relação às marés, os dados medidos em campo e resultado do modelo mostraram boa correlação, com as maiores elevações ocorrendo no interior do estuário e a batimetria conforme observada tem maior profundidade na foz do estuário, aumentando à medida em direção a parte interna do estuário. O modelo estabeleceu bom resultado.

## **6. Geração de energia elétrica**

### **6.1 Apresentação**

A busca mundial por um método alternativo de geração de energia tem sido um desafio para todos os países, uma vez que o uso do combustível fóssil é uma fonte findável na natureza. As fontes de energia empregadas para a geração de eletricidade são agrupadas em duas categorias: fonte de energia renováveis, são aquelas que se renovam continuamente na natureza, tais como a energia eólica, solar, energia dos oceanos etc.; fontes de energia não renováveis, cujas reservas se esgotam por seu processo de formação serem mais lentos, tais como gás natural, petróleo, carvão combustíveis, nucleares, etc.

Segundo SOERENSEN e WEINSTEIN (2008) e KHAN e BHUYAN(2009) há cinco formas de energias oceânicas: de ondas que é extraída das ondas em superfície e subsuperfície; extraída das correntes marinhas através de dispositivos modulares; de maré, extraída tanto de sua componente cinética, através de turbinas, como da potencial, através de barragens; do gradiente de salinidade aproveita-se a energia osmótica da diferença de salinidade entre a água doce dos rios e a águas salgadas dos estuários; e do gradiente de temperatura, que utiliza o diferencial de temperatura entre as águas quentes superficiais e as geladas águas profundas.

Nesta dissertação, optou-se fazer uma abordagem apenas sobre as energias por correntes de marés, onde são discutidos princípios básicos desta tecnologia e a identificação das áreas com potencial energético considerável no estuário do rio Guamá.

### **6.2 Energia maremotriz**

A geração de energia elétrica a partir da energia cinética das marés é uma alternativa tecnológica relevante, uma vez que este fenômeno ocorre em todas as bacias oceânicas. As marés são basicamente geradas pelo Sol e pela Lua, estes causam uma oscilação vertical e periódica na superfície do mar que gera um emaranhado complexo de forças chamadas constituintes de maré. Em algumas regiões a oscilação das marés podem gerar correntes com grandes velocidades, contendo grandes quantidades de energia que pode ser aproveitada em muitas áreas, onde as configurações locais se somam às características da onda de maré, resultando, além de intensas correntes, em grandes variações de altura de maré. A Figura 10 mostra as regiões principais ao redor do mundo com maior potencial para a geração de energia pelas correntes de maré.

Esta tecnologia de fonte de energia renovável ainda em estado incipiente de desenvolvimento utiliza a energia procedente das marés. Consiste em transformar a energia

cinética oriunda da propagação contínua de ondas de maré astronômica em energia elétrica, utilizando conversores de energia hidrocínética (CEHs). Na prática, pode ser utilizada para obtenção de energia de qualquer corrente hidrodinâmica.

Existem duas formas principais de aproveitamento da energia potencial das marés: na vazante e enchente. Além disso, é possível a combinação de ambas as formas. Quando o processo de geração ocorre apenas durante a maré vazante ou enchente, é chamada de geração em efeito simples; quando ambas as formas são utilizadas, é chamada de geração em efeito duplo.

Os efeitos da construção e operação de uma usina maremotriz em um estuário devem ser cuidadosamente avaliados, além de suas alterações nas atividades humanas locais. Ainda que a exploração da energia maremotriz não produza nenhuma poluição direta ao meio-ambiente, pois a sua instalação pode modificar algumas características naturais do local.

Embora países como Egito, (Fahmy, 2010), Índia (Bernshtein, 1995), Rússia (Siong e Seng, 2008), Malásia (Rodríguez e Colômbia, 2005), Austrália (Hydro Tasmania Hydro Electric Corporation, 2010), Reino Unido (Couch e Dent, 2010) e Brasil (Lima, Saavedra, Barros e Camelo; 2003) e outros já apresentam propostas de estudos sobre a exploração da energia, mediante o uso de maremotriz. Existem poucos projetos de usinas maremotriz implementados no mundo.



**Figura 10 - Regiões do mundo com marés exploráveis. (Hammons, 1993).**

### 6.3 Tecnologias para geração de energia.

A maré pode ser explorada basicamente de duas formas para geração de energia. Uma delas é através da variação do nível de maré e a outra forma é por meio de correntes de maré. Em se tratando da variação do nível de maré, existem duas formas diferentes para a captação desta energia. (BOUD, GRAHAM et al., 2007): Lagoa de maré e barragem de maré.

A barragem de maré consiste na construção de uma estrutura que barre o fluxo de água na área, seja ele um estuário, um rio entre outros assim como uma grande hidrelétrica. (Figura 11). A lagoa de maré também consiste em uma estrutura sólida, mas esta não ocupa toda a extensão do estuário, somente parte dele. Sua construção pode ser *offshore* (Figura 12)

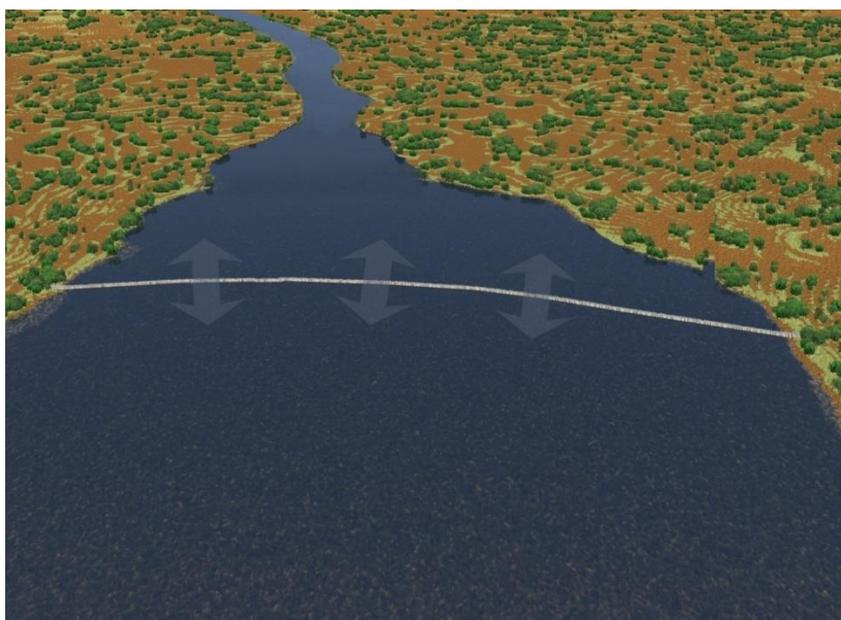


Figura 11 - Barragem de maré. Fonte: Aquaret (2012).



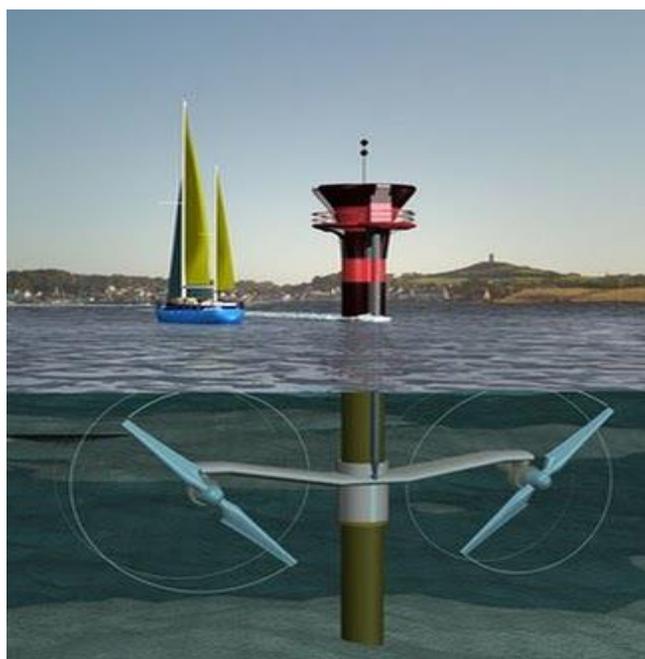
**Figura 12 - Lagoa de maré Offshore e junto à costa. Fonte: Aquaret (2012).**



**Figura 13 - Lagoa de maré Offshore e junto à costa. Fonte: Aquaret (2012).**

Em se tratando de exploração de energia de maré por meio de correntes de marés. A energia eólica e a energia das correntes de maré compartilham muitas similaridades (MYERS e BAHAJ, 2009). Devido a isso, algumas vantagens são notavelmente observadas quando se trata da água: a densidade da água do mar é cerca de 800 vezes maior do que a do ar, em se tratando de estuário há também uma diferença, além disso, as correntes de marés são altamente previsíveis—até 98% de certeza para um período de décadas, ao contrário dos ventos (Ben Elghali, 2007).

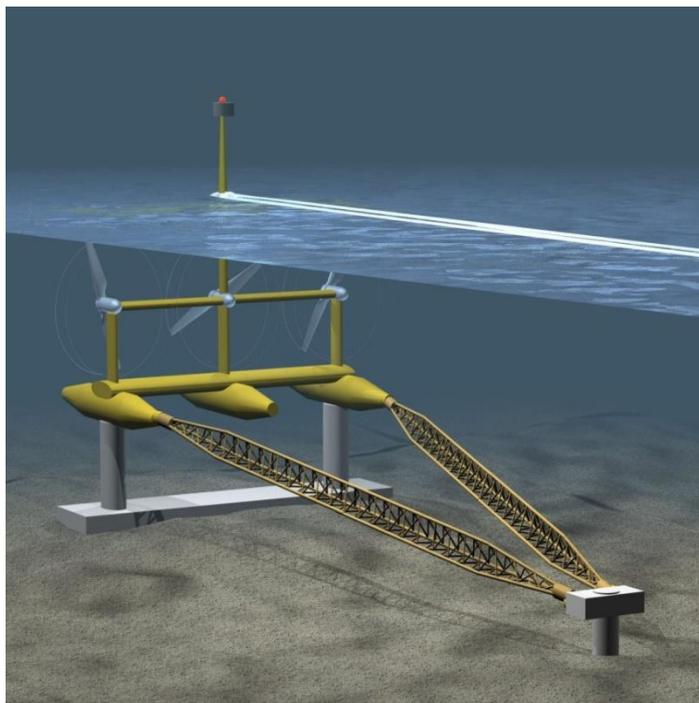
Em relação à tecnologia de exploração correntes de marés a Marine Current Turbines (MCT) tem desenvolvido duas turbinas diferentes: a SeaGen S e SeaGen U. A SeaGen S é uma estrutura composta por duas turbinas conectadas a uma viga que permite que elas sejam elevadas à superfície da água para manutenção (Figura 13 e 14). A SeaGen U difere daquele por ser um dispositivo desenvolvido para águas profundas( Figura 15 e 16). Esta tecnologia não possui uma viga que leva até a superfície da água e é fixado ao fundo submarino acoplado a um mecanismo articulado que permitirá a sua manutenção na superfície.



**Figura 14 - SeaGen S com turbinas submersas. Fonte: MCT (2017).**



**Figura 15 - SeaGen S com turbinas emersas. Fonte: MCT (2017).**



**Figura 16 - Esquema de SeaGen U. MCT (2017).**

## 7. Metodologia

### 7.1 Processos de modelagem hidrodinâmica em estuários

Modelar computacionalmente um corpo d'água é um processo bastante importante para analisar o comportamento do estuário o qual pode ser bastante complexo de acordo com as variáveis. O processo de modelagem antes do avanço tecnológico dos computadores era feito em métodos gráficos ou em modelos físicos ou analógicos. Hoje podem ser aperfeiçoadas técnicas descritivas (simulações) e normativas (otimização).

Os modelos de simulação geram a resposta de um sistema a uma quantidade de informações de entrada, que incluem regras de decisão, permitindo ao modelador examinar as consequências de diversos cenários de um sistema existente ou de um projeto a ser feito (LANNA, 1997). O processo de modelagem é representado pelo fluxograma que gera um relatório final o qual embasará as decisões a serem tomadas:

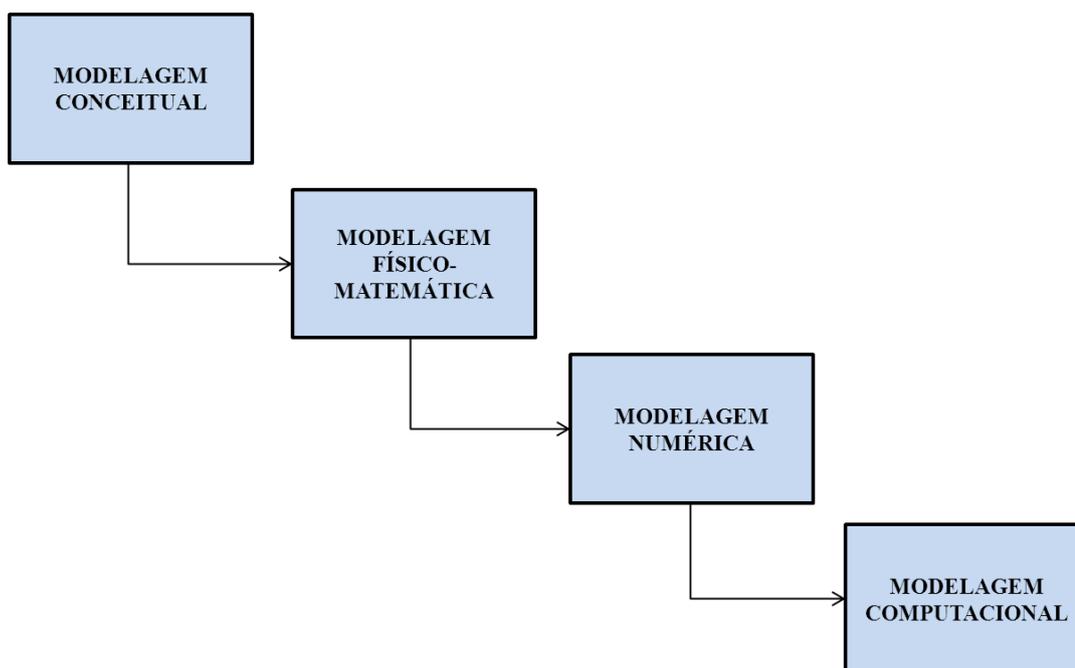


Figura 17 - Exemplos de passo para Modelagem Hidrodinâmica Computacional (ROSMAN et al., 2001).

A fim de entender melhor o processo de modelagem de recursos hídricos (Figura 17), são apresentados a seguir alguns conceitos (ROSMAN *et al.*, 2001).

#### Fenômenos de interesse

Os fenômenos de interesse estão ligados à quantidade e a qualidade da água, e em eventuais estudos também se trata dos sedimentos. Os fenômenos são os movimentos ou os transportes de substâncias e propriedades físicas e químicas nos corpos de água.

### **Observação e medição**

Inicialmente as observações de um dado fenômeno são qualitativas, visando propiciar um entendimento das causas, efeitos e agentes intervenientes. Em seguida, parte-se para observações quantitativas, fazendo-se medições das grandezas das causas, efeitos e agentes intervenientes inferidos na etapa de observação qualitativa. Daí, das observações e medições desenvolvem-se modelos conceptuais dos fenômenos de interesse.

### **Modelagem conceitual**

Concepção do fenômeno observado, a partir do conhecimento de suas causas e efeitos e as interações dos agentes intervenientes na sua ocorrência. A partir desse modelo conceptual existem duas opções: modelos matemático e físico.

### **Modelagem matemática**

Traduções do modelo conceitual escrito em linguagem matemática. Os diferentes modelos matemáticos são arranjos, incluindo um número maior ou menor de causas e efeitos, e de agentes intervenientes em diferentes formas. Para tanto há regras e princípios a serem seguidos. A modelagem matemática de um sistema hidrodinâmico, consiste no conjunto de equações que são capazes de representar os escoamentos naturais dos corpos d'água. As equações que representariam o fenômeno são muitas vezes não-lineares, e não possuem solução analítica conhecida. A fim de que seja possível a solução destas equações, utilizou-se a solução numérica, discretizando um domínio contínuo cujo resultado, apresentado em equações algébricas, pode ser obtido através de algoritmos computacionais (TOPAZIO, 2003).

A partir do modelo matemático, dependendo da possibilidade de resolvê-lo, quatro opções são possíveis. O modelo matemático será direcionado respectivamente aos modelos físico, numérico, analítico e analógico.

### **Modelagem numérica**

Nesta etapa há uma tradução de modelos matemáticos que são adaptados para vários métodos de cálculo.

### **Modelo analítico**

O modelo analítico é utilizado quando existem soluções gerais para situações bastante simplificadas e idealizadas. Entretanto, na maioria das situações práticas em recursos hídricos, não há uma solução geral conhecida. Nesta situação, resta recorrer aos modelos físicos e aos modelos numéricos.

### **Modelo analógico**

O modelo analógico é utilizado em situações muito peculiares e em geral de cunho mais acadêmico do que prático.

### **Modelo físico**

O modelo físico reproduz em escala reduzida os modelos conceituais do fenômeno de interesse, chamados de protótipos. Através de um modelo matemático, são definidas as escalas entre o protótipo e o modelo físico reduzido. Pode-se perceber isso ao verificar a rota ligando os modelos matemáticos aos modelos físicos (Figura 7).

### **Montagem, pré-processamento, definição de parâmetros e similares**

Nesta etapa, o modelo é preparado, e então os dados de entrada são organizados. Esta fase é comum para qualquer tipo de modelo, pois nela obtêm-se informações quantitativas do modelo conceitual e matemático.

### **Mapas, gráficos e tabelas**

Nesta etapa, o pré-processamento dos resultados quantitativos dos modelos são transformados em mapas, gráficos e tabelas. Recentemente, estão sendo apresentados também através de animações.

### **Calibração e Validação**

Durante a calibração e validação do processo de modelagem se verificam os resultados. Neste momento, têm-se duas possibilidades:

Se a validação realizada não confere com as observações e/ou medições, neste caso o modelo não está validado e então se inicia o processo de calibração efetivamente, com duas situações possíveis a serem escolhidas.

Comumente, a situação mais escolhida é a de levar a caixa do pré-processamento, o que corresponde ao procedimento usual de calibração via ajustes de montagem e de parâmetros, acertos de dados de entrada, e coeficientes em qualquer tipo de modelo. A situação menos escolhida, é a rota circular longa, a qual levará novamente para o modelo conceitual, que é seguida apenas no caso de repetidos insucessos de validação do modelo, depois de utilizada à rota curta.

Se a validação conferir com as observações e ou medições realizadas, então nesse caso, o modelo esta validado e o processo de modelagem termina na efetiva incorporação dos resultados do modelo ao acervo de informações a serem consideradas no processo de tomada de decisão.

### **Relatório para auxílio no processo de tomada de decisões**

O propósito da modelagem é gerar um resultado efetivo para produzir informações organizadas para auxiliar um processo de tomada de decisões, sejam para construções.

## **7.2 Importância da utilização dos modelos**

A necessidade da aplicação dos modelos para estudos, e auxílio à gestão de recursos hídricos é inquestionável. Os modelos hidrodinâmicos devem ser vistos como ferramentas para melhor entender os fenômenos, e para melhor tomada de decisão sobre alterações dos sistemas analisados. Os modelos são representações simplificadas de um mundo real. Os fenômenos muitas vezes são complexos, o que exige certa simplificação para dar início ao processo de modelagem. De acordo com ROSMAN (2001), visto que há uma grande complexidade dos corpos de água naturais, especialmente em reservatórios, lagos, estuários e zonas costeiras adjacentes às bacias hidrográficas, os modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente consegue-se uma visão dinâmica de processos nestes sistemas ambientais complexos.

Embora muitas vezes tenham altos custos para seu levantamento, o que os torna escassos, dados ambientais são necessários para realizar a gestão e gerenciamento de corpos d'água naturais. Por meio de modelos calibrados, podem-se reproduzir valores nos pontos onde foram feitas as medições, podendo-se interpolar temporal e espacialmente as informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos para toda a área de interesse, permitindo uma interpretação mais apurada das medições em pontos dispersos ou isolados, como por exemplo, fornecendo uma noção do trajeto das plumas de contaminantes (ROSMAN, 2001).

De acordo com ROSSO e ROSMAN (1995) a aplicação dos modelos numéricos para estimar padrões de circulação e transporte do fluido em corpos d'água costeiros é importante, tanto na definição e identificação das estratégias para o gerenciamento e operacionalização de programas com o cunho de monitoramento ambiental como no que se refere à sua contribuição na prevenção e avaliação de impactos ambientais.

## **7.3 Modelos de circulação hidrodinâmica**

As equações diferenciais que regem a dinâmica dos corpos d'água, não possuem solução analítica conhecida para os domínios e condições de contornos existentes, além de não serem lineares. É necessário substituir o modelo numérico, passando-os de um modelo contínuo para um modelo analítico para resolver a equação. Isto gerará equações algébricas que podem ser solucionadas por métodos computacionais.

De acordo com Rosman (1997), modelos hidrodinâmicos em fluido homogêneo determinam o padrão de correntes em corpos d'água com superfície livre, a exemplo de

baías, estuários, rios, lagos, reservatórios, etc. As propriedades do fluido podem ser medidos em campo (Bovee et al., 1998) além de previstos com métodos estatísticos, bem como avaliados com soluções analíticas (Brown e Pasternack, 2009) ou estimados com modelos hidrodinâmicos numéricos (Leclerc et al., 1995; Bates e Roo, 2000; Horritt e Bates, 2002; Pasternack et al., 2006; Tonina e Buffington, 2009; Daraio et al., 2010; Tonina et al., 2011.; Maturana et al., 2014.; McKean e Tonina, 2013). As características hidrodinâmicas são simuladas por modelos hidrodinâmicos unidimensional (1D) (Garcia et al., 2011) ou bidimensional (2D) (Leclerc et al., 1995), com modelagem tridimensional ainda rara e usada para casos especiais (Tonina e Jorde, 2013). Para os corpos d'água da região, os resultados apresentados pelo modelo 2DH, pois a profundidade é relativamente baixa nos estuários.

A discretização temporal ocorre implicitamente através de diferenças finitas. A discretização espacial é feita de forma preferencial por elementos finitos quadrangulares biquadráticos, podendo também ser feita por elementos finitos triangulares quadráticos ou ambos.

#### **7.4 Classificações dos modelos hidrodinâmicos**

Pode se aplicar três tipos de sistemas hidrodinâmicos, que varia de acordo com sua complexidade: modelo unidimensional, bidimensional e tridimensional. (ROSMAN 1997).

##### **Modelo unidimensional (1D)**

No modelo unidimensional (1D), considera-se o eixo X como eixo longitudinal que possui somente dimensões (x, t). O modelo unidimensional é aplicado a corpos d'água com seção transversal homogênea, onde não há níveis de estratificação.

##### **Modelo bidimensional (2D)**

O modelo bidimensional (2D) possui somente as dimensões (x,z,t), e pode ser classificado por dois tipos. Um cuja dimensão considerada é a vertical (2DV) e outro cuja dimensão é a horizontal (2DH). No modelo 2DV são consideradas as dimensões na vertical (x, y, t) enquanto que no modelo 2DH são consideradas as dimensões na horizontal (x, z, t).

##### **Modelo tridimensional (3D)**

No modelo tridimensional tem-se o modelo 3D e 3Dg, ou gerais. Esses modelos possuem todas as dimensões (x, y, z, t). O modelo 3Dg inclui forçantes barotrópicas e barocíclicas, esta situação se aplica em qualquer caso, pois estão incluídos os gradientes de intensidade. Isto não se aplica no modelo 3D, pois este possui uma hidrodinâmica mais simples excluindo gradientes de intensidade. Este modelo é aplicado a corpos d'água com coluna d'água homogênea ou pouco estratificada, com o objetivo de obter perfis verticais das variáveis.

Embora a tendência seja escolher o modelo tridimensional para ser usado na pesquisa, é importante saber que é requerido para sua utilização mais tempo para preparar o modelo, e o modelo 3D oferece resultados que podem ser obtidos com outros modelos.

Na presente dissertação é utilizado o Modelo Hidrodinâmico (2DH) e os softwares que fazem parte do processo de modelagem no SisBahia: Surfer, ArgusOne, Portanto, é correto afirmar que a modelagem hidrodinâmica deve ser entendida como a determinação da quantidade de movimento de uma dada massa d'água, resultando na definição dos padrões de correntes de maré.

### **7.5 Integralização dos dados**

Os dados coletados são necessários para a calibração do modelo, portanto, os valores que foram medidos na área, foram inseridos no SisBAHIA, para geração de modelos, reproduzindo virtualmente a realidade hidrodinâmica do estuário do rio Guamá. Os dados coletados são: batimetria, correntes e níveis de marés. A batimetria é fundamental na geração da grade do modelo e é um dos tópicos mais importantes na implementação do modelo sendo um fator determinante na qualidade dos resultados do trabalho. A geração da grade no modelo depende basicamente do conhecimento da batimetria do estuário do rio Guamá. Os dados de batimetria foram organizados em planilhas do Excel e digitalizados no Surfer versão 8, após ter feito isso, foi inserido no Sisbahia. Os dados decorrentes e nível de maré foram submetidos a rotinas de processamento em ambiente Excel; os dados de correntes de maré foram organizados de forma que as velocidades obtidas fossem consideradas coerentes com a realidade, dos dados marégraficos, entretanto, a variação de maré é importante e considerou-se um nível relativo.

Os resultados hidrodinâmicos foram gerados em mapas e podem ser visualizados no programa Surfer. Para melhor análise dos resultados, cada mapa foi dividido em três áreas (área1, área 2, área 3), onde pode-se observar tanto os resultados de elevação como os de velocidade. Em se tratando dos resultados dos locais com potencial energético, os locais foram identificados a partir da divisão dessas áreas explicadas neste parágrafo.

### **7.6 Características da malha adotada**

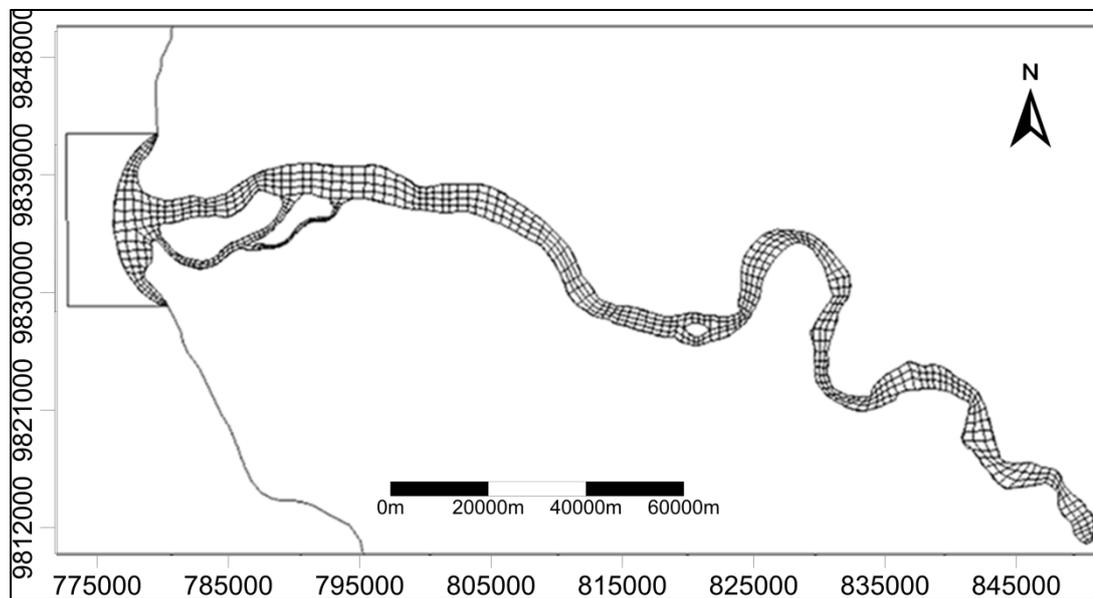
A malha para cada canal foi confeccionada através do ArgusOne® (figura 18), utilizando-se a opção *quadmesh* para elementos quadrangulares (Figura 21). Durante a confecção da malha, considerou-se a área que compreende o domínio a ser trabalhado, visto que não se trata de uma área onde há grande alagamento. A malha utilizada no estuário do rio Guamá possui 807 elementos quadrangulares, com 3.756 nós totais, possuindo 537

elementos na fronteira e 270 elementos internos, com o total de 1.070 nós, 530 nas fronteiras e 540 internos, com uma distância média entre nós de 900 m, possuindo uma área total da malha de 190.920.095.549 m<sup>2</sup>(tabela 2).

Cada elemento da malha quadrangular é composto por 9 nós, os quais conectam os elementos entre si (Figura 19).O modelo hidrodinâmico 2DH determinará as velocidades médias e a elevação da superfície para cada nó do domínio discretizado. Para tanto, o modelo solicita a batimetria (Figura 20) e a rugosidade do fundo para cada nó, os quais são obtidos através da interpolação dos dados medidos em campo com os nós da malha.

**Tabela 2 - Informações sobre as malhas de elementos quadrangulares utilizadas no estuário do rio Guamá.**

Estuário do rio Guamá	
Número de elementos	807
Número de nós	3.756
Distância média entre nós	1.000 m
Área da malha	190.920.095.549 m <sup>2</sup>



**Figura 18 - Malha do estuário do rio Guamá confeccionada no ArgusOne.**

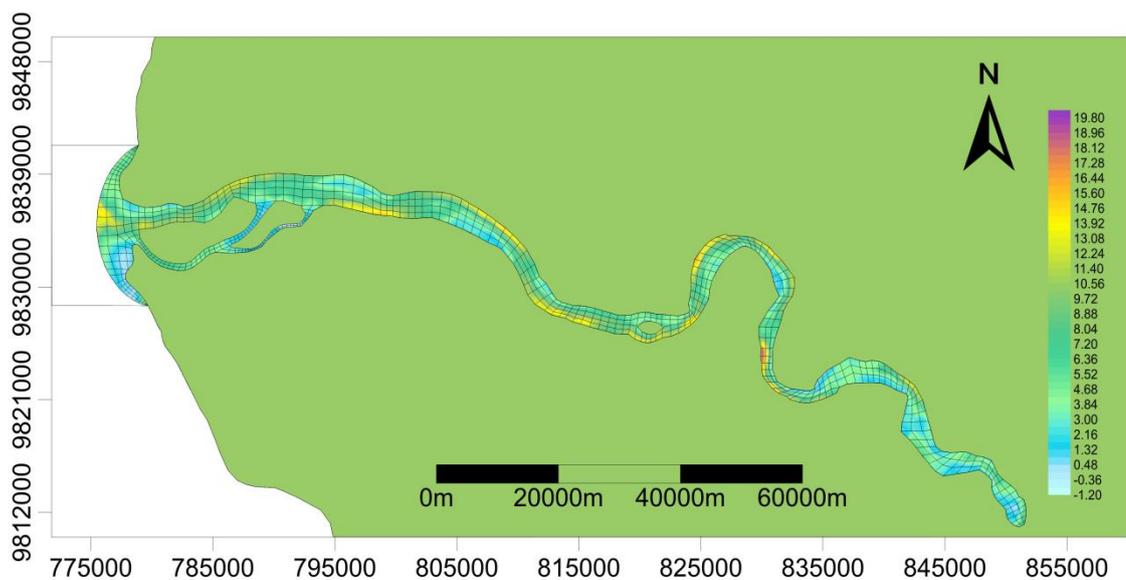


Figura 19 - Malha do estuário do rio Guamá gerada no Surfer e exportada para o Sisbahia.

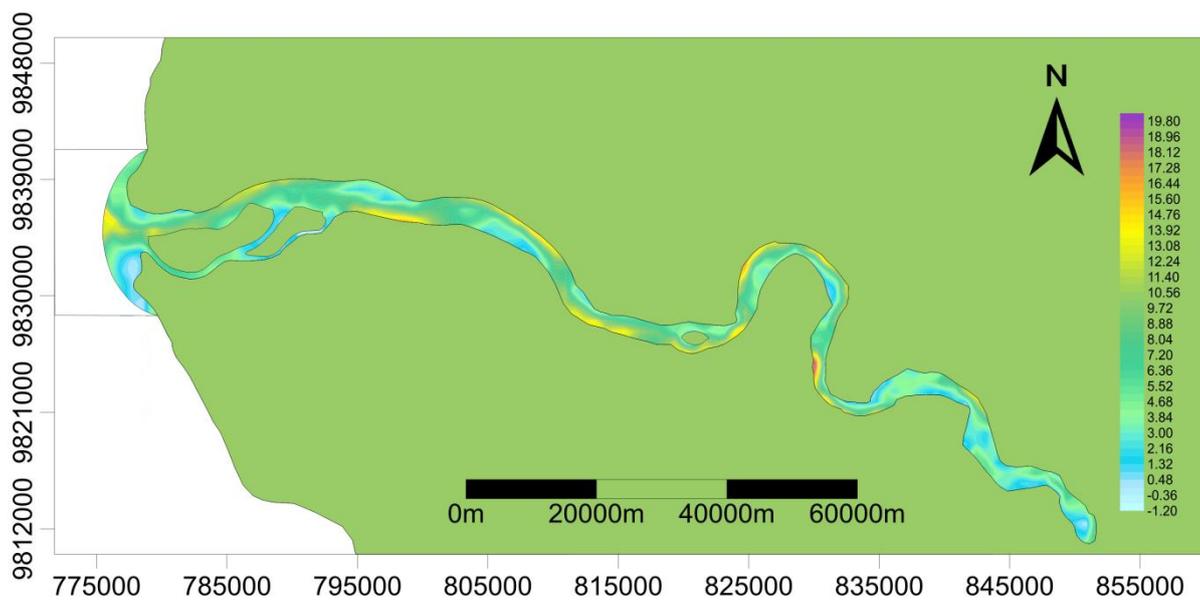


Figura 20 - Batimetria do estuário do rio Guamá gerada no Surfer e exportada para o Sisbahia.

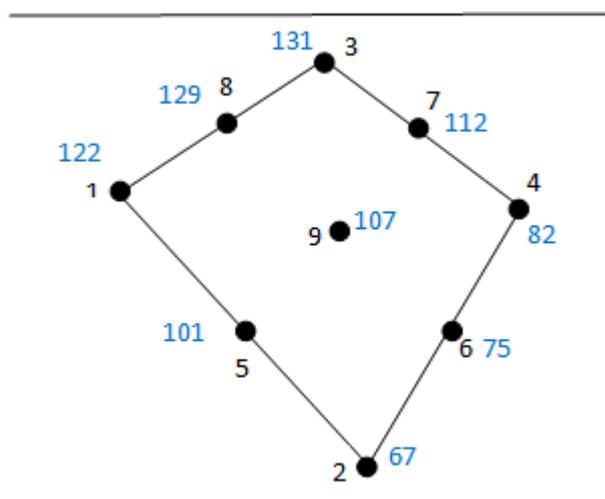


Figura 21- Exemplo da distribuição dos 9 nós de conectividade de um elemento quadrangular. Os números em azul indicam o número dos nós na malha, enquanto que a numeração em preto representa a localização dos nós no elemento.

### 7.7 Cálculo da densidade energética.

A energia das correntes de maré é gerada pelo movimento das águas nas marés de enchente e vazante. A velocidade das correntes de maré no estuário pode ser intensificada em regiões onde ocorre a diminuição da seção por onde o fluxo passa, como a diminuição da largura de um canal. Em regiões de grandes variações de altura de maré é natural que se tenham velocidades maiores do que em regiões de menores variações, uma vez que um maior volume de água será movido no mesmo espaço de tempo. Pode-se calcular a densidade energética partir de dados de velocidade superficiais de pico (HAGERMAN, POLAGYE et al., 2006).

A densidade energética instantânea, ou o potencial extraível, se dá pela equação 1 (HAGERMAN, POLAGYE et al., 2006):

$$\left(\frac{P}{A}\right) = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (\text{equação 1})$$

Onde  $P$  é a potência,  $A$  é área transversal de fluxo interceptada pelo dispositivo (em  $m^2$ ),  $\rho$  é a densidade da água ( $1000 \text{ kg/m}^3$  para água doce e  $1025 \text{ kg/m}^3$  para água salgada) e  $V$  é a velocidade da corrente (em  $m/s$ ), sendo o resultado em  $W/m^2$ .

Por se tratar de correntes de maré, a velocidade varia ao longo do tempo assim como a maré, tanto o sentido quanto a velocidade. Durante a maré enchente o fluxo é em

direção à costa e a velocidade varia de zero até um máximo, quando começa a desacelerar até voltar a zero, no estofa de preamar, quando muda o sentido para o oceano (maré vazante) e começa a acelerar novamente, seguindo o mesmo padrão de variação de velocidade da enchente, já que as marés são cíclicas. Além disso, como mostra a equação 1, a densidade energética varia com o cubo da velocidade do fluxo, variações na velocidade do fluxo impõem grandes variações na densidade energética.

Segundo Pinheiro (1987) é importante ressaltar as seguintes características do estuário do rio Guamá. Durante a maré de sizígia as correntes de vazante tem uma duração de mais de 8 horas em contraste com o tempo curto da enchente que não ultrapassa mais de 5 horas. Já durante a maré de quadratura, o tempo de duração da enchente e da vazante é aproximadamente igual (6 horas), prolonga-se cerca de uma hora mais que a enchente. As velocidades das correntes mostram valores um pouco acima de 1,00 m/s, o que está de acordo com as velocidades de correntes de maré modeladas, sendo maior nas vazantes do que nas enchentes.

## 8. Modelo Hidrodinâmico

### 8.1 Modelo Hidrodinâmico do Sisbahia

A modelagem hidrodinâmica é a determinação da quantidade de movimentação da água, a qual resulta na definição de padrões de corrente de maré. O módulo hidrodinâmico é a base fundamental para qualquer que seja o modelo usado para analisar a circulação de corpos naturais de água.

A modelagem hidrodinâmica foi realizada mediante o uso do sistema de base hidrodinâmica ambiental (SisBaHiA®) da COPPE/UFRJ. De acordo com ROSMAN (2011) o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA é da linhagem Filtered in Space and Time (FIST). O modelo realiza a modelagem de turbulência (uma vez que a maioria dos escoamentos na natureza é turbulenta) baseada em técnicas de filtragem similares às técnicas usadas na simulação de grandes vórtices. É possível resolver as equações de Navier-Stokes considerando a aproximação de Boussinesq na qual se supõe que todas as propriedades do fluido são constantes, com exceção da densidade no termo de força peso que varia linearmente com a temperatura e a condição de fluido incompressível.

Algumas das características do SisBAHIA confirmam a importância e flexibilidade dos métodos, e com isso pode-se afirmar que o programa tem aplicação para diversos fins. Os esquemas numéricos dos modelos são bem estabelecidos, o que torna a validade e aceitação mais acurada. Além disso, o vento e as condições de atrito no fundo do leito podem ser variáveis no espaço e tempo (ROSMAN, 2015).

No modelo hidrodinâmico, pode-se calcular perfis de velocidade ao longo da profundidade, os resultados são obtidos das seguintes maneiras: através de uma solução analítico-numérica, ou através de uma solução para uma formulação completa de modelo numérico 3D. Além disso, as tensões e a difusividade são modeladas a fim de que a calibragem que será feita no modelo seja o máximo possível baseada em variáveis naturais (ROSMAN, 2015).

Para obtenção do padrão de circulação, selecionou-se a opção de descrição bidimensional na horizontal do escoamento, também chamada 2DH, do modelo hidrodinâmico SisBAHIA. Tal opção se faz possível devido ao fato do escoamento na região ser predominantemente horizontal e não haver variação significativa de seus parâmetros (velocidade das correntes, densidade da água), na coluna d'água (ROSMAN, 2015).

O modelo hidrodinâmico determina em cada ponto,  $(x, z)$ , do corpo d'água, os valores médios na vertical das componentes nas direções  $x$  e  $z$ , da velocidade de corrente de maré,  $u(x, z, t)$  e  $v(x, z, t)$ , e a elevação do nível d'água, ou posição da superfície livre,  $z = \eta(x, y, t)$ .

O modelo matemático empregado tem como equações governantes a equação da continuidade e as equações da conservação da quantidade de movimento nas direções  $x$  e  $z$ . A rigor, o campo de velocidades é governado pelas equações de Navier-Stokes para escoamentos turbulentos (ou equações de Reynolds) em três dimensões (3D). As médias destas equações são calculadas verticalmente, resultando em um sistema de equações bidimensionais em planta, conhecidas como equações de águas rasas. Estes escoamentos ocorrem normalmente em baías, estuários, lagos e águas costeiras (ou corpos de águas rasos)(ROSMAN, 2015).

O modelo resultante, bidimensional na horizontal (2DH), é aplicável em casos em que as escalas verticais de movimento são sensivelmente inferiores às escalas horizontais, e onde o efeito de estratificação é desprezível sendo a coluna d'água considerada bem misturada. Quando as três dimensões são significativas e/ou a estratificação acentuada, utilizam-se modelos bidimensionais em camadas. Modelos tridimensionais são empregados somente em situações específicas, devido aos elevados requisitos computacionais (ROSMAN, 2015).

Na base do SisBaHiA podem-se encontrar os seguintes módulos hidrodinâmicos, transporte Euleriano, transporte Lagrangeano, qualidade de água e geração de ondas. Ainda, este disponibiliza diversas ferramentas (gerenciador de animações, conversor de tempo entre dados, e cópia de malhas e modelos) que são integradas em uma interface de trabalho amigável e também interage diretamente com os programas de pré e pós-tratamento (ROSMAN, 2015).

O módulo de transporte Lagrangeano é usado para simulação de transporte advectivo-difusivo em meio a reações cinéticas, como em lançamento de efluentes e derrame de óleo, por exemplo, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Ao longo deste processo é possível alcançar resultados probabilísticos calculados a partir de vários eventos e/ou de resultados ao longo de um determinado período. Como exemplo, a probabilidade de passagem de manchas ou plumas que tenham concentração acima de um valor limite e probabilidade que alcance o litoral. Segundo Pickard (1983), o padrão de fluxo de um fluido é dito Lagrangeano, quando a trajetória de cada partícula fluida é descrita, especificando quando cada partícula alcança cada ponto no seu caminho.

O transporte Euleriano é um módulo de utilidade mais geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. O parâmetro de fluxo de um fluido é considerado Euleriano quando a velocidade, juntamente com a intensidade e direção em cada ponto no fluido a cada instante de tempo são descritas.

## Equações Governantes no Modelo Hidrodinâmico

De acordo com ROSMAN, 2015, as incógnitas no modelo de circulação hidrodinâmica estão expressas nas equações abaixo no plano 2DH integrado na vertical ( $\zeta, U, V$ ):

1. Equação da quantidade de movimento 2DH para escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial H \bar{\tau}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{\tau}_{xz}}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\phi \sin \theta V$$

2. Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção z:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial H \bar{\tau}_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial H \bar{\tau}_{zz}}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_z^S - \tau_z^B) - 2\phi \sin \theta U$$

3. Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial t} + \frac{\partial VH}{\partial z} = 0$$

Onde:

- u e v são as componentes da velocidade do escoamento respectivamente, nas direções x e z
- $\zeta(x, z)$  e a elevação da superfície livre;
- g e a aceleração da gravidade;
- $\rho$  e a densidade local do fluido;
- $\rho_0$  e uma densidade constante de referencia;
- $\Phi$  e a velocidade angular de rotação da terra no sistema de coordenadas local e os termos com  $\Phi$  são as forças de Coriolis, no qual  $\theta$  e o angulo de latitude.

Tabela 3 - Significado dos termos das equações governantes do modulo 2DH.

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Aceleração local do escoamento;
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial z}$	Aceleração advectiva do escoamento;
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Pressão hidrostática resultante na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície d'água na direção x;
$\frac{1}{\rho \theta H} \left( \frac{\partial H \bar{\tau}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{\tau}_{xz}}{\partial z} \right)$	Resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento;
$2\phi \text{ sen } \theta V$	Força de Coriolis devido ao fato do referencial estar em movimento na terra;
$\frac{1}{\rho \theta H} (\tau_x^S)$	Tensão no vento na superfície livre por unidade de massa;
$\frac{1}{\rho \theta H} (-\tau_x^B)$	Tensão de atrito no fundo atuante no escoamento por unidade de massa.

Para a discretização do domínio espacial do módulo 2DH, o sistema FIST3D utiliza elementos finitos quadráticos. O detalhamento para a formulação desta técnica de elementos finitos pode ser encontradas em vários livros de elementos finitos, tais como Becker et al. (1981). Em linhas gerais, cada elemento é representado por polinômios quadráticos.

$$\text{Quadrangular: } f(x, y) = a_1 + a_2x + a_3z + a_4xz + a_5x^2 + a_6z^2 + a_7x^2z + a_8xz^2 + a_9x^2z^2$$

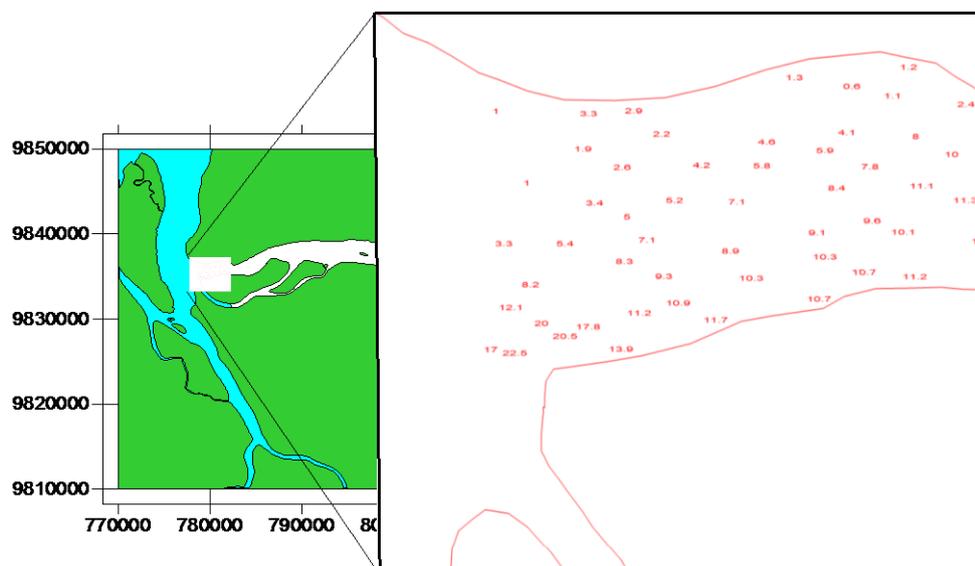
## 8.2 Parâmetros Ambientais

### 8.2.1 Batimetria

A batimetria do estuário do rio Guamá (Figura 24) foi obtida a partir do croquis de navegação da Marinha do Brasil(1987). O croqui contém dados batimétricos desde a foz do Guamá até o rio Capim à milhagem 227, com escala 1:25.000. A sondagem foi feita em metros, reduzida aproximadamente ao nível da baixa-mar média de sizígia e contém 46 folhas. Um dos maiores problemas nessa área é devido às frequentes variações de profundidade e mudanças de posição dos bancos, assim como as alterações das margens por erosão.

As folhas referentes ao trecho de interesse foram digitalizadas. Essa transformação do físico para o digital foi de grande importância para o detalhamento e precisão da batimetria.

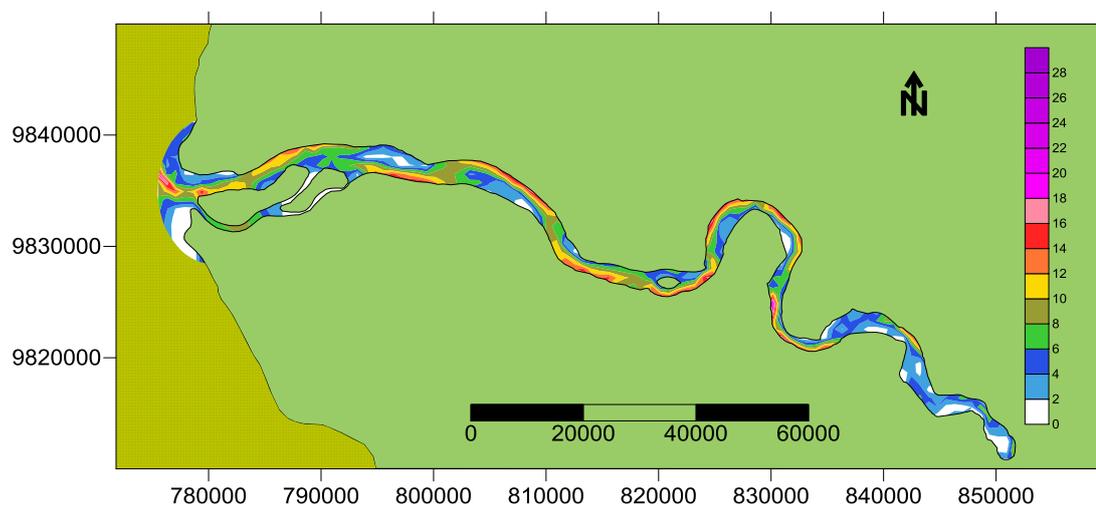
Para isso, foi o suficiente sobrepor os croquis já digitalizados sobre o mapa base georeferenciado no sistema UTM (Projeção Universal Transversal de Mercator) feito no Surfer. As figuras 22 e 23 mostram um trecho de uma determinada parte do domínio. Além da utilização do croquis de navegação, foi necessário também utilizar a carta náutica (DHN, 2015).



**Figura 22 - Imagem sobreposta ao mapa.**



**Figura 23 - Sobreposição do croquis digitalizado sobre o mapa do estuário do rio Guamá.**



**Figura 24 - Batimetria do estuário do rio Guamá obtida.**

Fonte: autor

### **8.2.2- Rugosidade de fundo**

A fim de que a rugosidade de fundo da área em questão seja conhecida, é necessário ter o conhecimento do tipo dos sedimentos recobrindo os fundos do estuário do rio Guamá. Os valores de rugosidade equivalente do fundo ( $\epsilon$ ) aplicados à modelagem estão associados à composição do sedimento de fundo e encontram-se especificados na Tabela 5 (ROSMAN, 2015). Em diversos trabalhos é escolhido um único valor para definir a de fundo ao longo do rio ou estuário, no nosso caso não será diferente.

**Tabela 4 - Valores recomendados para a rugosidade equivalente do fundo,  $\varepsilon$ , para uso do modelo 2DH. Fonte: (ROSMAN, 2015).**

Terreno ou leito de terra (areia, terra, vasa, etc.)	
Leito com transporte de sedimentos	$0.0070 \text{ m} < \varepsilon < 0.0500 \text{ m}$
Leito com vegetação	$0.0500 \text{ m} < \varepsilon < 0.1500 \text{ m}$
Leito com obstáculos	$0.1500 \text{ m} < \varepsilon < 0.4000 \text{ m}$
Fundo de pedra ou rochoso:	
Fundo de alvenaria	$0.0003 \text{ m} < \varepsilon < 0.0010 \text{ m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010 \text{ m} < \varepsilon < 0.0030 \text{ m}$
Fundo de asfalto	$0.0030 \text{ m} < \varepsilon < 0.0070 \text{ m}$
Fundo com pedregulho	$0.0070 \text{ m} < \varepsilon < 0.0150 \text{ m}$
Fundo com pedras médias	$0.0150 \text{ m} < \varepsilon < 0.0400 \text{ m}$
Fundo com pedras	$0.0400 \text{ m} < \varepsilon < 0.1000 \text{ m}$
Fundo com rochas	$0.1000 \text{ m} < \varepsilon < 0.2000 \text{ m}$

A amplitude da rugosidade equivalente do fundo ( $\varepsilon$ ) é função direta do material componente do leito, além do que é empregada no cálculo do coeficiente de Chézy, que por sua vez, é utilizado na equação da tensão de atrito no fundo ( $\tau_i$ ).

$$\tau_i = \rho \beta U_i \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

- $\tau_i$  = Vetor tensão de atrito no fundo;
- $\rho$  = Massa específica;
- $U_i$  = Vetor velocidade nas direções (x,z,t);

O parâmetro  $\beta$  está em função da maneira como o módulo 2DH deverá ser empregado. Uma vez que o módulo utilizado foi a 2DH não acoplada ao módulo 3D, a lei quadrática é empregada da maneira satisfatória.

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U + V} \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

$C_h$ : É o coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (\text{equação 4})$$

Além disso,

H: é a altura da coluna d'água

Os valores para a rugosidade equivalente de fundo ( $\varepsilon$ ) (Tabela 5) são recomendações de ABBOT e BASCO (1989). O número relativo à rugosidade de fundo é atribuído individualmente para cada ponto da grade no modelo. Assim como também se pode estabelecer um único valor para todos os pontos da grade ou um valor de rugosidade equivalente para qualquer ponto da grade. Foi adotado um único valor para a rugosidade de fundo, o qual corresponde ao fundo composto de areia fina e lama (BANHA *et al*, 2014). O valor, neste caso, é de 0,01.

### 8.2.3 Marés

Na circulação hidrodinâmica modelada, inseriu-se os dados de maré como uma das forçantes, visto que esta pesquisa é focada em estuário na qual a maré exerce uma grande influência. Através de registros obtidos no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2011), obtendo-se a série temporal de elevação do nível d'água gerada pela maré astronômica.

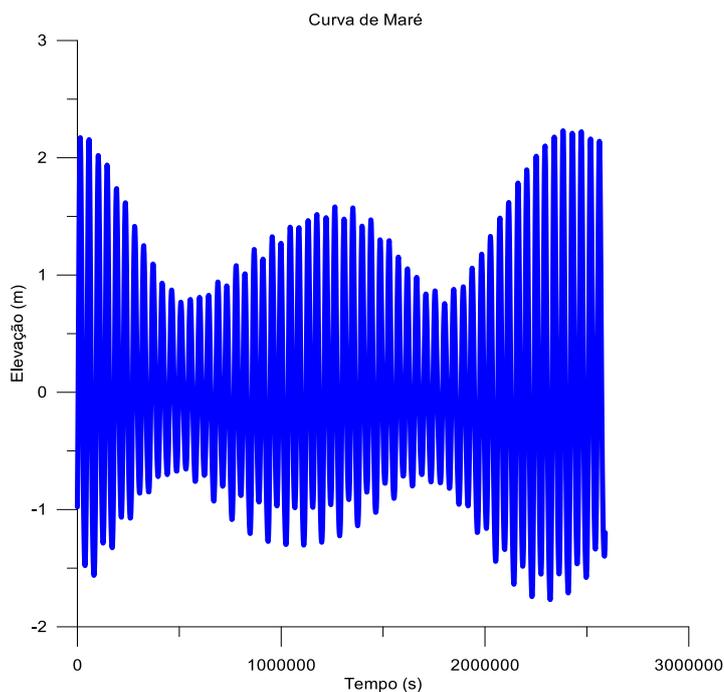
As 29 componentes harmônicas estão apresentadas na tabela 5. O gráfico que foi gerado pela utilização dessas constantes é apresentado na figura 25. A estação maregráfica do Porto de Belém é mantida pela Marinha do Brasil desde o ano de 1956, localizada na latitude 01° 26' 10.64" S e longitude 48° 29' 38.20" W, no fuso +3 (dados atualizados em 2013). Ressalta-se que foi considerada apenas a maré astronômica, ou seja, dados que podem ser previstos; não foi considerada a influência da maré meteorológica no nível do mar.

Para realizar a modelagem é necessário escolher estações maregráficas na área de estudo. A tabela 6 mostra a amplitude e a fase das principais constituintes de maré obtidas a

partir da análise harmônica de séries temporais de elevação do nível d'água na Baía de Guajará. Esse conjunto de constituintes harmônicos foi utilizado como condições de contorno devido a sua proximidade com o estuário do rio Guamá, a fim de extrair as predições de marés. O trabalho se resume em usar os dados das constantes harmônicas como dados de *input*, ou seja, não é feita nenhuma consideração a respeito da metodologia de captação dos dados da estação maregráfica.

**Tabela 5 - Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica do porto de Belém, listadas pela significância da amplitude (Fonte: [www.fundacaofemar.org.br](http://www.fundacaofemar.org.br)).**

Constante	Período (seg)	Amplitude(m)	Fase(rad)
M1	89399.69357	0.009	2.5482
MNS2	42430.07141	0.006	1.5533
MS4	21972.0214	0.076	4.8695
SN4	22176.69402	0.008	4.6775
M4	22357.0822	0.122	4.4157
MN4	22569.02607	0.051	4.1364
MK3	29437.70388	0.038	3.5779
M3	29809.44293	0.013	3.1591
MO3	30190.69069	0.044	3.0543
K2	43082.04524	0.091	0.192
S2	43200	0.333	0.2094
T2	43259.21711	0.026	6.0563
T2	43259.21711	0.026	6.0563
L2	43889.83274	0.065	5.7596
M2	44714.16439	1.163	5.8294
nu2	45453.61588	0.048	5.1662
N2	45570.05368	0.223	5.5676
mu2	46338.32748	0.059	0.8901
2N2	46459.34813	0.043	4.9742
OO1	80301.86711	0.003	0.6981
J1	83154.51637	0.001	3.4558
K1	86164.09076	0.095	5.5327
P1	86637.20458	0.024	5.6723
O1	92949.62999	0.09	5.1138
Q1	96726.08402	0.007	1.7977
Mf	1180292.288	0.026	1.1868
MSf	1275721.388	0.083	0.6807
Mm	2380713.137	0.042	0.2618
Ssa	15778458.75	0.067	0.1047
As	31556955.92	0.036	5.6025



**Figura 25 - Curva de maré do estuário do rio Guamá gerada a partir das constantes harmônicas da área, por um período de 30 dias. Esta é uma das condições adotadas na modelagem deste estuário.  
Fonte: Autor**

#### 8.2.4 Vazão do rio

A vazão influencia a circulação hidrodinâmica e contribui para o aumento do volume de água nos seus canais. Os dados obtidos da vazão, referente ao ano de 2014, são provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA, ano) (Figura 7). Os dados referentes à vazão foram obtidos a partir da estação fluviométrica Bom Jardim, no rio Guamá (município de Ourém), operada pela CFRM, código 31520000 (Latitude: -1,5406, Longitude: -47,0656)(Tabela 7).

Ao longo do estuário do rio Guamá, os valores de vazão observados para o ano de 2014 variaram de um mínimo de 15,5 m<sup>3</sup>/s em janeiro, e máximo de 358 m<sup>3</sup>/s em maio de acordo(Tabela 08). Não há outra estação fluviométrica operante ao longo do rio Guamá, logo, não foi possível obter outros valores de vazão senão o da estação no município de Ourém.

**Tabela 6 - Vazão do estuário do rio Guamá mensal máxima, mínima e média. Fonte: (ANA, 2014).**

Mês/ano	Máxima (m <sup>3</sup> /s)	Mínima (m <sup>3</sup> /s)	Média (m <sup>3</sup> /s)
jan/14	104	15.5	36.4
fev/14	291	50	146
mar/14	355	149	258
abr/14	349	88.2	236
mai/14	358	197	265
jun/14	260	140	173
jul/14	153	91.6	124
ago/14	113	53.2	75.2
set/14	57.8	41	49.7
out/14	41	27.5	35.1
nov/14	33.5	18.5	23.7
dez/14	30.5	17	21.4

### 8.2.5 Ventos

O SisBaHiA apresenta como resultado uma estimativa da distribuição das tensões no leito de um corpo d'água devido à ação das ondas geradas por vento. Para realizar a simulação hidrodinâmica, foram utilizados os dados de vento com direção uniforme (81.45°) obtidos a partir da média da direção dos meses e intensidade variável, fornecendo a média das intensidades dos dias medidos (Figura 8) (ROSMAN, 2015).

Como normalmente é visto em modelos de escoamento com superfície livre, o atrito na superfície livre devido ao vento, também é escrito em termos de uma formulação de velocidade quadrática:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_d W_{10}^2 \cos \phi_i; [i = 1,2]$$

Onde;

**Tabela 7- Elementos da equação de vento.**

Fonte: [http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V9b\\_.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9b_.pdf)

$\rho_{ar}$	densidade do ar
$C_d$	coeficiente de arraste do vento
$W_{10}$	valor local da velocidade do vento medida a 10 m acima da superfície livre (m/s)
$\phi_i$	ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção $x_i$

### 8.2.6 Método de alagamento e secamento

Os métodos de alagamento oferecidos pelo SisBaHiA® são três métodos distintos: Método Rugoso-Poroso (MRP), Método de Meio Poroso (MMP) e, Método de Filme Superficial (MFS). Esses métodos são para a modelagem em áreas sujeitas ao processo de alagamento e secamento devido às variações do nível da água.

Os métodos MRP e MMP são bastante similares, pois eles consideram a existência de uma faixa de meio poroso abaixo da superfície do terreno por onde ocorre um fluxo restrito de água. Eles se diferem quando o escoamento subsuperficial é ativado. No caso do MRP o escoamento subsuperficial ocorre somente quando a espessura da coluna d'água acima do fundo for menor que a espessura da camada de escoamento em meio poroso, assim como o fluxo em toda a espessura da camada porosa-rugosa só ocorre quando a cota do nível da água estiver abaixo da cota do terreno, ou seja, o escoamento subsuperficial no MRP só ocorre durante o secamento da área. Já no MMP o escoamento subsuperficial está sempre ativo.

Não há meio poroso no MFS, pois o fundo é considerado impermeável, a medida que ocorre secamento, a água se posiciona sobre a superfície do fundo. Rosman (2011) explica que assim como o MRP e o MMP são recomendados para as áreas sujeitas à variação de maré com manguezais, entretanto, o MRP tem a vantagem de não interferir na celeridade de propagação de onda. Visto isso, optou-se por utilizar o MRP para a modelagem hidrodinâmica do estuário do rio Guamá.

## 9. Resultados

O tempo que é utilizado no modelo hidrodinâmico do SisBaHiA® é dado em segundos. A fim de facilitar a comparação com os dados medidos em campo determinou-se, para todas as simulações, que o intervalo de tempo dos resultados, tanto espacial quanto temporal é de 900s, por tanto, o modelo fornece 1 resultado para cada quinze minutos. O instante inicial foi determinado pela primeira preamar da curva de maré fornecida ao modelo, desta maneira, o instante inicial para todas as simulações foi 14.400s, e o tempo final foi de 2.606.400s. O passo de tempo utilizado foi de 50s (Tabela 8).

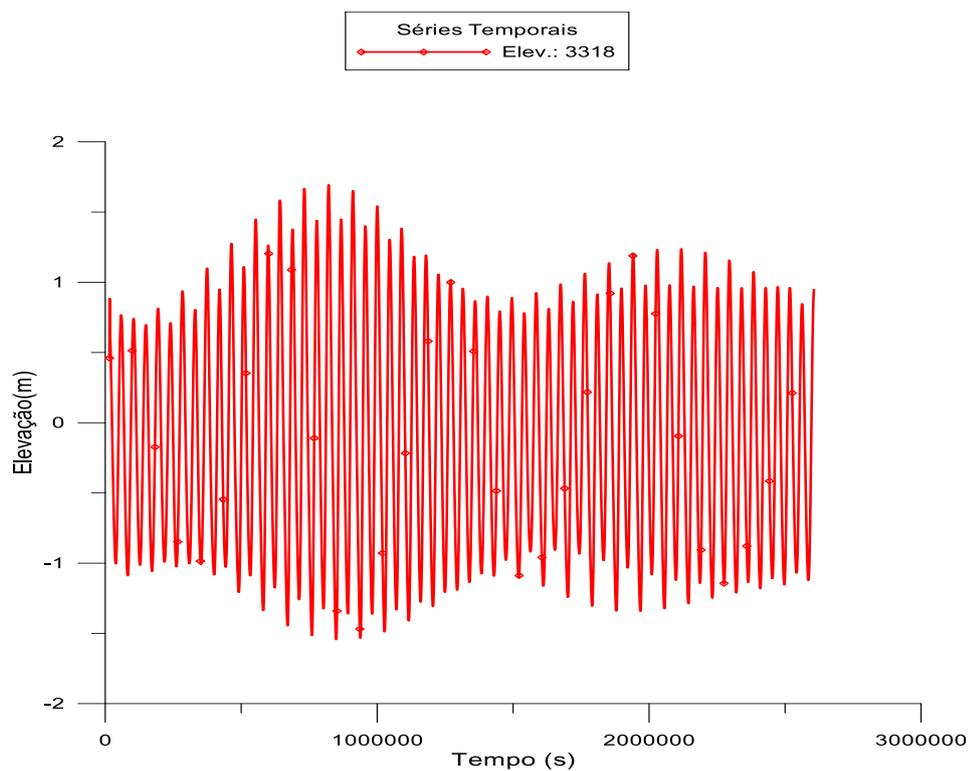
**Tabela 8 - Dados de parâmetros de entrada utilizados para simulação hidrodinâmica no SISBAHIA.**

	Parâmetros	Simulações Mensais
Simulação	Instante inicial(s)	14400
	Instante final(s)	2606400
	Passo de tempo(s)	50
Intervalo de tempo dos resultados	Espacial (s)	900
	Temporal (s)	900
Condições iniciais	Elevação(m)	2,147100

Esta simulação teve como objetivo observar o comportamento hidrodinâmico do estuário do rio Guamá durante as marés de sizígia e de quadratura (meia maré enchente, meia maré vazante, estofo de preamar e estofo de baixamar).

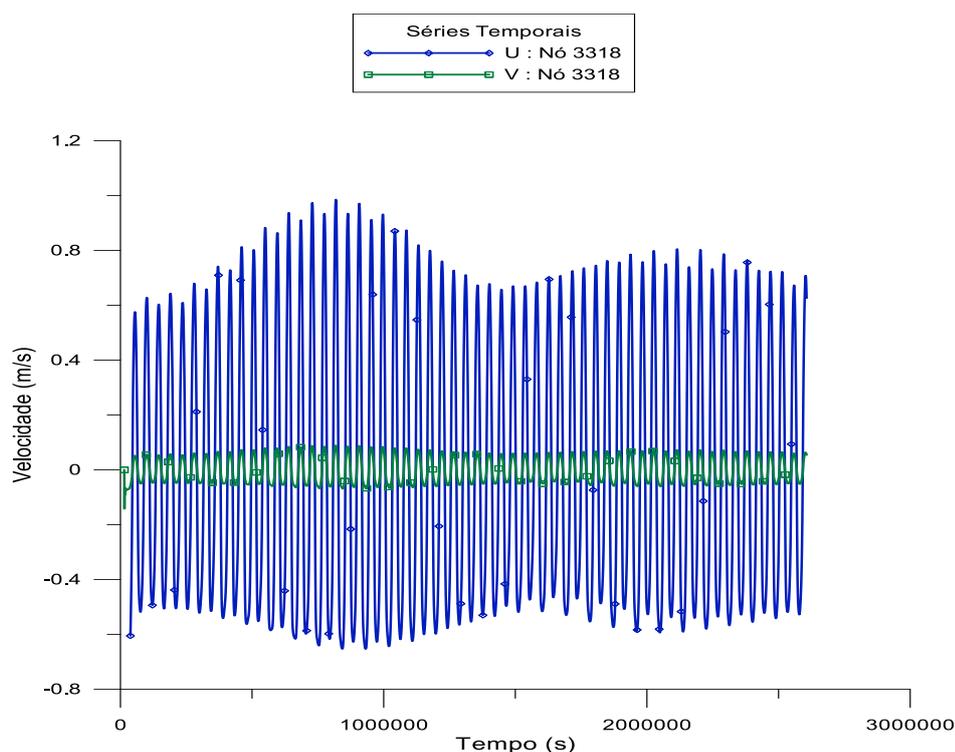
A determinação dos padrões das correntes de maré foi feita através dos resultados fornecidos pelo modelo 2DH, por meio de campos de vetores representativos da velocidade resultantes das seguintes componentes: x e y, integradas na coluna d'água. Assim, avaliando a velocidade média, a direção e intensidade das correntes de maré na parte interna do estuário do rio Guamá.

Para a simulação da circulação hidrodinâmica através do SisBAHIA é necessário fornecer somente as condições iniciais 2DH, que são os valores da elevação da superfície livre  $\zeta$  e as componentes de velocidade U e V, para o instante inicial  $t_0$  em todos os nós do domínio. Para o caso em estudo, é necessário apenas colocar o valor da elevação da superfície no instante 0. Este valor é fornecido pelo próprio SisBAHIA na curva das constantes harmônicas.



**Figura 26 - Curva de elevação da maré gerada pelo SISBAHIA pelo período de 30 dias, iniciando no dia 15 de junho de 2009.**

A série temporal que corresponde ao mês de junho foi iniciada no dia 15 de junho de 2009 e o programa rodou por 30 dias (Figura 26). A partir da observação de elevação, é possível fazer o estudo nas diferentes marés do mês supracitado no nó 3.318. A elevação máxima observada foi de 16.934 m enquanto a mínima foi de -15.425, valores que estão dentro de parâmetros razoáveis.



**Figura 27 - U (velocidade longitudinal) e a V (velocidade transversal) no nó 3318 conforme localizado na figura 32.**

O modelo gerou ainda além da elevação(m) (Figura 27), a velocidade longitudinal (U), no sentido da corrente de maré e a velocidade transversal (V), perpendicular ao sentido da corrente, em m/s (Figura 21). Estas velocidades foram geradas no nó 3.318, próximo à régua maregráfica, cuja referência é de 1,84 m, que coletou os dados de elevação (1°28'30.2"S 48°26'59.0"W), conforme a localização na figura 28. Estes resultados estão dentro do parâmetro esperado uma vez que se espera que a velocidade em U seja muito maior que V. Este ponto foi escolhido estrategicamente visto que as velocidades U e V não estão alinhadas com o norte do mapa e sim com o a direção sul e norte do próprio software. A velocidade U mínima é de -0.65326 m/s e máxima de 0.98548 m/s. Já a velocidade V mínima é de -1.5425 m/s e máxima de 1.6934 m/s.

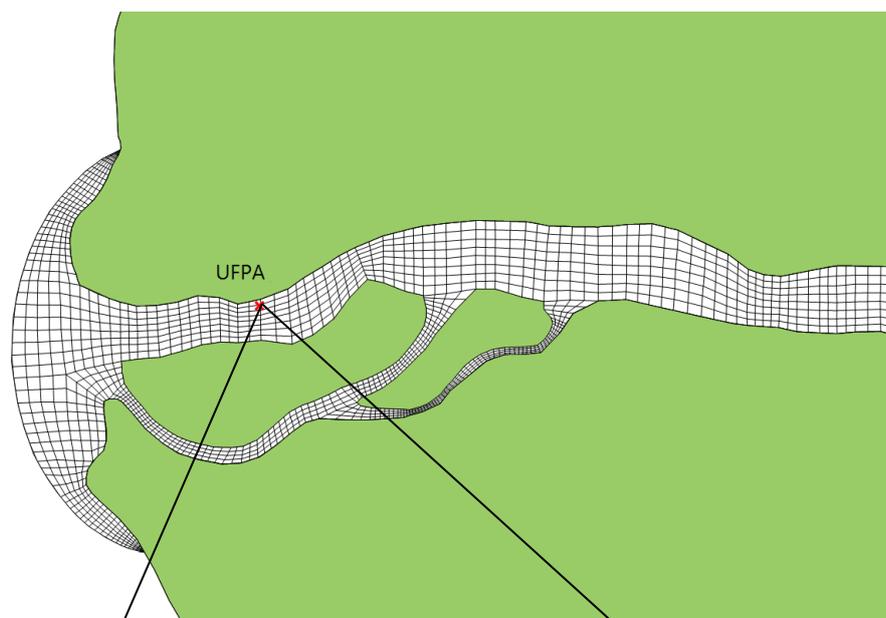


Figura 28 - Altura de maré no estuário do rio Guamá: máximo 3.6 m e mínimo: 0.51 m.

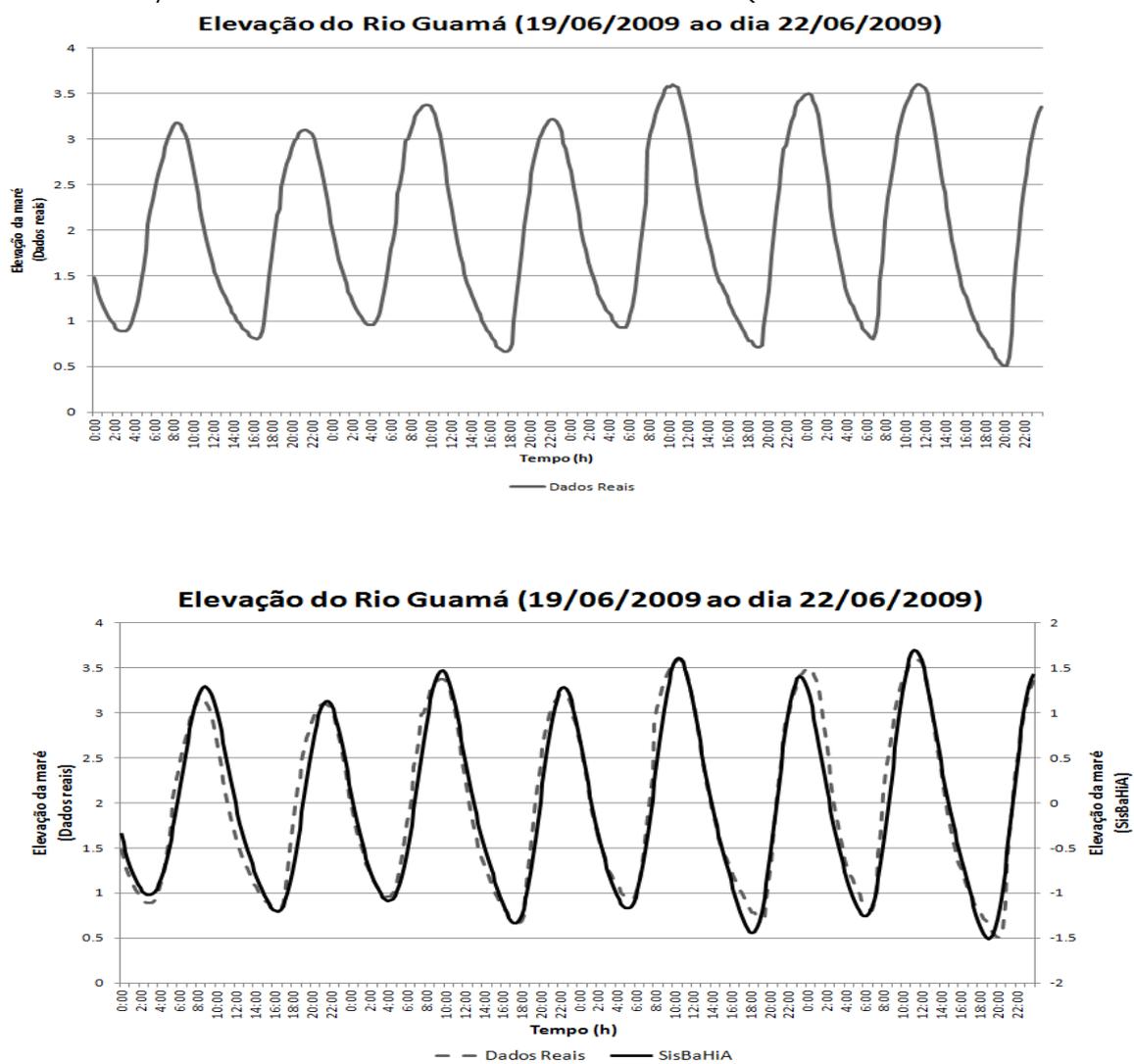


Figura 29 - Relação entre os dados de elevação do estuário do rio Guamá coletados em campo e os dados gerados pelo modelo no SISBAHIA.

**Tabela 9 - Comparação entre os dados reais e modelados de elevação da superfície.**

<b>Dado</b>	<b>Elev. Mínima</b>	<b>Elev. Máxima</b>	<b>Ro</b>	<b>EQM (%)</b>
Real	0.51	3.6	0.9719	7
Modelo	0.5872	3.6187		

O Erro Quadrático Médio está um pouco acima do esperado uma vez que se espera que o percentual de erro fosse de até 5%, visto que o erro deve estar dentro do limite estabelecido (ROSMAN, 2015) (Tabela 9)(Figura 29). Devida ausência de dados de corrente, não foi feita uma calibração com esses dados, entretanto, a comparação de elevação feita acima nos dá uma ideia da proximidade que o modelo tem com os dados reais, sendo, mesmo que um pouco acima da porcentagem ditada por Rosman, aceitável ao se observar o comportamento do estuário do rio Guamá.

## 9.1 Maré de Sizígia

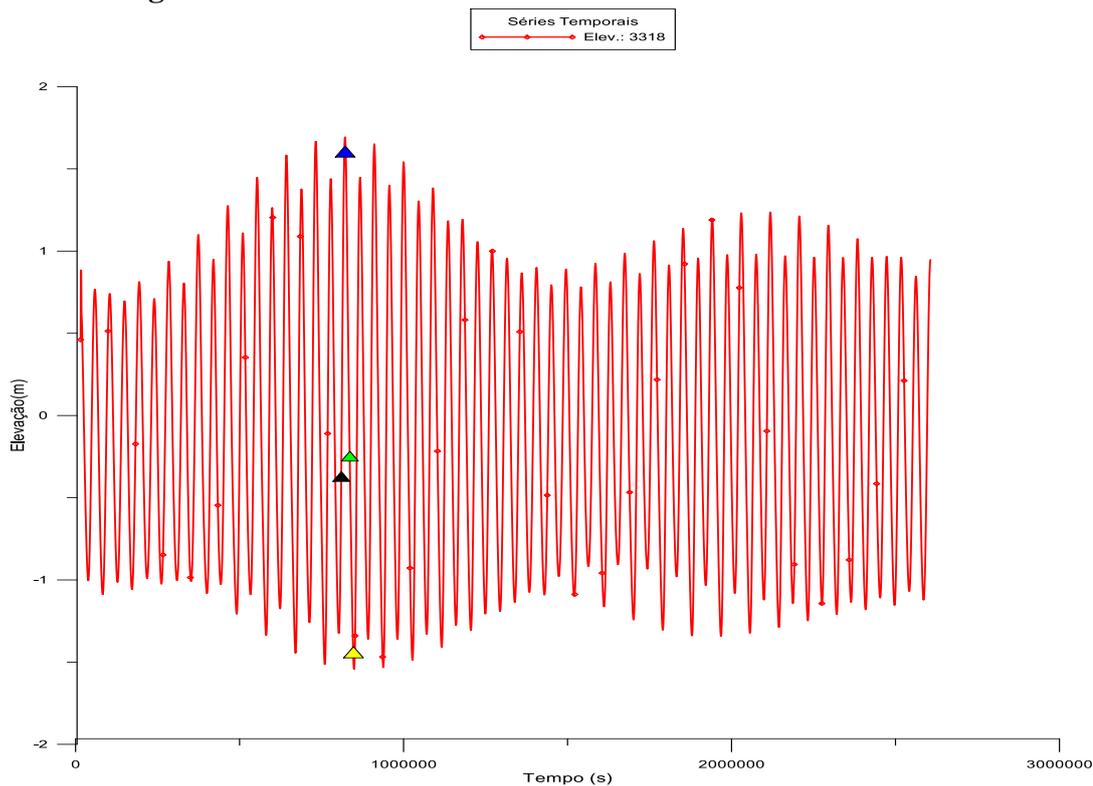


Figura 30 - Instante de altura de maré de sizígia (meia maré enchente, estofa de preamar, meia maré vazante, estofa de baixamar) representado pelos triângulos.

## Maré de Sizígia

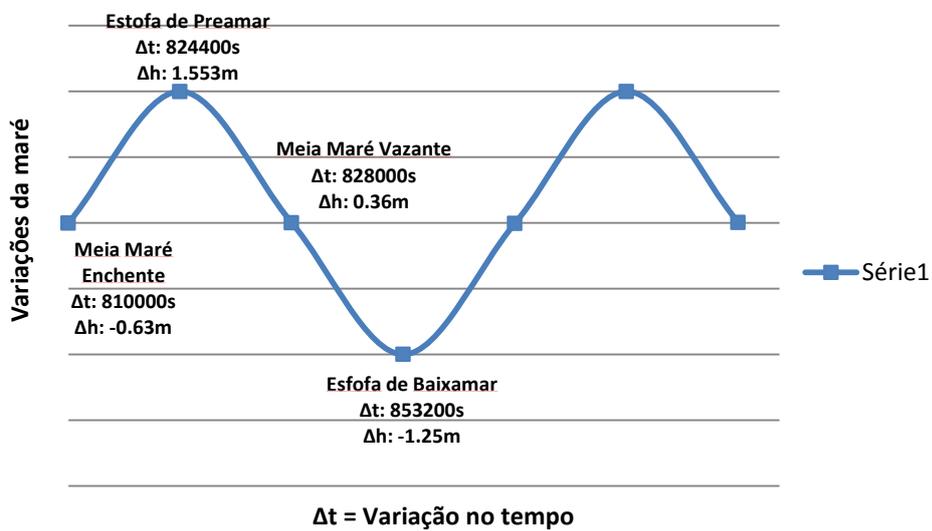
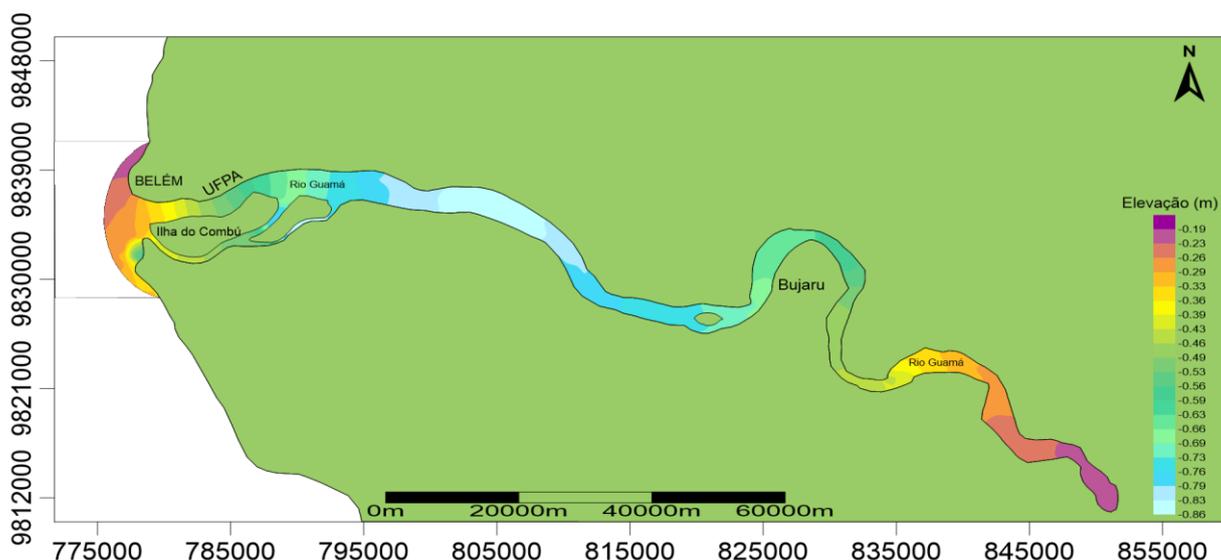


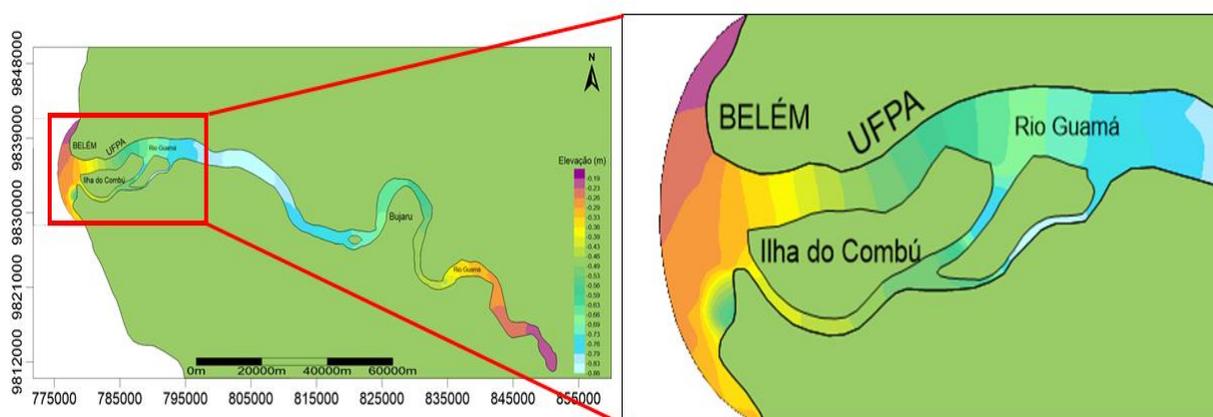
Gráfico - Ilustração dos valores máximos e mínimos do ciclo de maré obtidos durante a maré de sizígia.

### 9.1.1 Simulação 1 (meia maré enchente)

Esta simulação hidrodinâmica (simulação 1), indicada pelo primeiro triângulo preto (Figura 30), ocorre no instante 810.000s durante a maré de sizígia em uma meia maré enchente. Ao analisar o ciclo de maré nesta simulação, tem-se o momento no qual se pode observar jusante (próxima à foz do estuário do rio Guamá) faixas de elevação bastantes curtas devido ao fato da maré estar enchendo e esta elevação vai aumentando à montante gerando um movimento grande de massa d'água próximo à UFPA, caracterizando uma alteração contínua do fluxo d'água.



**Figura 31 - Instante de meia maré enchente durante a sizígia onde observa-se uma variação muito dinâmica na elevação do estuário do rio Guamá próximo a UFPA.**



**Figura 32 - Elevação (m) - Meia maré enchente de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.**

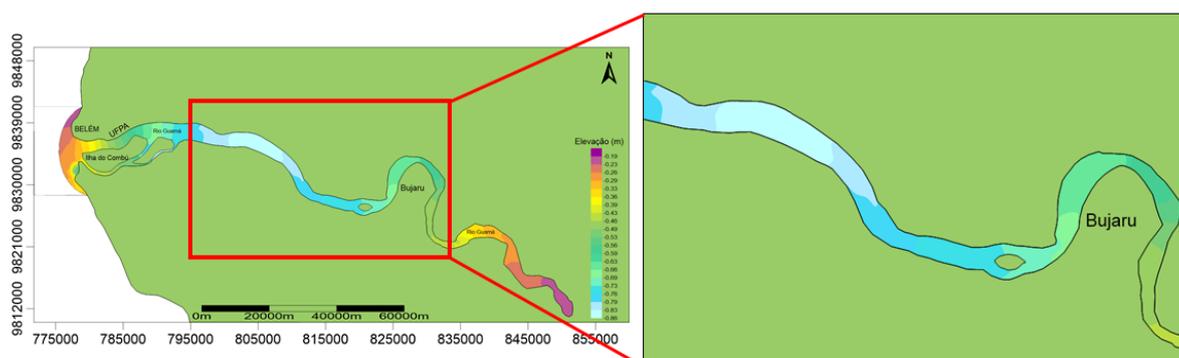


Figura 33 - Elevação (m) - Meia maré enchente de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.

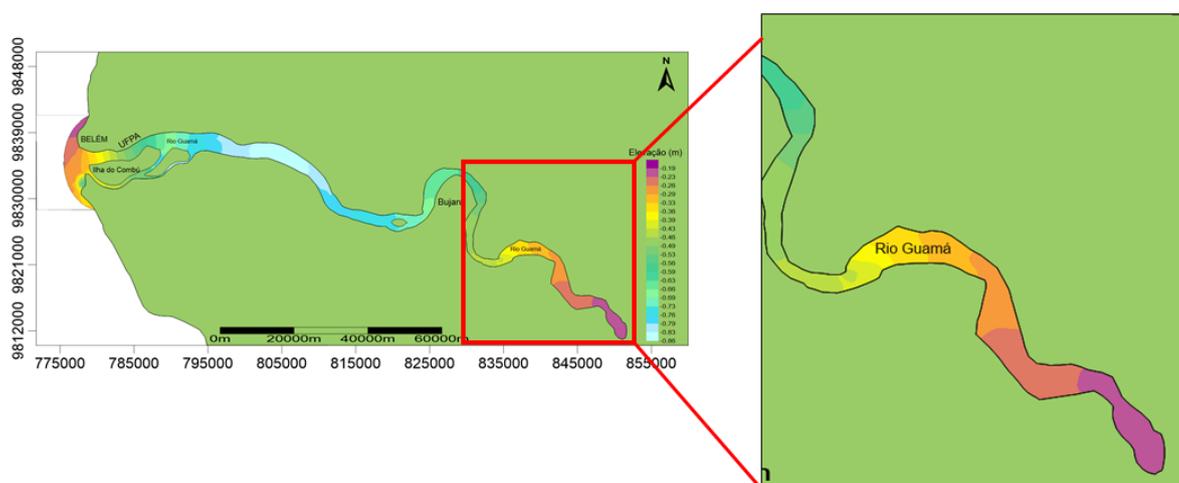


Figura 34 - Elevação (m) - Meia maré enchente de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.

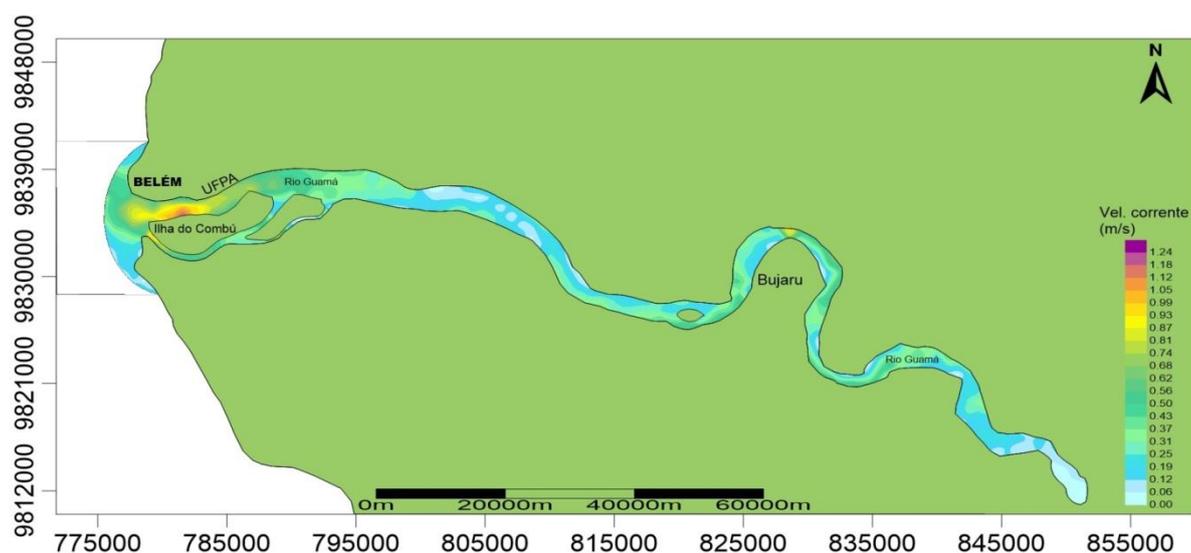


Figura 35 - Detalhamento no padrão das correntes de maré na simulação 1, mostrando o comportamento de uma meia maré enchente de sizígia. Pode-se perceber uma maior velocidade na área em que as elevações estão variando com mais intensidade no estuário do rio Guamá próximo à UFPA.

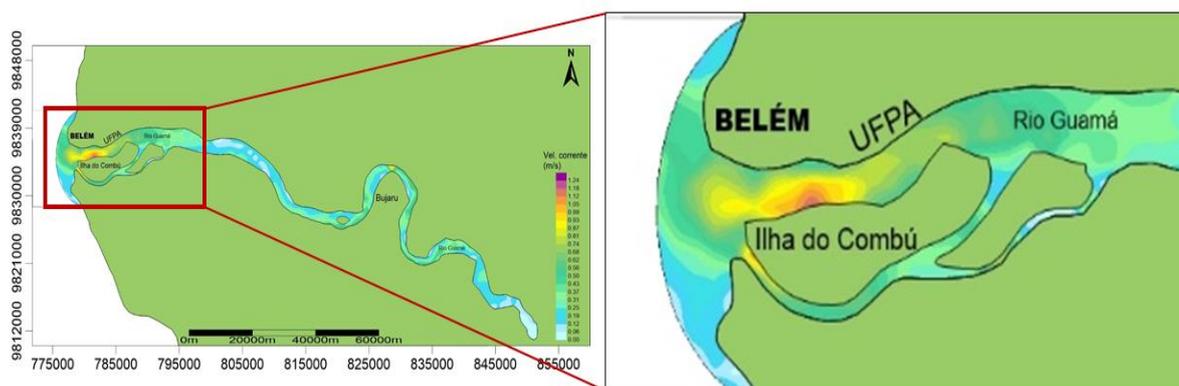


Figura 36 - Velocidade (m/s) - Meia maré enchente de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.

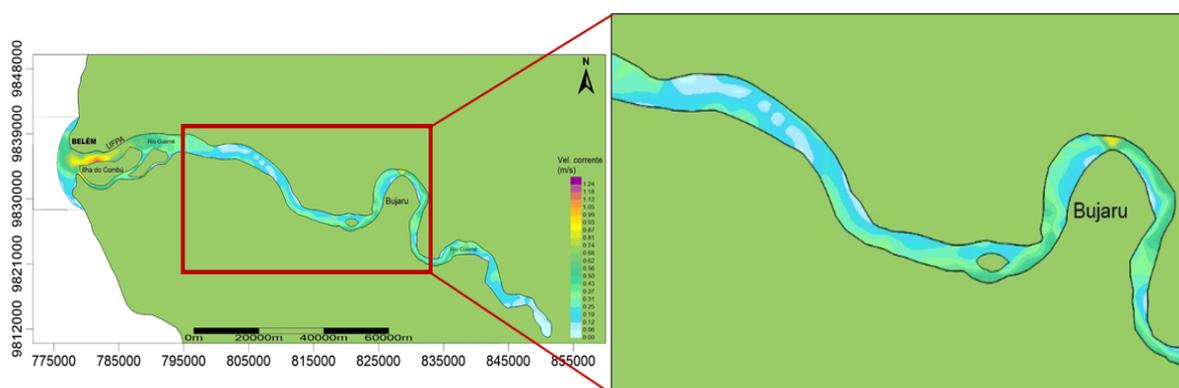


Figura 37 - Velocidade (m/s) - Meia maré enchente de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.

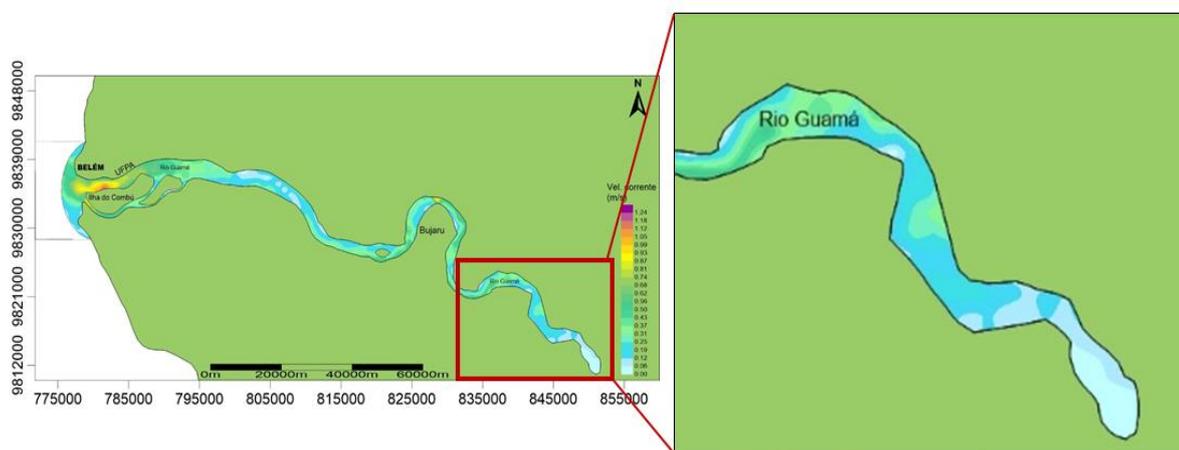
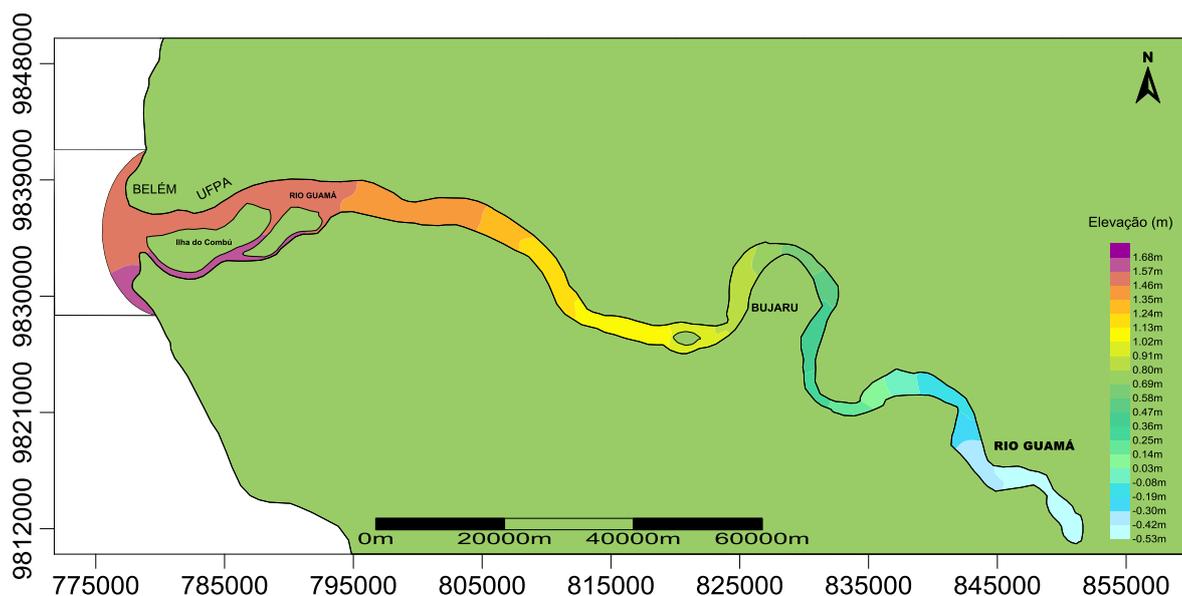


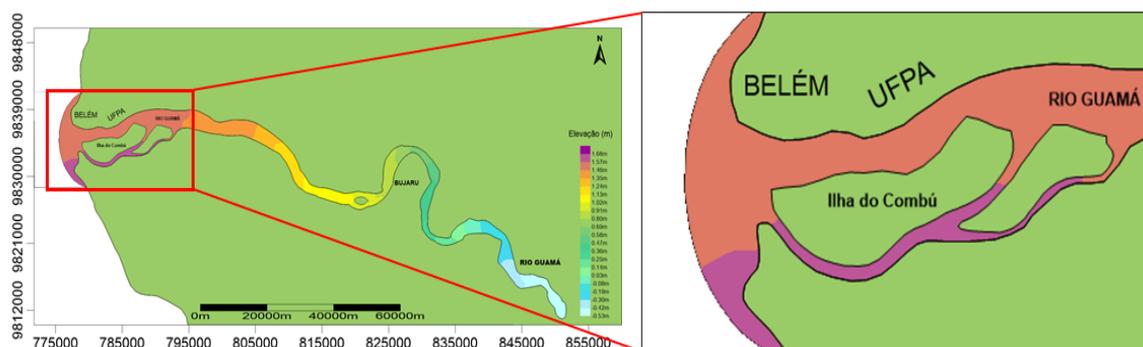
Figura 38 - Velocidade (m/s) - Meia maré enchente de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá

### 9.1.2 Simulação 2 (Estofa de Preamar)

A simulação 2 ocorre numa maré de sizígia, durante o estofa de preamar, representada pelo triângulo azul (Figura 30), no instante 824.400s. Pode-se observar que neste instante a elevação fica uniforme em vários perímetros do domínio do estuário do rio Guamá. Neste instante também fica evidenciado o momento do estofa de preamar ao observar os valores da velocidade, que estão entre 0 m/s e 0.25 m/s. Pode-se notar também que as marés de sizígia apresentam altura mínima maior do que a de quadratura.



**Figura 39 - Padrão de elevação gerado pela simulação 2 (estofa de preamar). Pode-se observar que neste instante a elevação fica uniforme em vários perímetros do estuário do rio Guamá.**



**Figura 40 - Elevação (m)- Estofa de preamar na maré de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.**

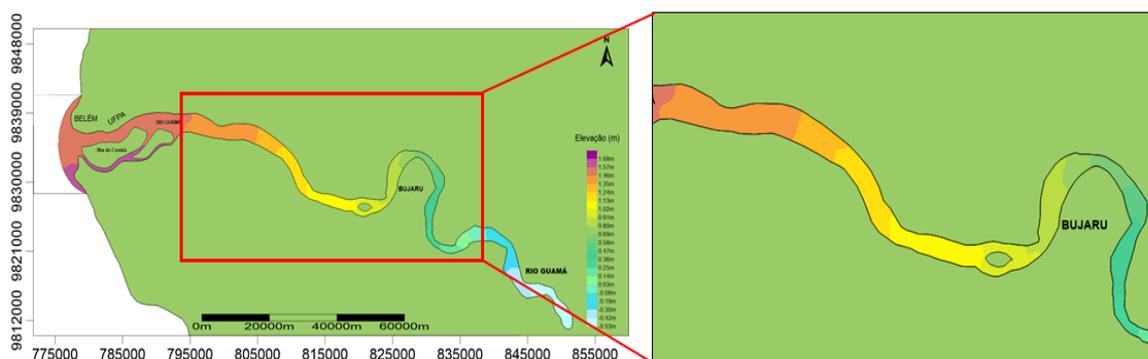


Figura 41- Elevação (m) - Estofo de preamar na maré de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.

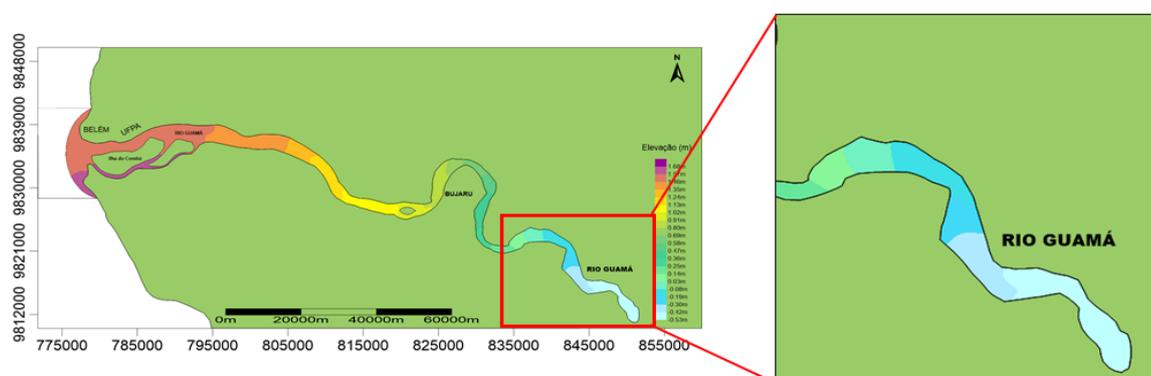


Figura 42 - Elevação (m)- Estofo de preamar na maré de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.

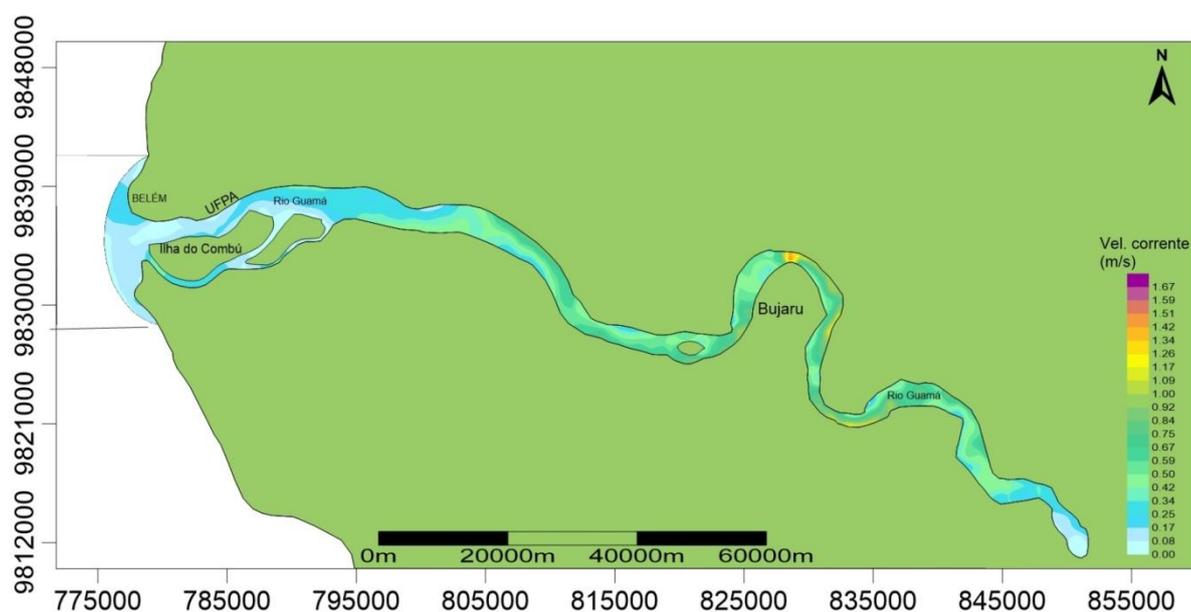


Figura 43 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estofo de preamar de sizígia. Neste instante, os valores da velocidade está próximo de 0 m/s perto de Belém e 0.25 m/s em Bujaru.

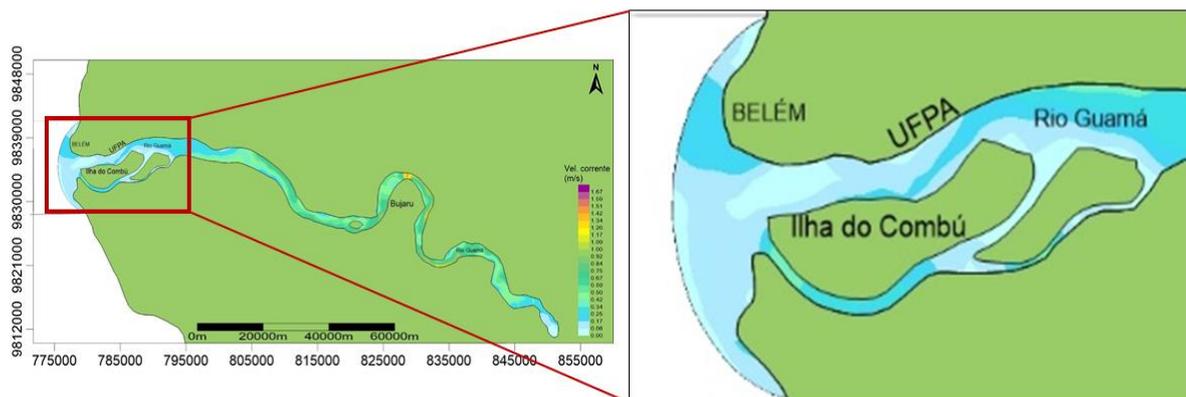


Figura 44 - Velocidade - Estofa de preamar de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.

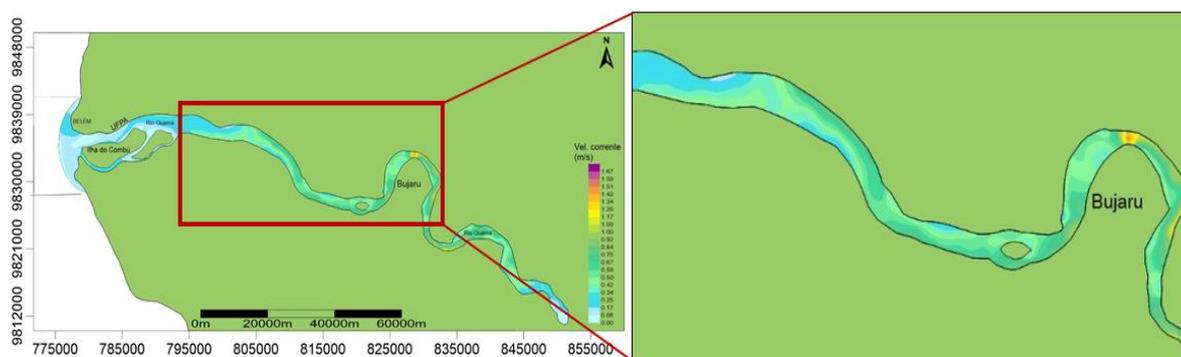


Figura 45 - Velocidade - Estofa de preamar de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.

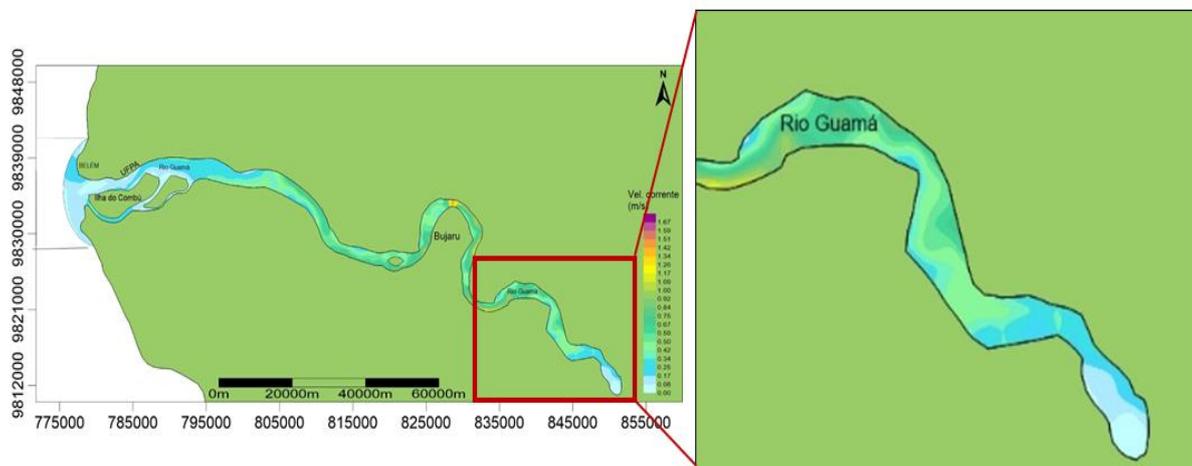


Figura 46 - Velocidade - Estofa de preamar de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.

### 9.1.3 Simulação 3 (Meia Maré vazante)

Essa simulação ocorre na meia maré vazante durante a maré de sizígia e está representada pelo triângulo verde (Figura 30), no instante 8.316.000s. Similarmente à meia maré enchente, pode-se observar a partir do padrão de cores uma movimentação do corpo d'água próximo à UFPA. No momento de meia maré vazante há uma maior velocidade da corrente de maré na orla da UFPA, afetado pela erosão. Na meia maré vazante de quadratura há uma atividade de maior velocidade das correntes de maré na orla da UFPA. Devido à extensão do estuário do rio Guamá a maré não apresenta uma uniformidade no momento da enchente nem tampouco na vazante, uma vez que leva tempo para a massa d'água se movimentar ao longo deste estuário.

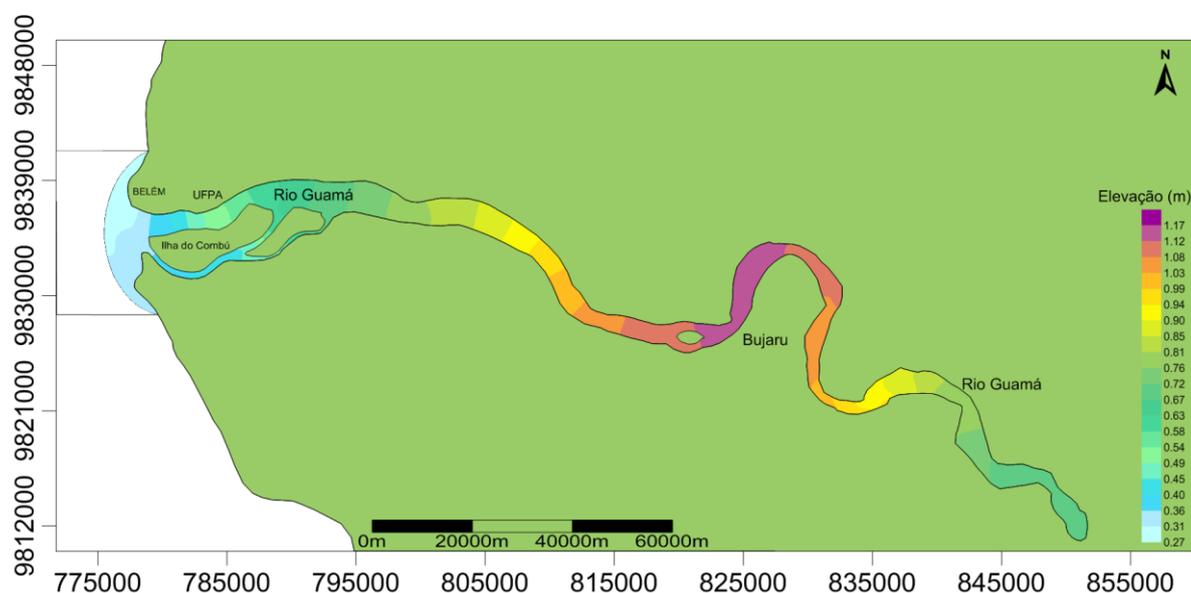


Figura 47 - Padrão de elevação gerado pela simulação 3 (meia maré vazante), observar o detalhamento das faixas de elevação bastantes curtas devido ao fato da maré estar vazando. Assim, ocorre um movimento de grande de massa d'água próximo à UFPA em direção a Baía de Guajará.

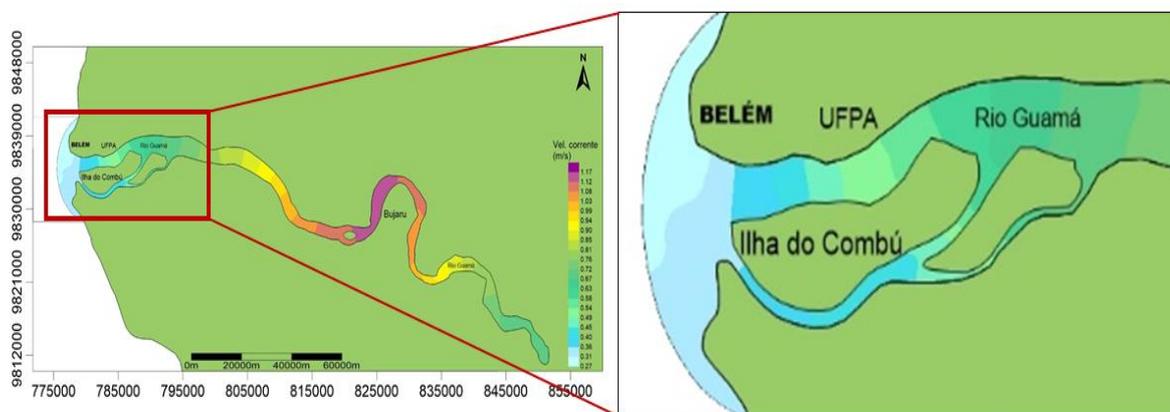


Figura 48 - Elevação (m) - Meia maré vazante de sizígia – área 1 do estuário do rio Guamá.

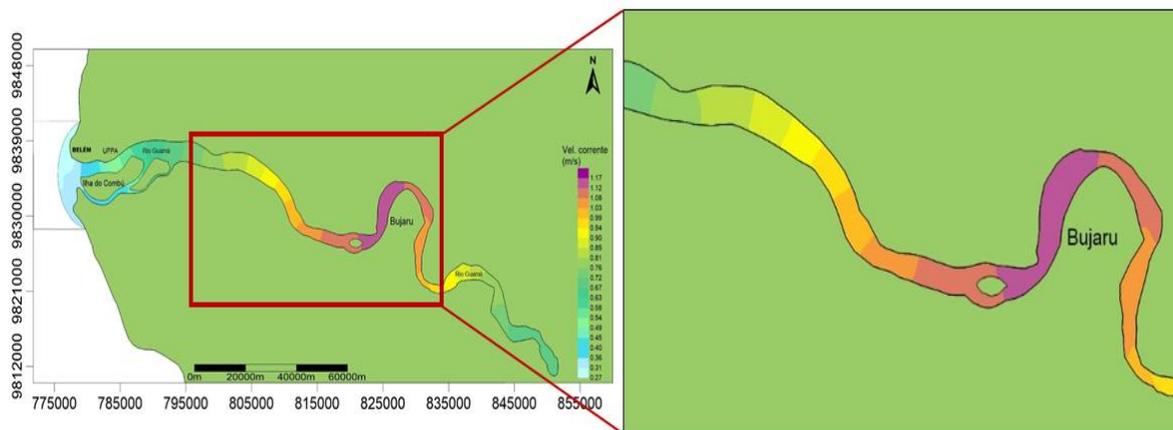


Figura 49 - Elevação (m) - Meia maré vazante na maré de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.

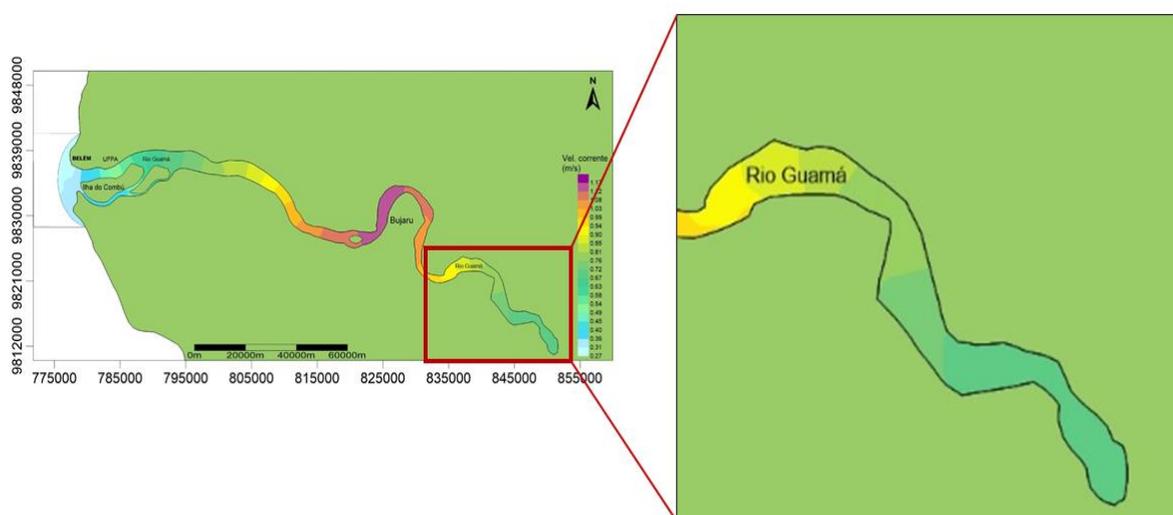


Figura 50 - Elevação (m) - Meia maré vazante de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.

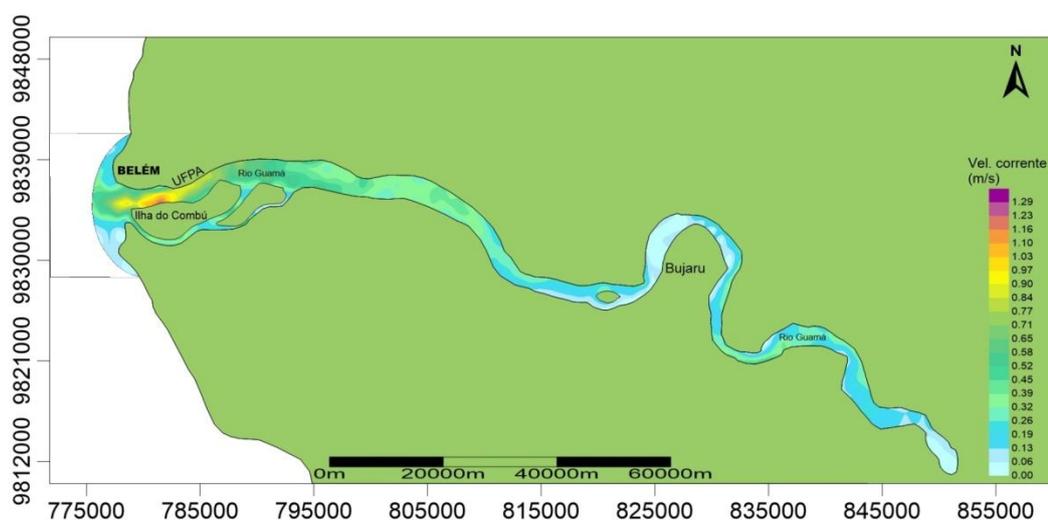


Figura 51 - Padrão das correntes de maré na simulação 3, mostrando o comportamento de uma meia maré vazante de sizígia. Uma maior velocidade na área que as elevações estão variando com mais intensidade próximo a UFPA.

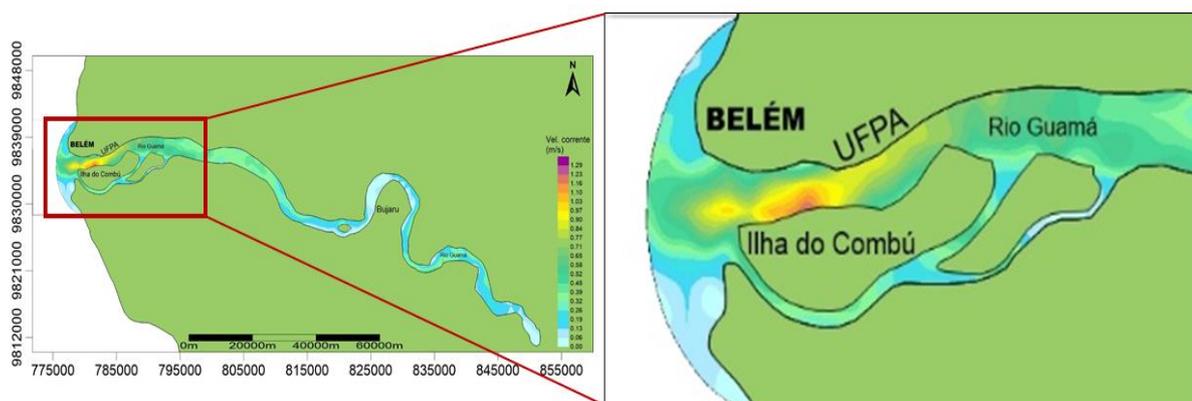


Figura 52 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.

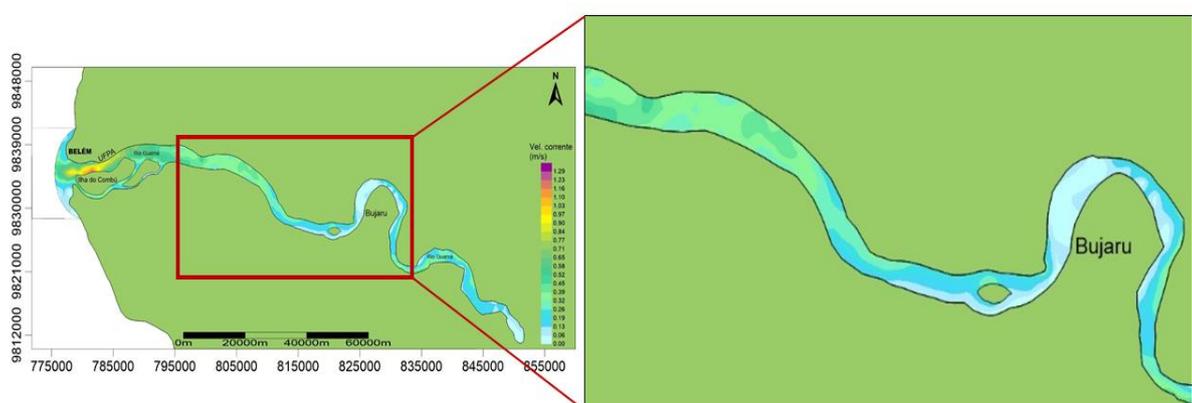


Figura 53 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.

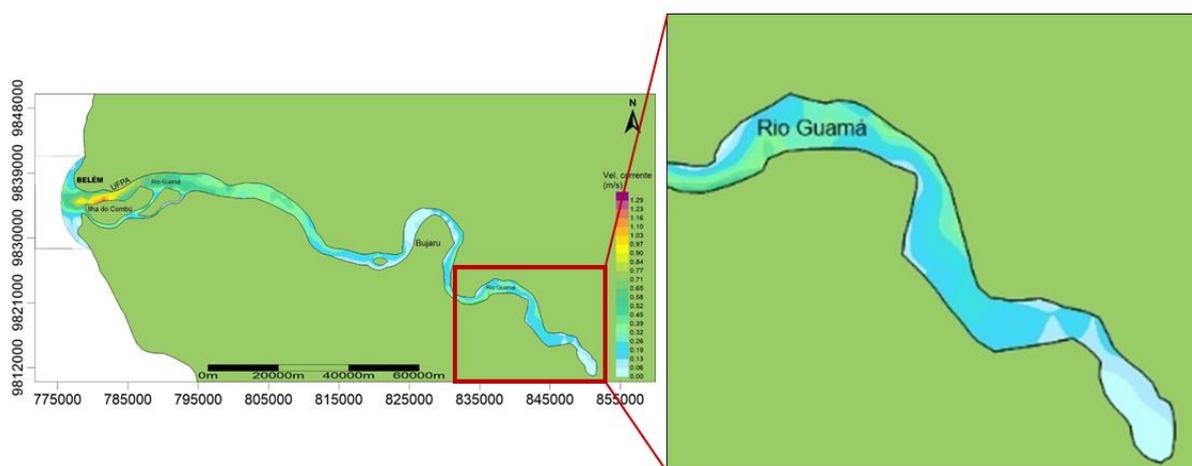
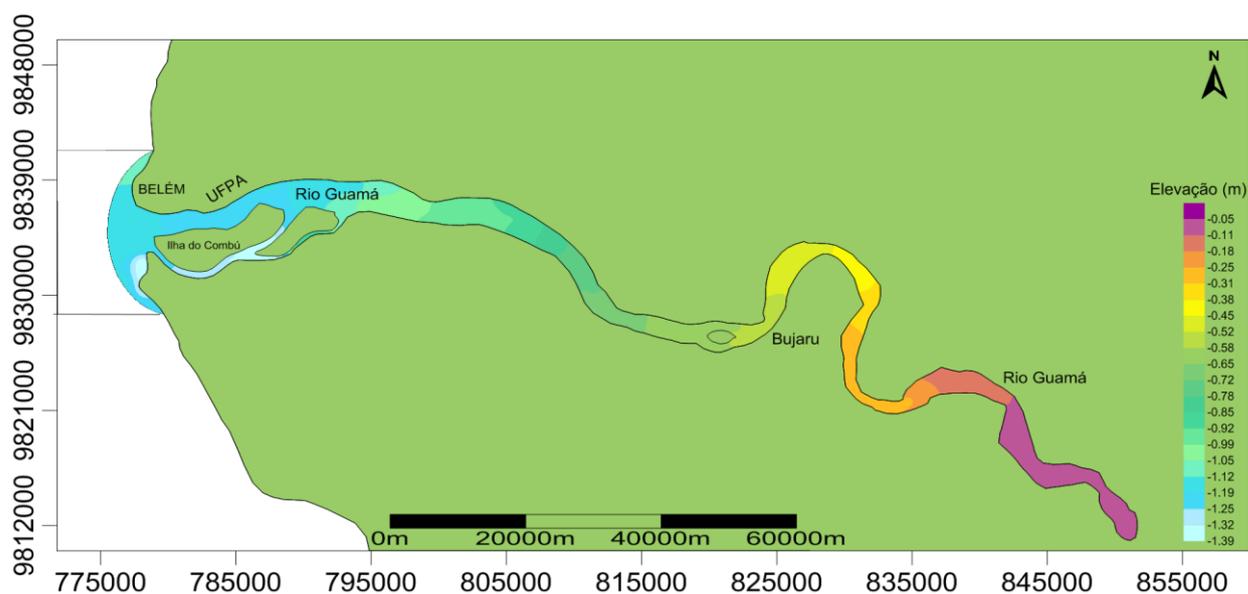


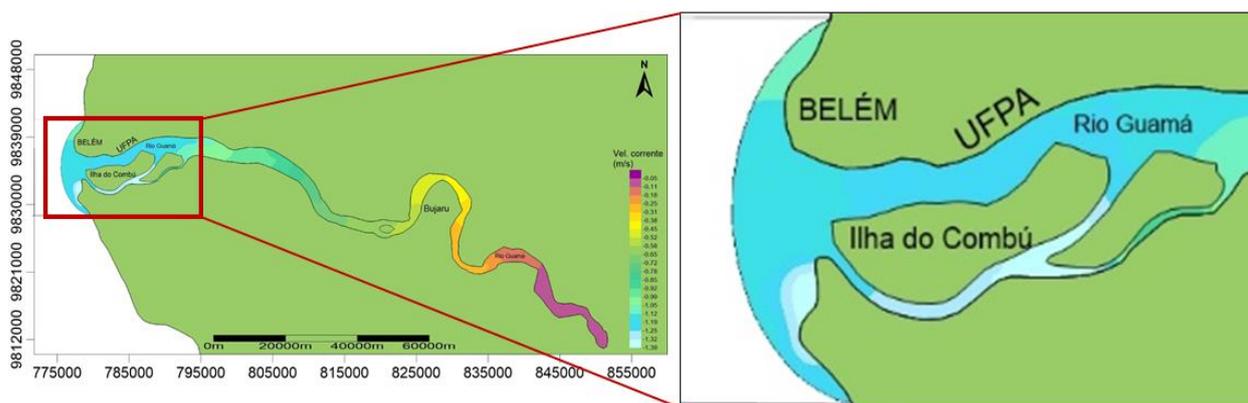
Figura 54 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.

### 9.1.4 Simulação 4 (Estofa de Baixa mar)

A simulação 4 ocorre no estofa de baixamar de sizígia sendo representado pelo triângulo amarelo, no instante 853.200s. Neste instante (baixa-mar) as velocidades das correntes de maré são menores ao longo do estuário do rio Guamá. Estas, em sua maioria, variam de 0 m/s a 0.37 m/s principalmente na parte onde não se encontra o talvegue, e esta baixa velocidade caracteriza o estofa de baixa mar.



**Figura 55 - Padrão de elevação gerado pela simulação 4 (estofa de baixa mar), neste instante a elevação fica uniforme em vários perímetros do domínio do estuário do rio Guamá próximo à UFPA, com pouca diferença de elevação até Bujaru.**



**Figura 56 - Elevação (m) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 1 do estuário do rio Guamá.**

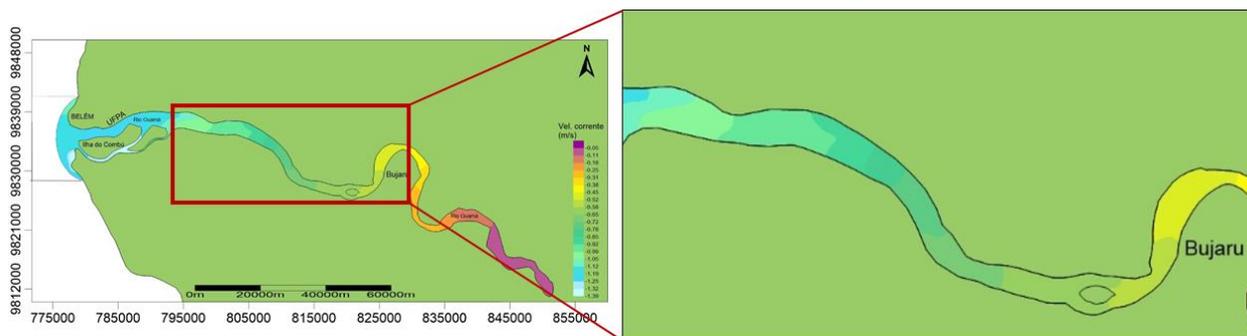


Figura 57 - Elevação (m) - Estofa de baixa mar de sizigia no área 2 do estuário do rio Guamá.

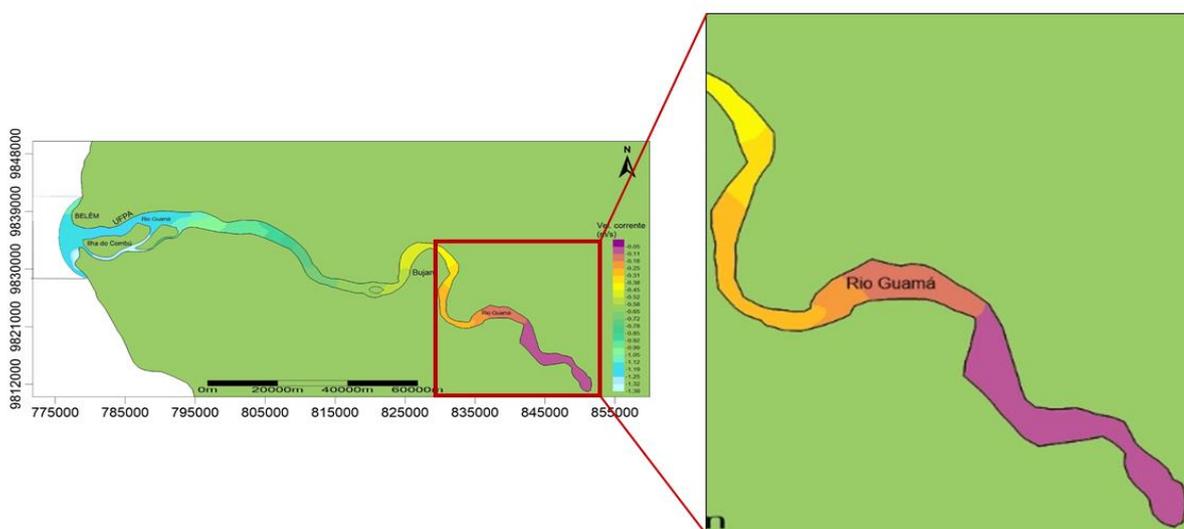


Figura 58 - Elevação (m) - Estofa de baixa mar de sizigia na área 3 do estuário do rio Guamá.

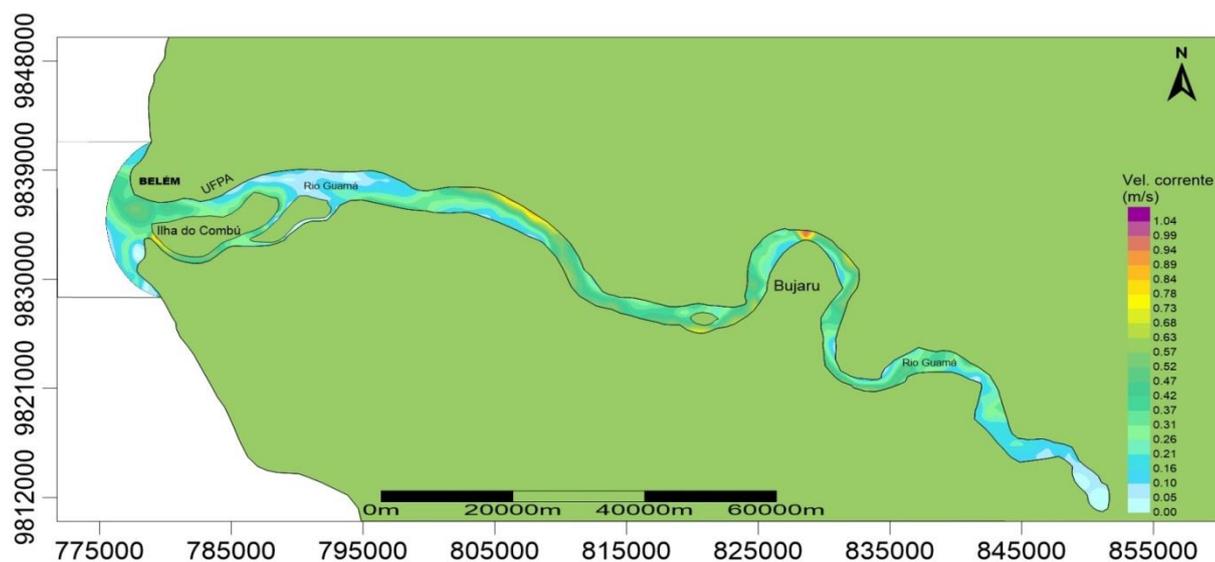


Figura 59 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estofa de baixamar de sizigia. No momento do estofa de preamar as velocidades estão entre 0 m/s a 0,37 m/s ao longo do estuário do rio Guamá.

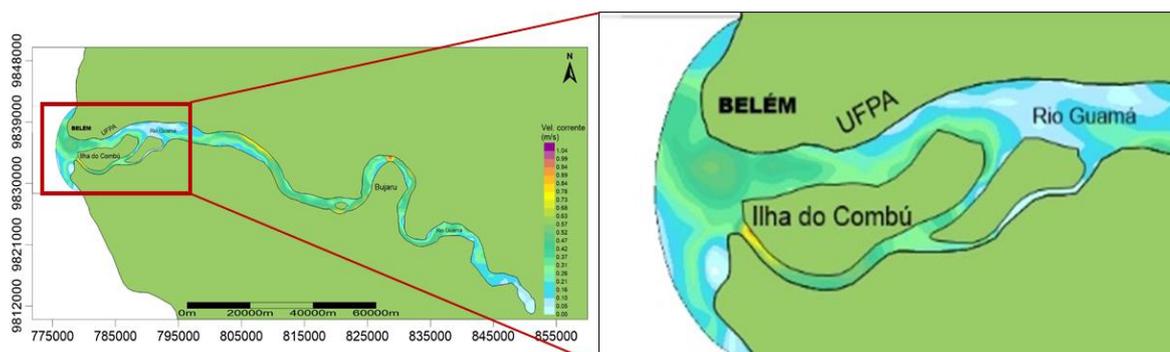


Figura 60 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixa mar de sizígia no área 1 do estuário do rio Guamá.

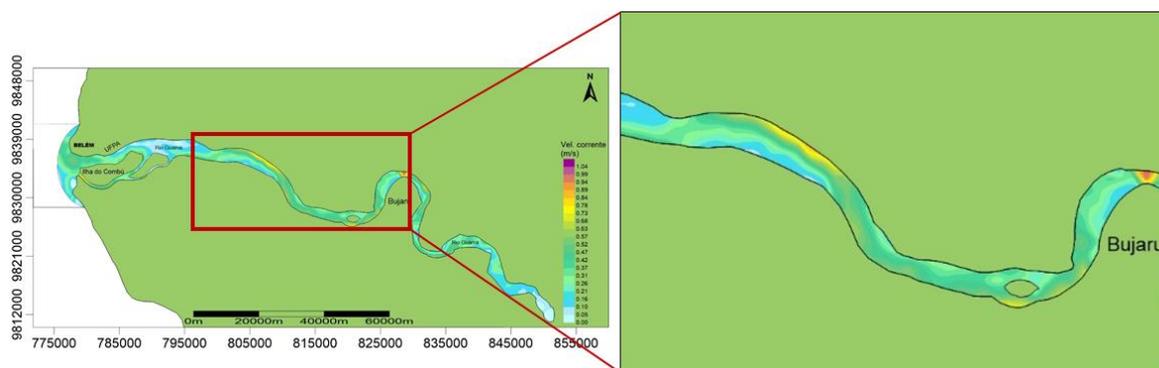


Figura 61 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 2 do estuário do rio Guamá.

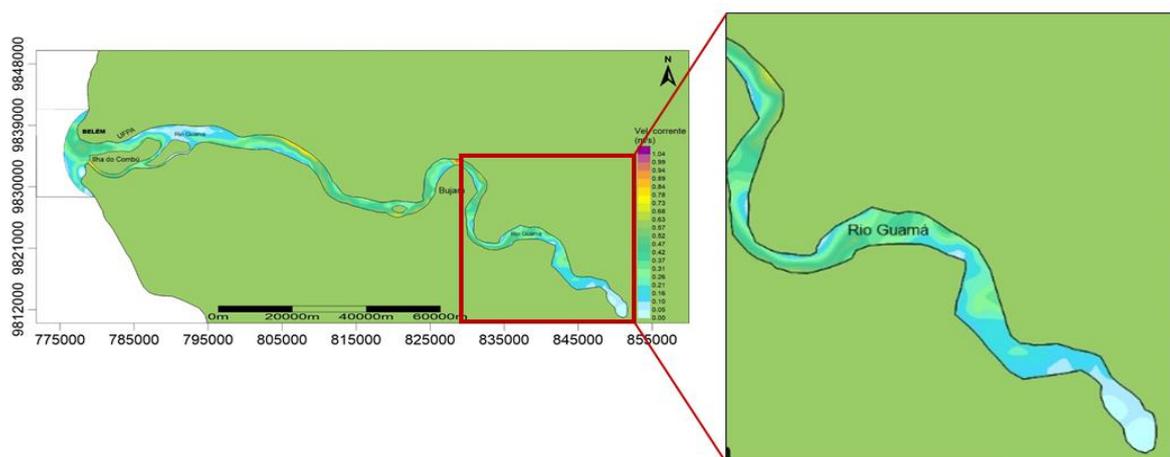


Figura 62 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixa mar de sizígia na área 3 do estuário do rio Guamá.

## 9.2 Maré de Quadratura

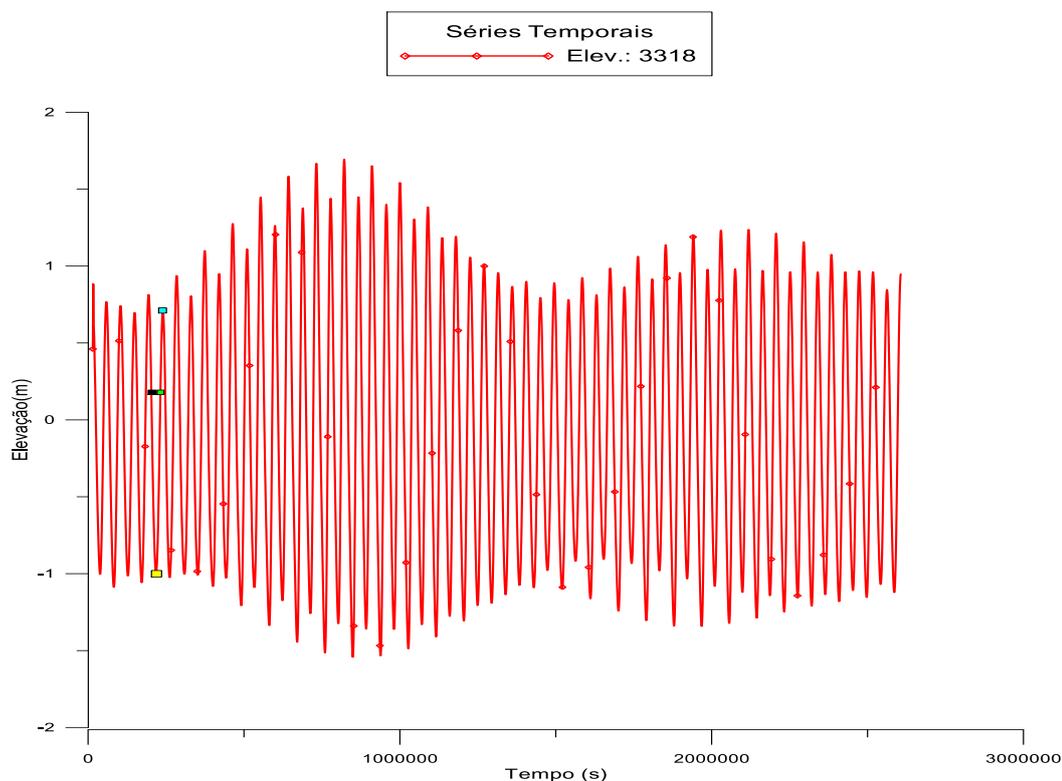


Figura 63 - Instante de maré de quadratura (meia maré enchente, estofo de preamar, meia maré vazante, estofo de baixamar) representado pelos retângulos (preto, amarelo, verde e azul).

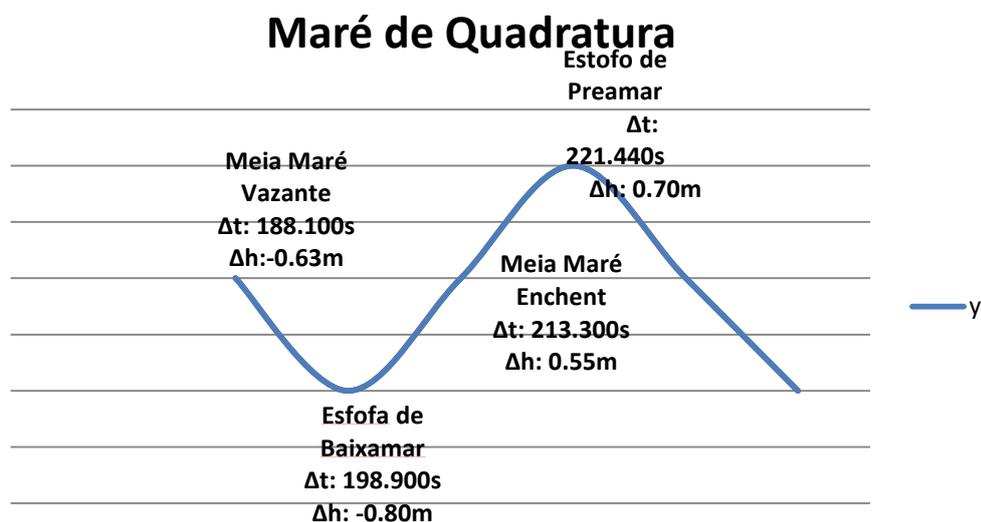


Gráfico - Ilustração dos valores máximos e mínimos do ciclo de maré obtidos durante a maré de quadratura.

### 9.2.1 Simulação 5 (Meia Maré Vazante)

A análise hidrodinâmica da simulação 5 se dá durante um período de meia maré vazante de quadratura (quadrado preto, Figura 63) aconteceu no instante 188.100s. Ocorre um escoamento em direção à baía de Guajará, caracterizando assim uma maré vazante. Em comparação com a meia maré vazante de sizígia, a meia maré vazante de quadratura, fica menor que a de sizígia. A mesma situação se repete na simulação gerada no momento de meia maré vazante de sizígia, onde as correntes de maré apresentam uma maior velocidade na orla da UFPA.

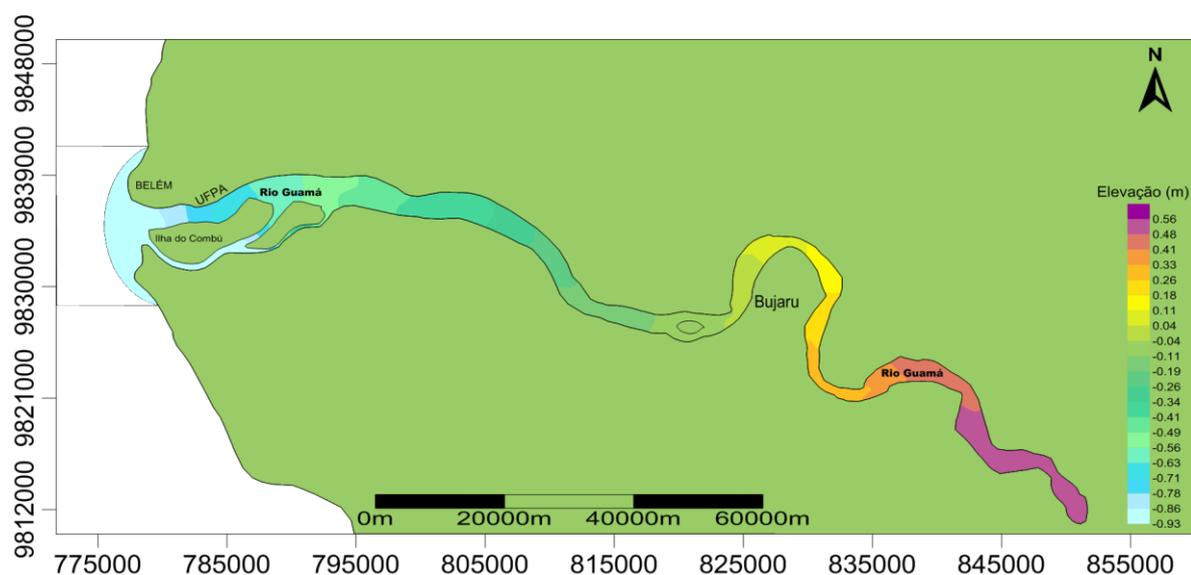


Figura 64 - Padrão de elevação gerado pela simulação 5 (meia maré vazante), observar o detalhamento das faixas de elevação devido ao fato da maré estar vazando, tem-se, um movimento grande de massa d'água próximo à UFPA em direção a Baía de Guajará.

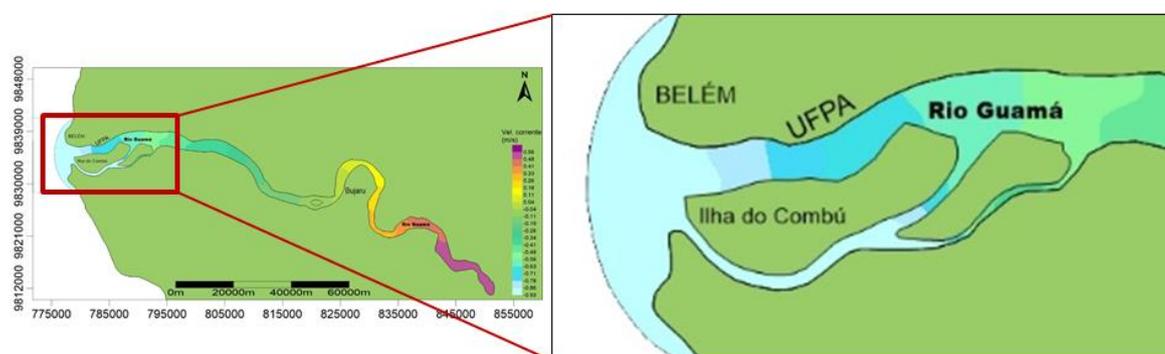


Figura 65 - Elevação (m) - Meia maré vazante de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.

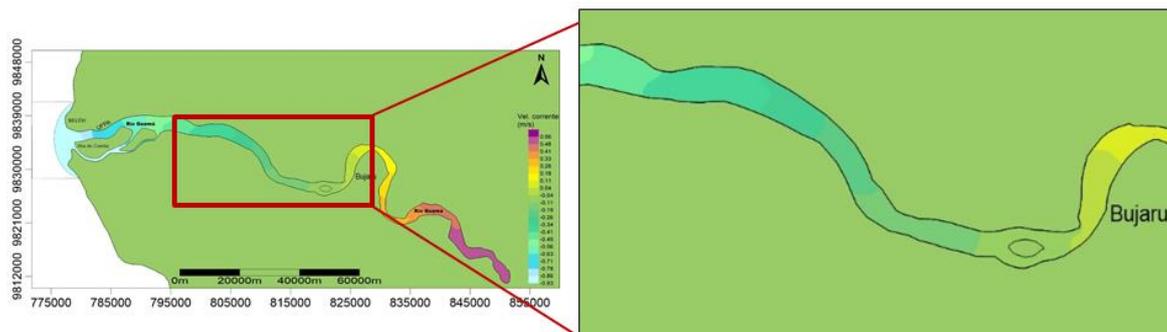


Figura 66 - Elevação (m) - Meia maré vazante de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.

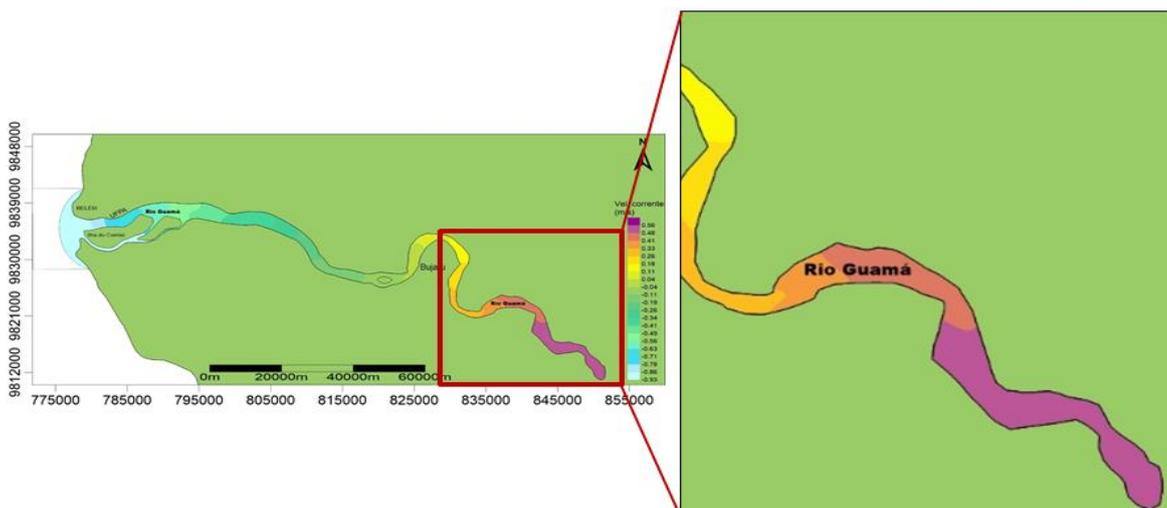


Figura 67- Elevação (m) - Meia maré vazante de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.

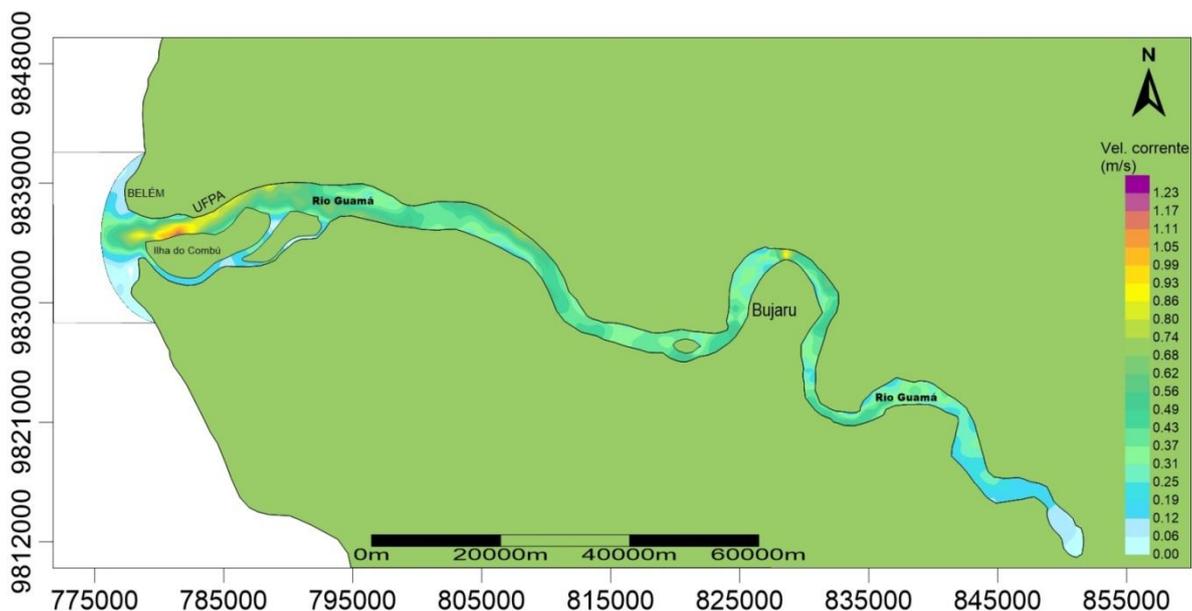
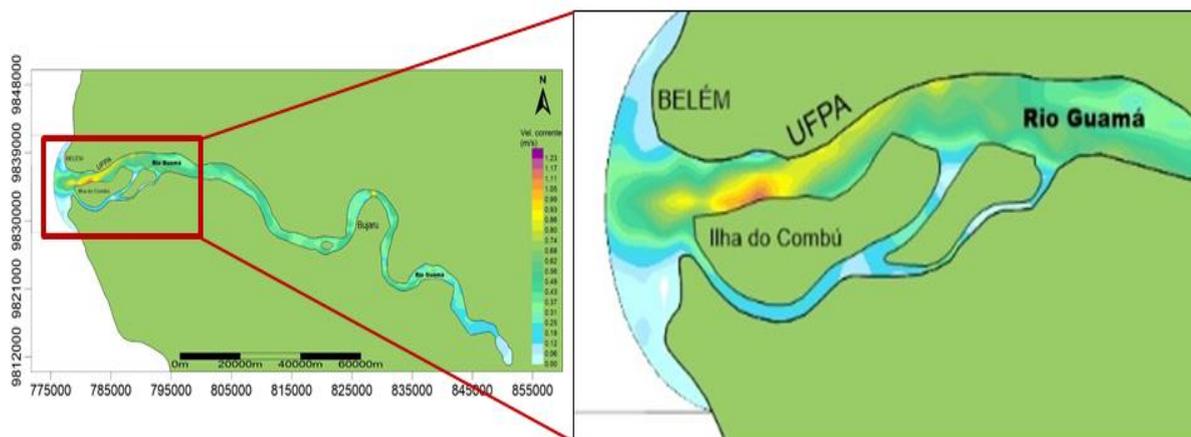
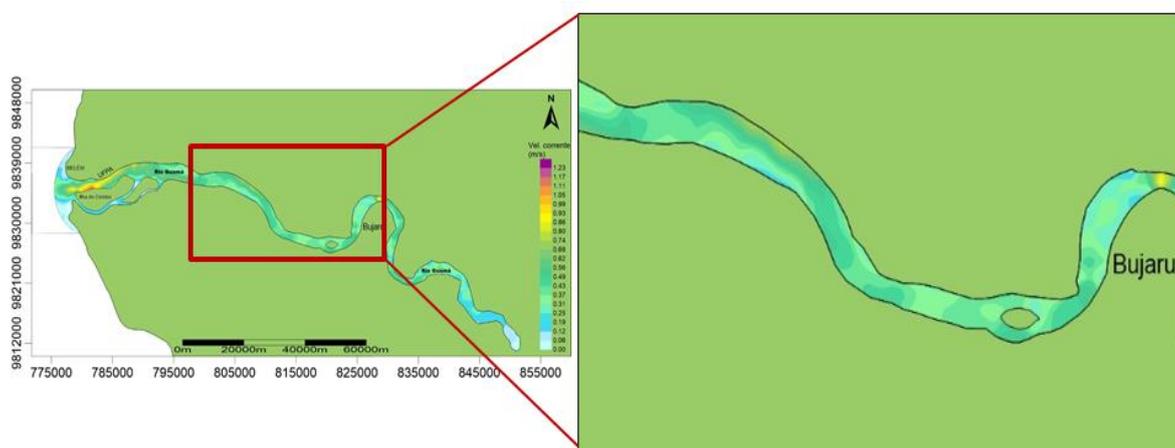


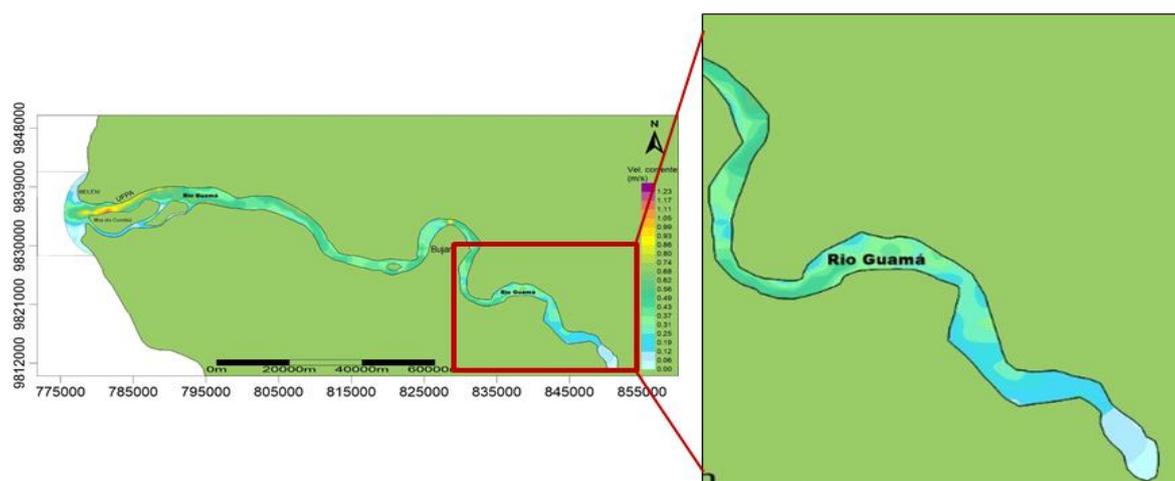
Figura 68 - Observar a similaridade na simulação durante a meia maré vazante de sizígia, uma vez que a maior velocidade das correntes de maré concentra-se na orla da UFPA.



**Figura 69 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.**



**Figura 70 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.**



**Figura 71 - Velocidade (m/s) - Meia maré vazante de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.**

### 9.2.2 Simulação 6 (Estofa de baixa mar)

Nesta simulação durante o estofa de baixamar de quadratura indicada pelo quadrado amarelo, na figura 63, no instante 198.900s, a elevação tem pouca variação no estuário do rio Guamá. Por se tratar de um estofa de baixamar, a velocidade das correntes de maré são nulas ou muito baixas, principalmente na área rasa do canal. A velocidade das correntes de marém sua maioria variam de 0.0 m/s à 0.35 m/s. Ocorre uma inversão das correntes de maré provavelmente relacionado com a grande extensão do estuário do rio Guamá.

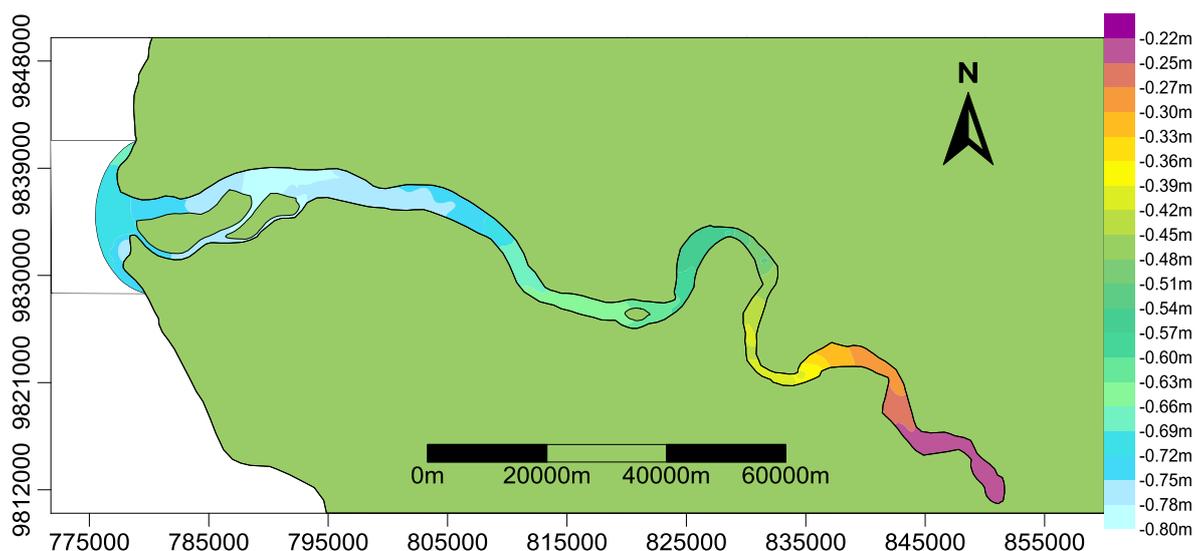


Figura 72 - A elevação da altura d'água tem pouca variação no estuário do rio Guamá, o que caracteriza um estofa de baixa mar.

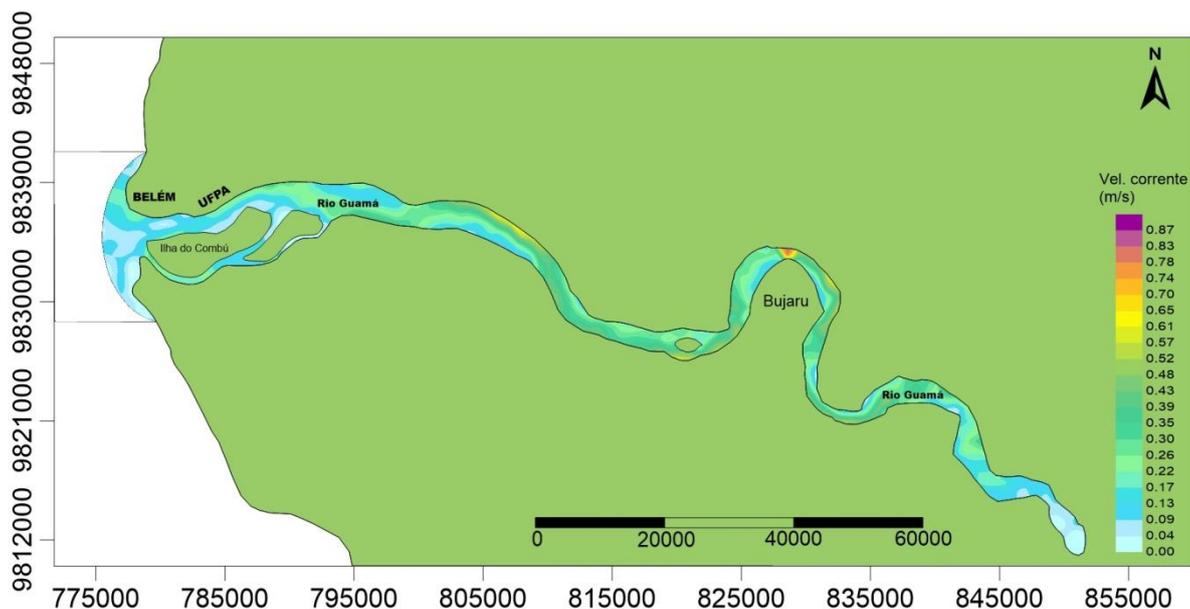


Figura 73 - Padrão de velocidade no estofa de baixamar de quadratura. Neste instante a velocidade das correntes de maré estão entre 0 m/s a 0.35 m/s.

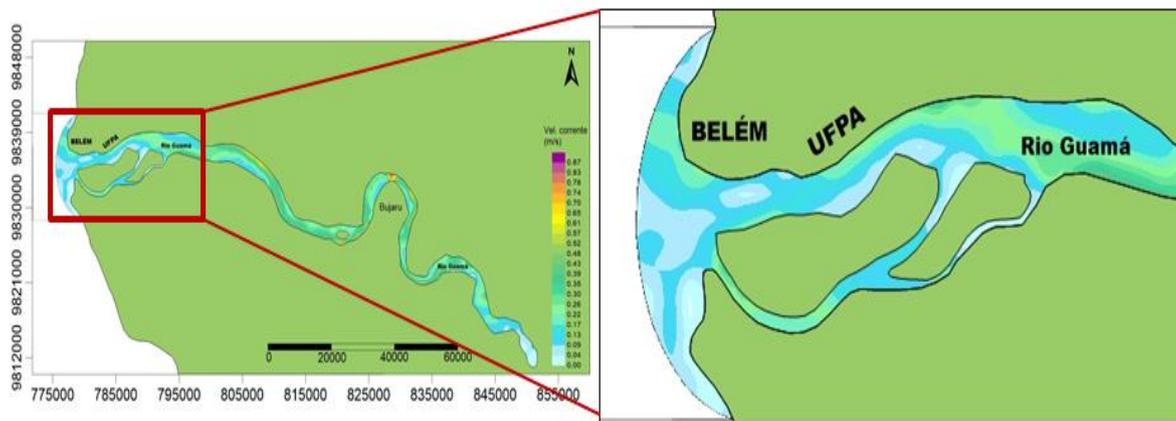


Figura 74 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixamar de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.

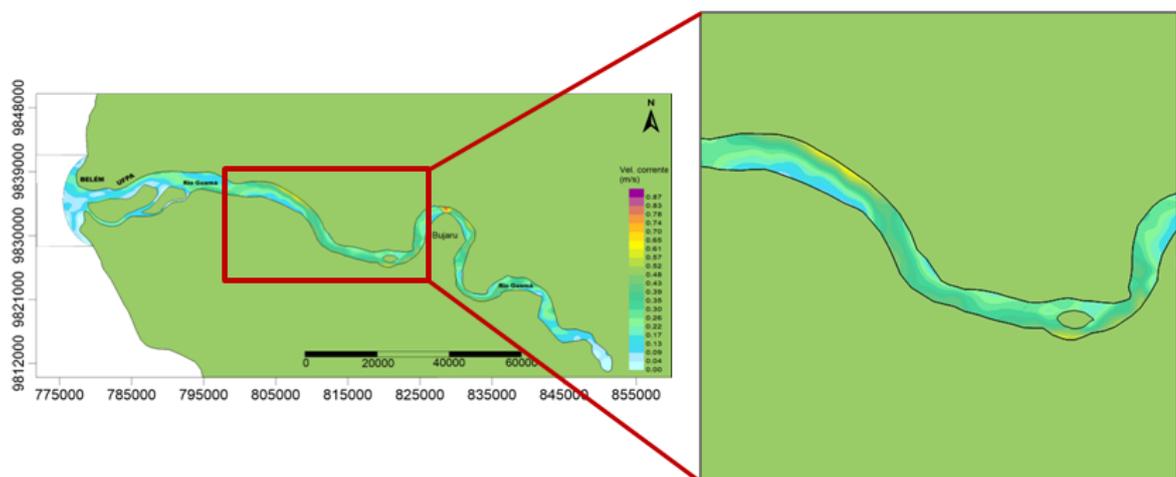


Figura 75 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixamar de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.

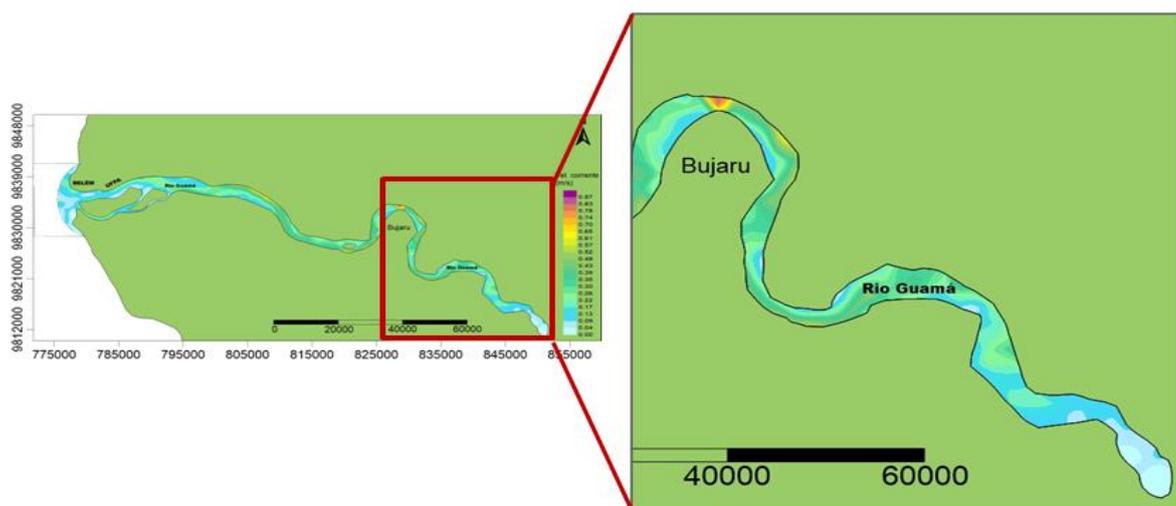


Figura 76 - Velocidade (m/s) - Estofa de baixamar de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.

### 9.2.3 Simulação 7 (Meia Maré Enchente)

A simulação 7, indicada pelo quadrado azul, ocorreu durante o período de meia maré enchente no instante 213.300s. As maiores variações de elevação foram observadas neste instante e, por conseguinte, uma maior velocidade. A parte mais elevada do estuário adentra este para eventualmente formar-se um estofo de preamar.

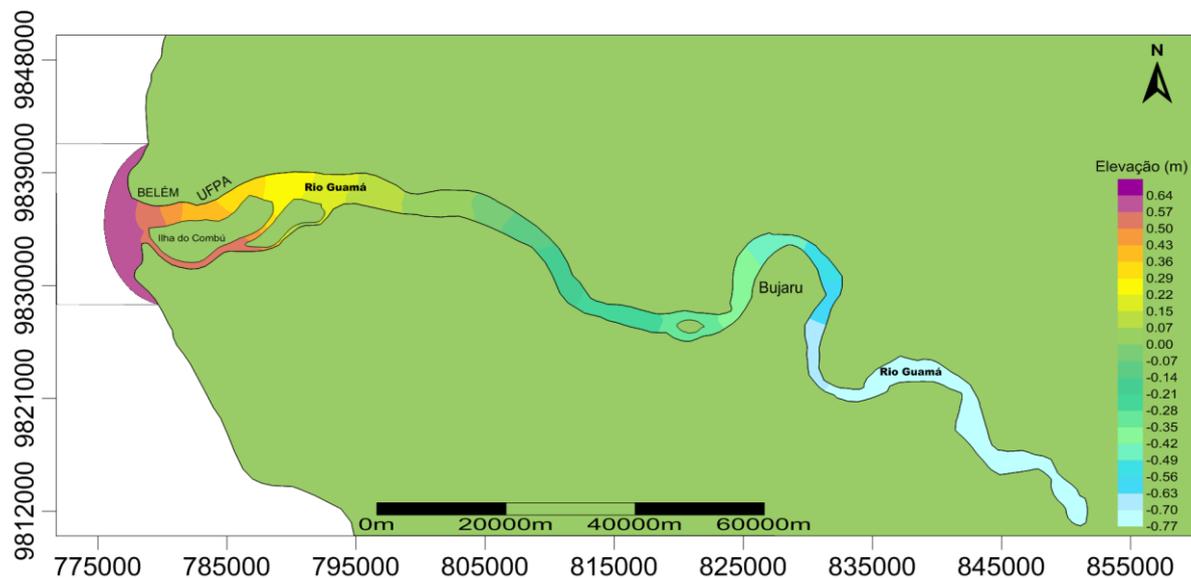


Figura 77 - Padrão de elevação gerado pela simulação 7 (meia maré enchente), observar que neste instante a elevação da altura de maré fica uniforme em vários perímetros do domínio do estuário do rio Guamá, caracterizando assim o momento de estofo.

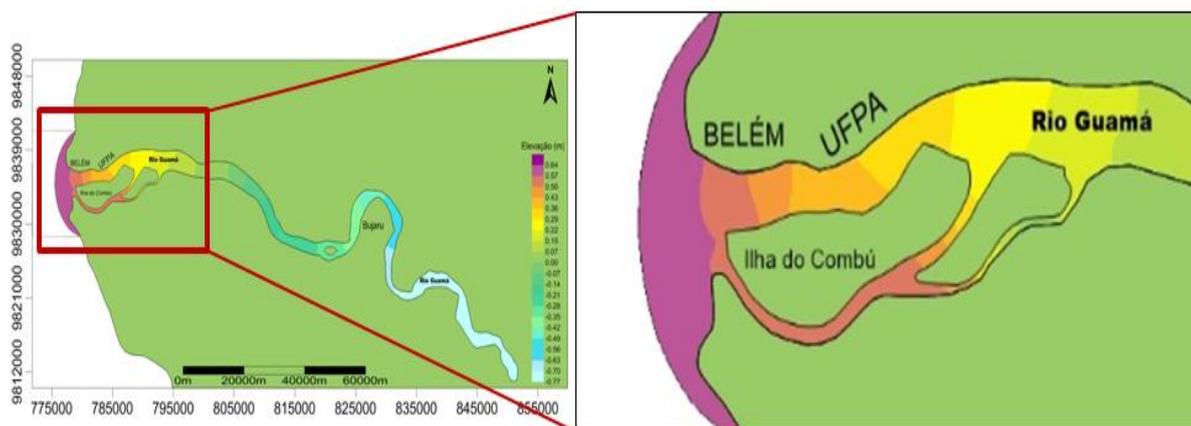


Figura 78 - Elevação (m) - Meia maré enchente de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.

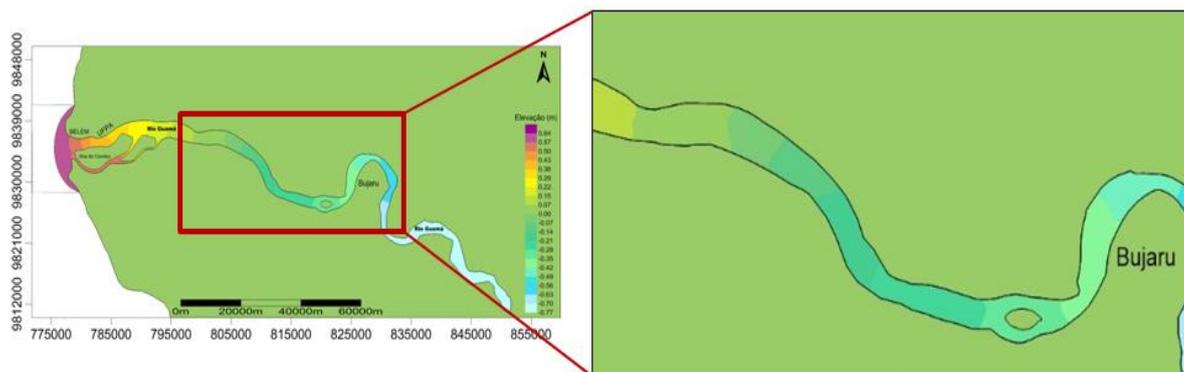


Figura 79 - Elevação (m) - Meia maré enchente de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.

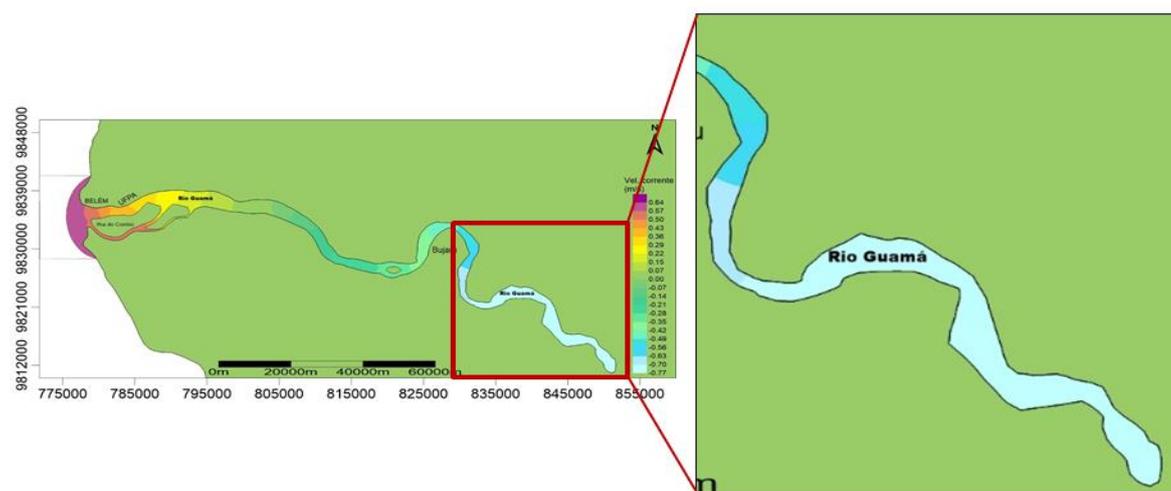


Figura 80 - Elevação (m) - Meia maré enchente de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.

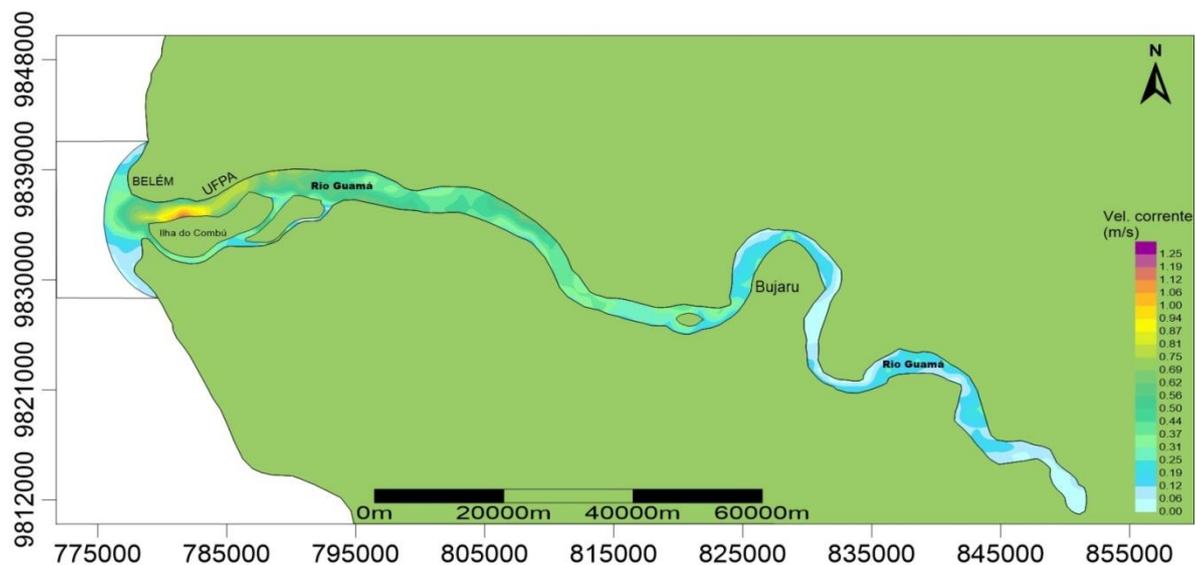


Figura 81 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estófo de preamarde quadratura. Neste instante pode-se verificar que no estófo de preamar os valores da velocidade das correntes de maré estão na sua maioria entre 0 m/s e 0.17 m/s.

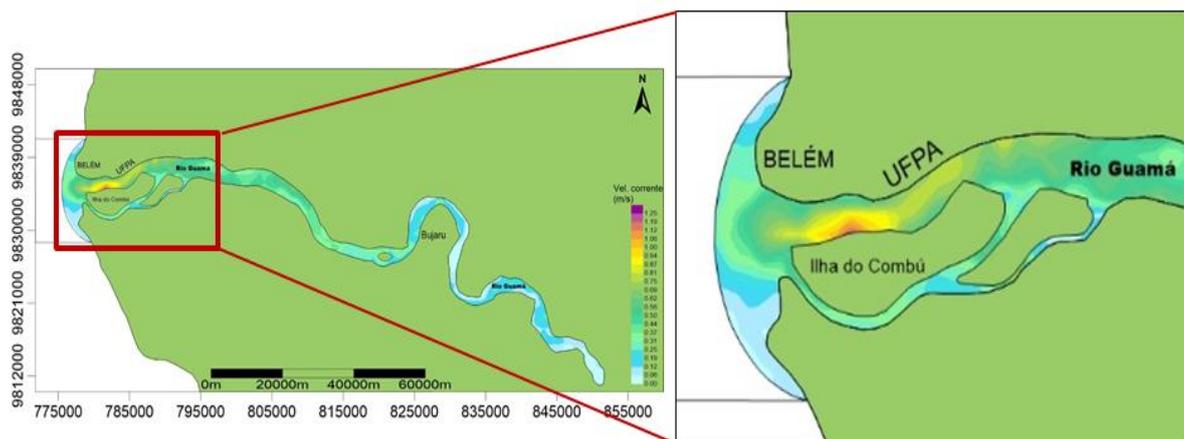


Figura 82 - Velocidade (m/s) – Meia maré enchente de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.

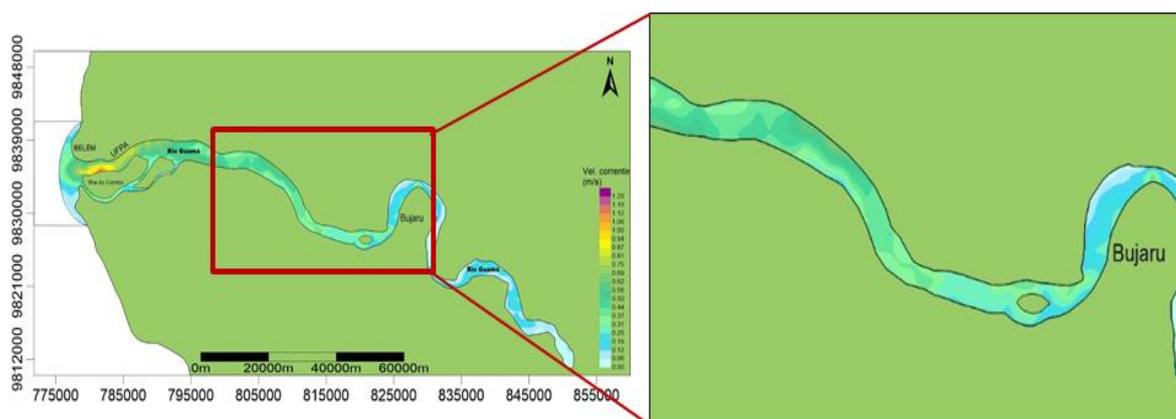


Figura 83 - Velocidade (m/s) – Meia maré enchente de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá.

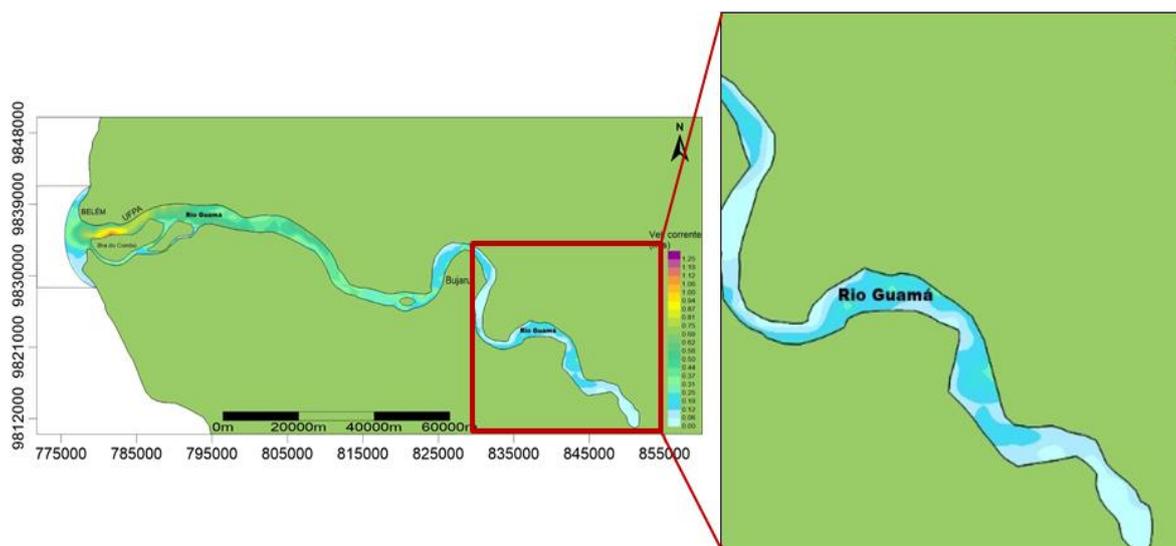


Figura 84 - Velocidade (m/s) – Meia maré enchente de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.

### 9.2.4 Simulação 8 (Estofa de Preamar)

Para a maré de quadratura, a simulação 8 se deu no instante 221.400s, durante o estofa de preamar de quadratura. O momento da modelagem é indicado pelo quadrado verde (Figura 44), onde se pode observar que nesse instante ficou bem evidenciado o estofa de preamar uma vez que os valores de velocidade em sua maioria estão entre 0.0 m/s e 0.17 m/s e pouca variação na elevação da altura da maré.

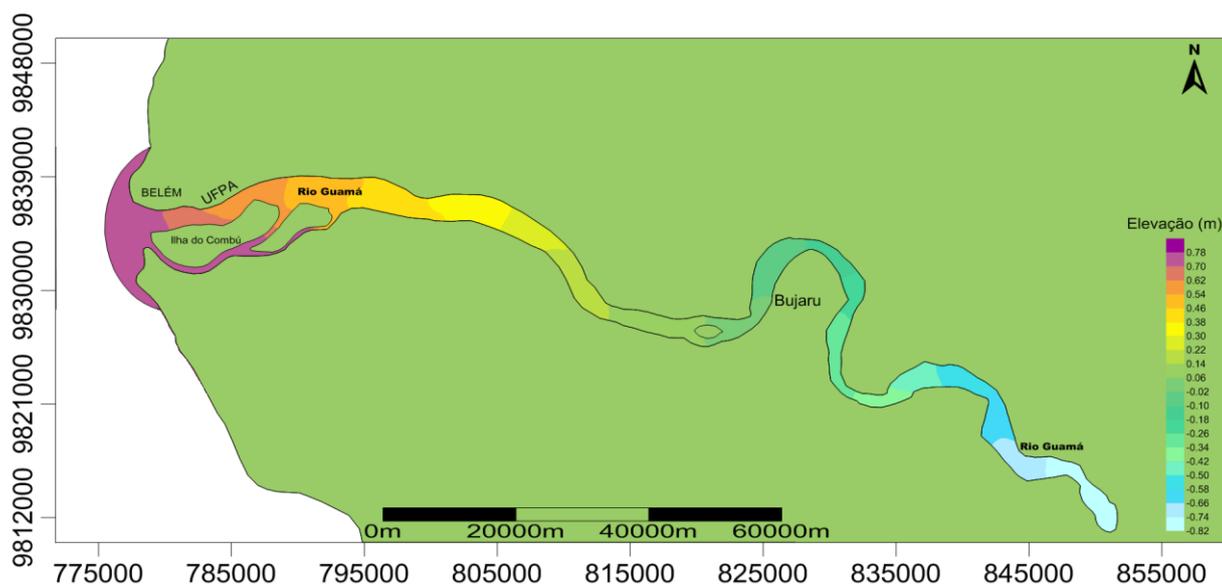


Figura 85 - Padrão de elevação gerado pela simulação 8 (estofa de preamar), neste instante a elevação fica uniforme em vários perímetros do domínio caracterizando assim o momento de estofa.

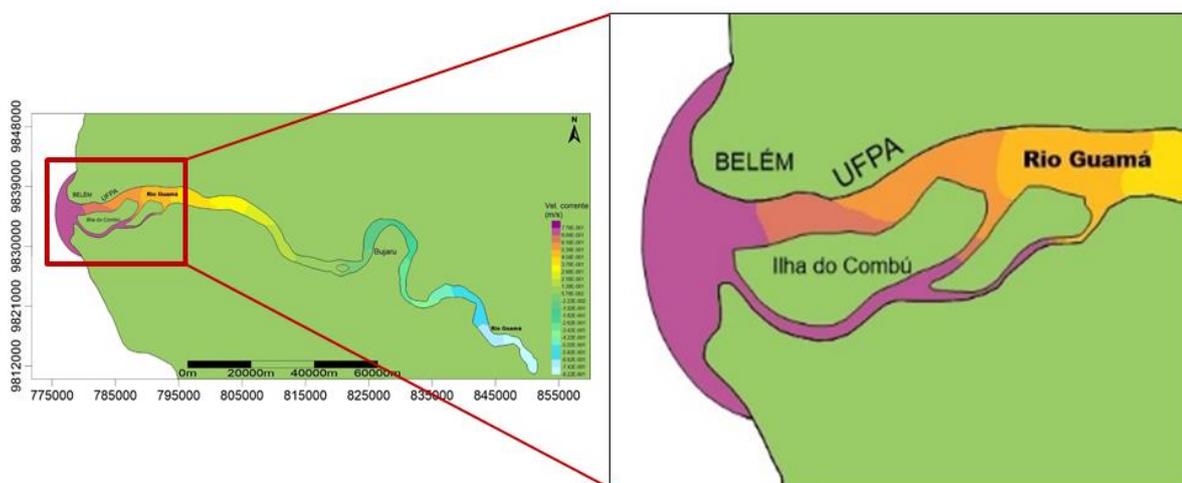


Figura 86 - Elevação(m) - Estofa de preamar de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá.

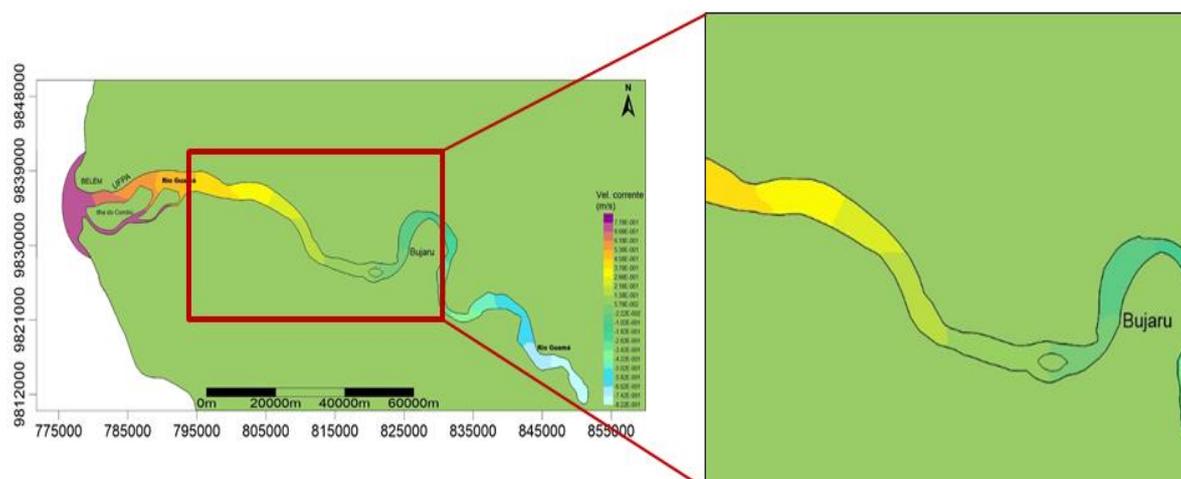


Figura 87- Elevação(m) - Estofa de preamar de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá

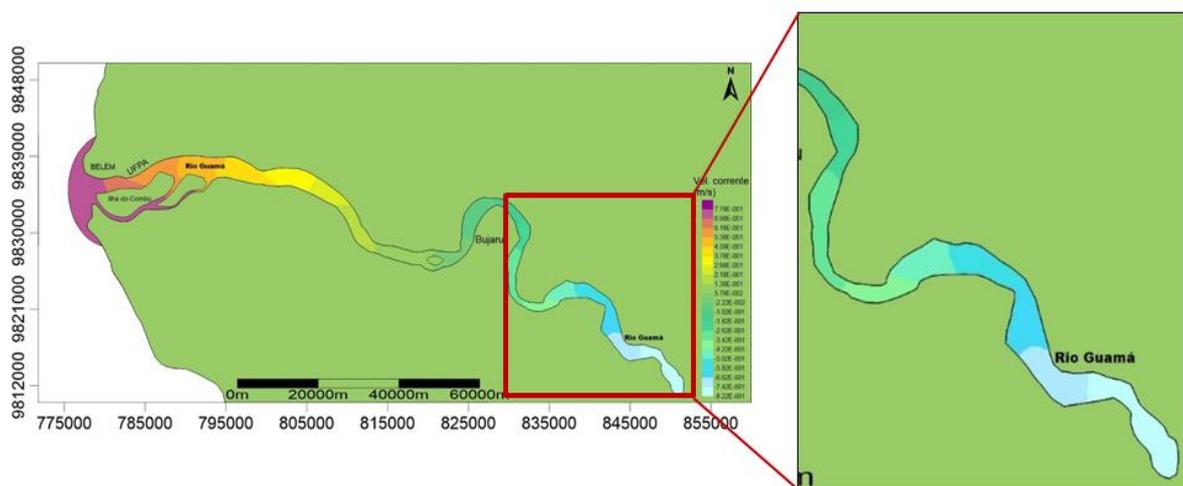


Figura 88 - Elevação(m) - Estofa de preamar de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá.

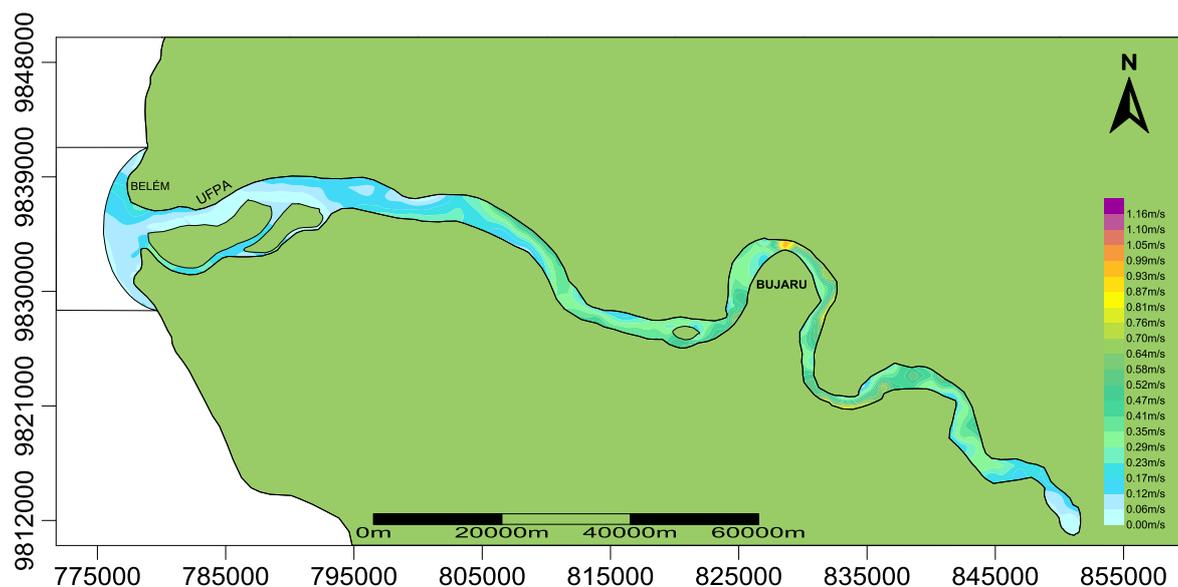


Figura 89 - Padrão de velocidade das correntes de maré no estófo de preamar durante a maré de quadratura. Neste momento as velocidades de correntes de maré estão na sua maioria entre 0 m/s e 0.17 m/s

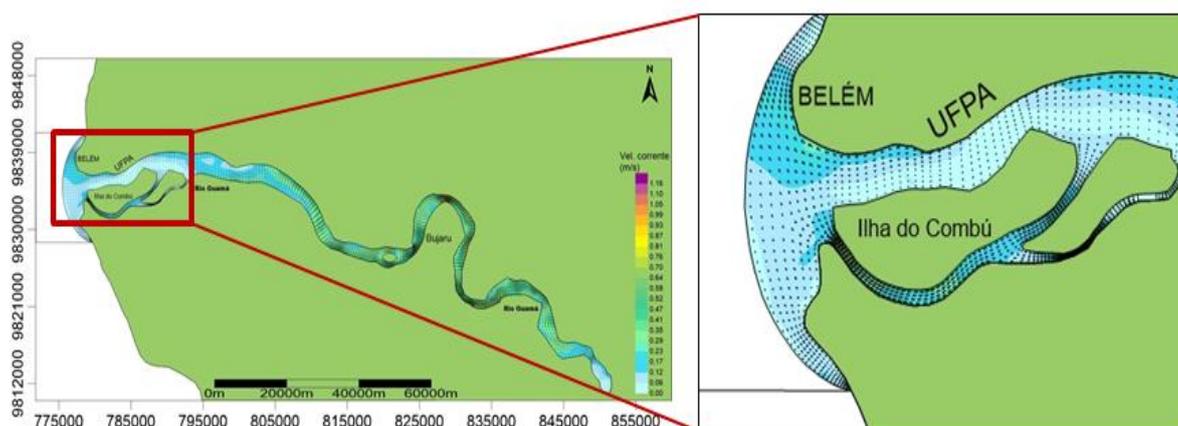


Figura 90 - Velocidade das correntes de maré durante o estófo de preamar de quadratura na área 1 do estuário do rio Guamá

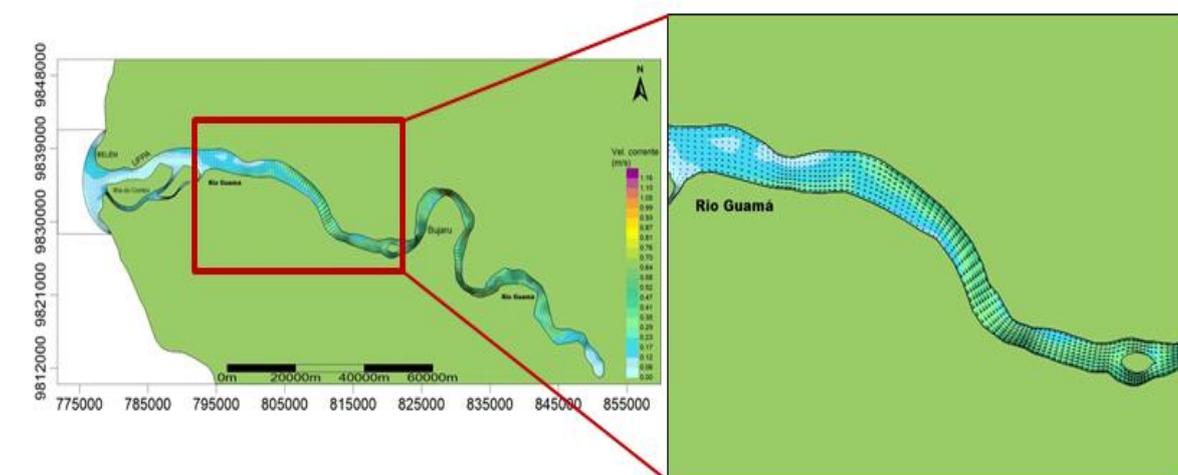


Figura 91 - Velocidade das correntes de maré durante o estófo de preamar de quadratura na área 2 do estuário do rio Guamá

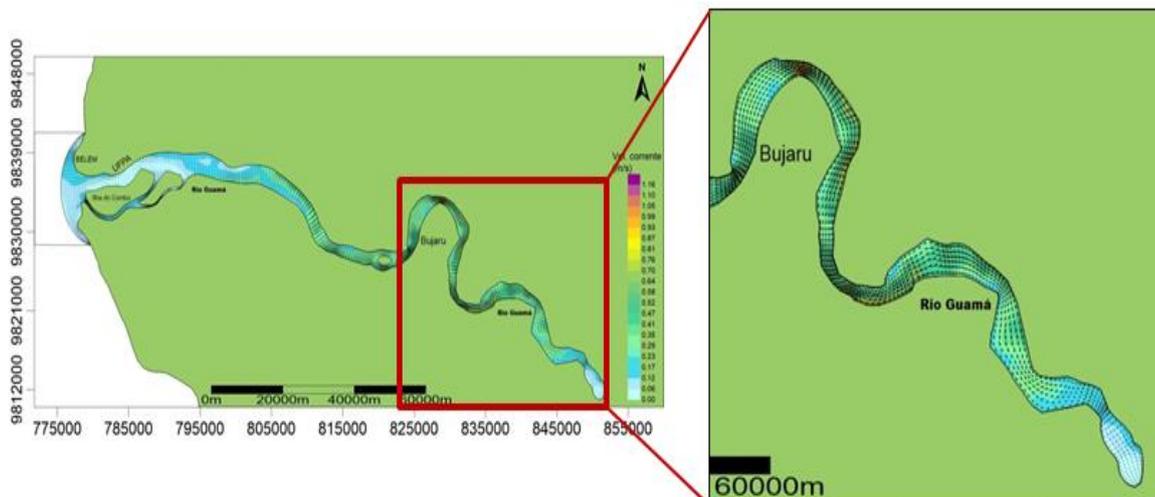


Figura 92 - Velocidade das correntes de maré durante o estófo de preamar de quadratura na área 3 do estuário do rio Guamá

### 9.3 Densidade energética a partir das correntes de maré

Segundo Fraenkel (2002, 2007), Myers e Bahaj (2005), umas das condições hidrodinâmicas para uma extração eficiente é a velocidade média da corrente maior que 1.1 m/s para extração.

Para facilitar a análise energética das correntes de maré, o estuário do rio Guamá foi subdividido em três áreas. Foram identificadas 7 áreas, em cada uma foram detectadas as correntes de maré acima da velocidade de 1,00 m/s.

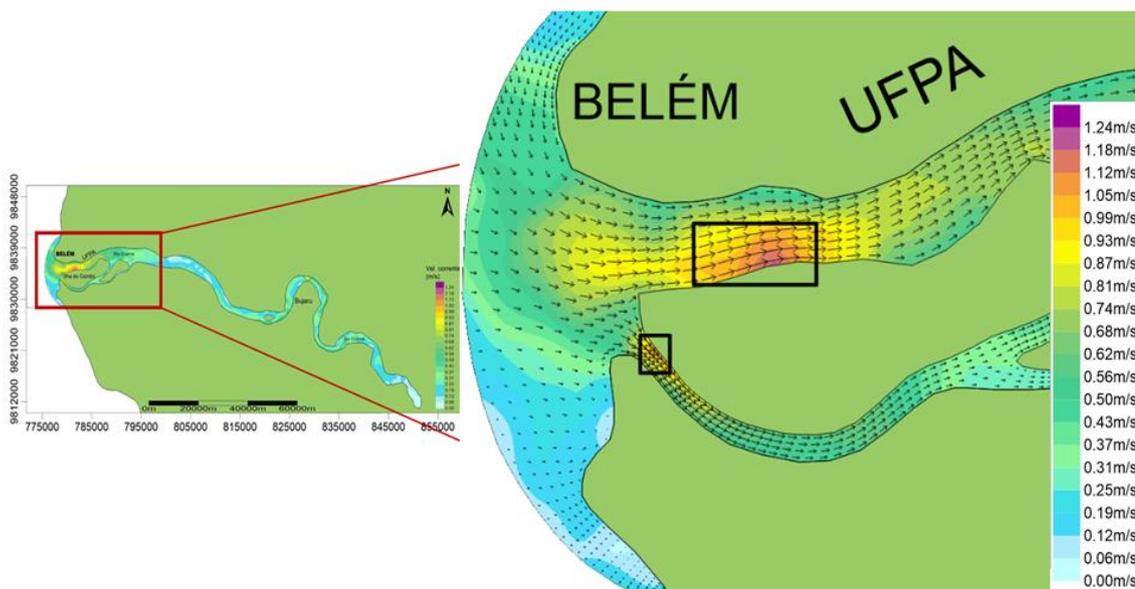
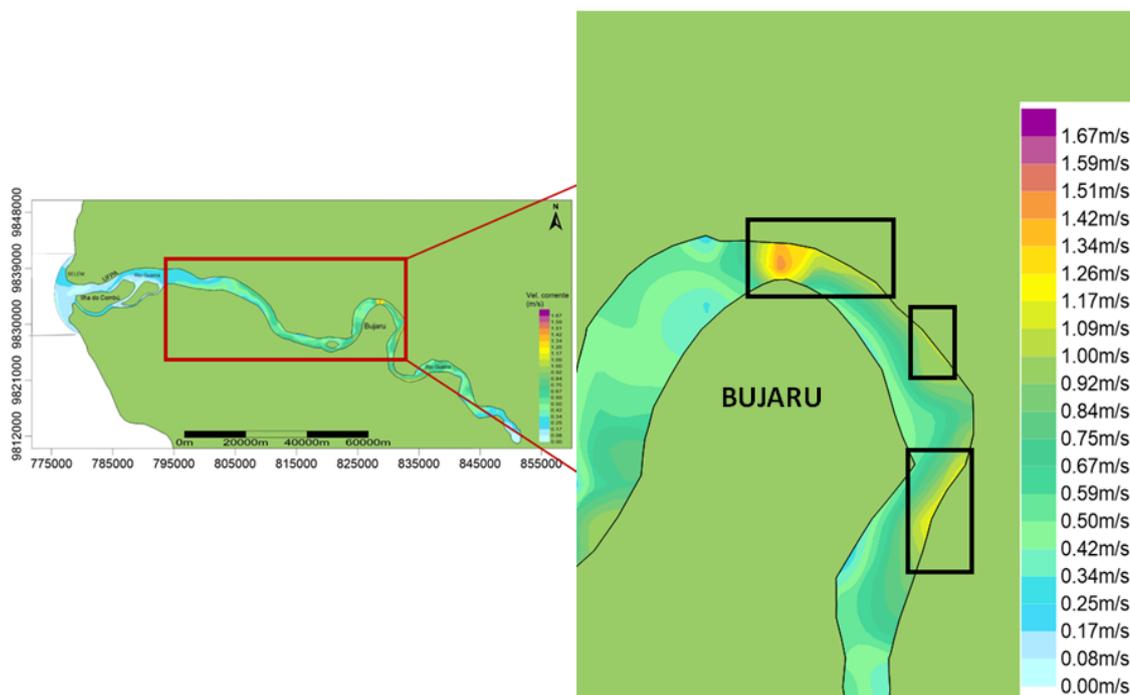
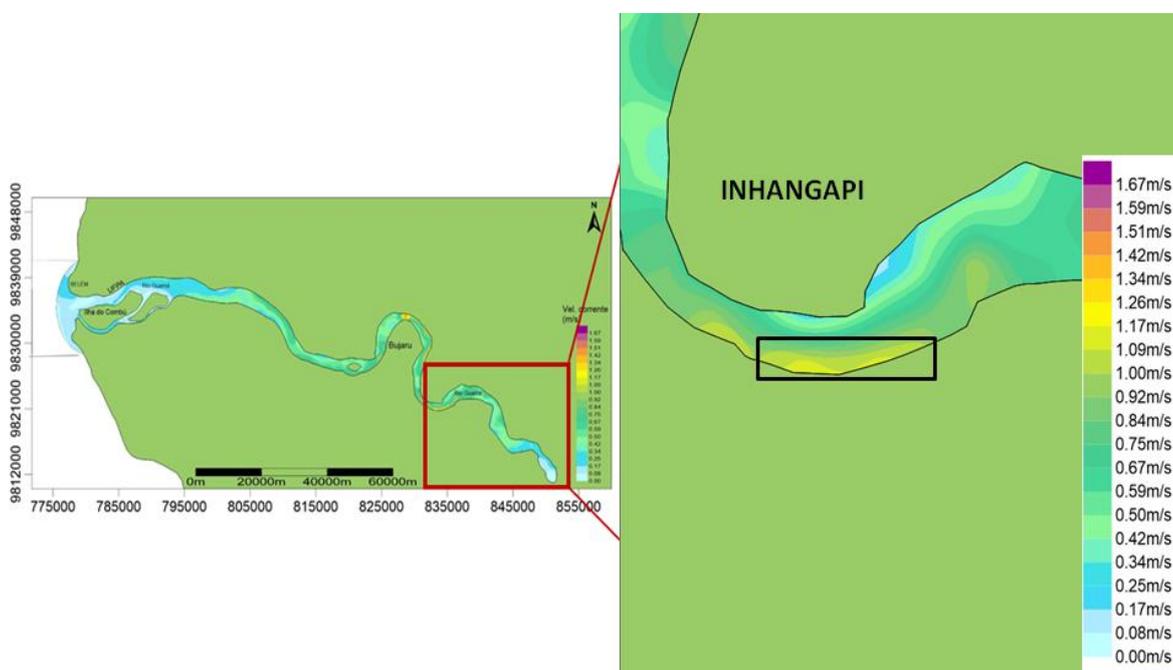


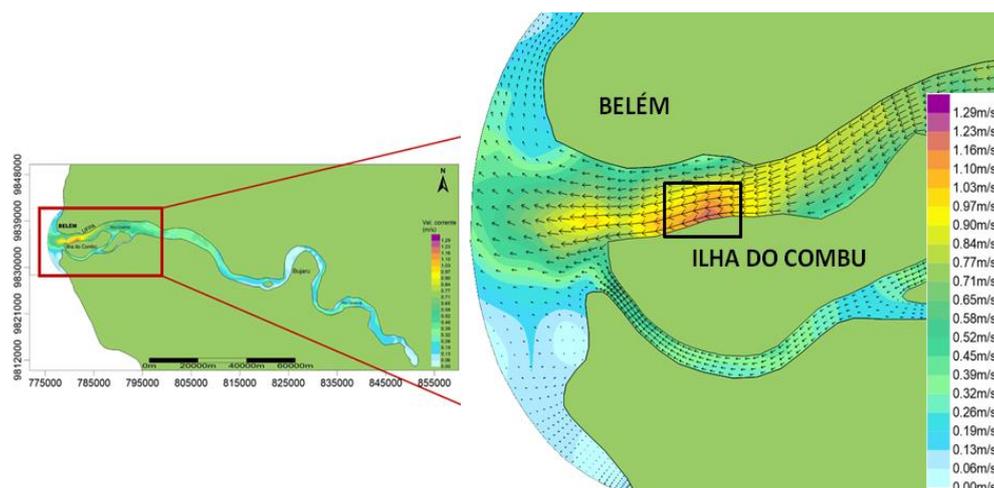
Figura 93 - Na área 1 da simulação 1 (meia maré enchente), durante a maré de sizígia os vetores mostram uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.24 m/s na área indicada pelos retângulos.



**Figura 94 - Na área 2 da simulação 2 (estofo de preamar), durante a maré de sizígiamostra uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.47 m/s.**

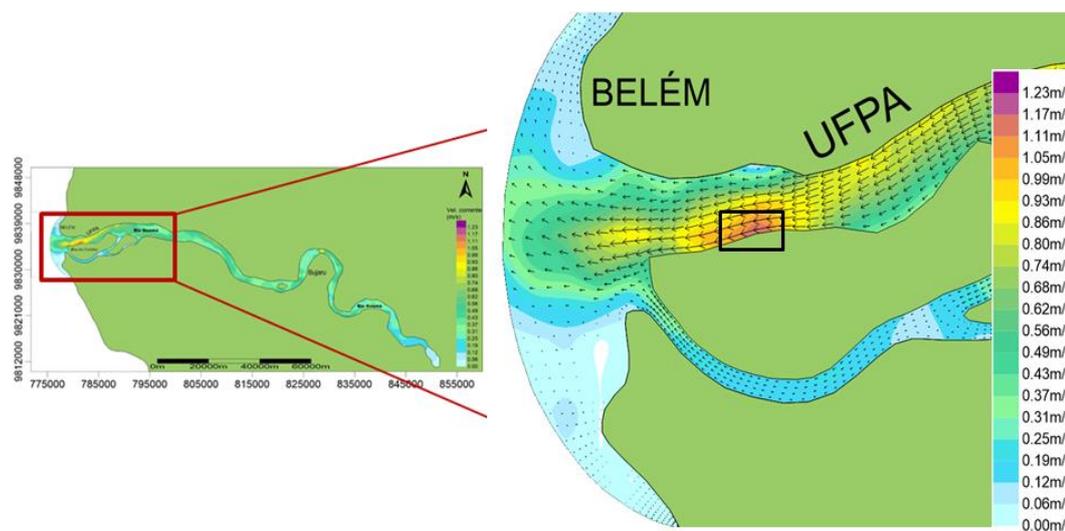


**Figura 95 - Na área 3 da simulação 2 (estofo de preamar), durante a maré de sizígia há uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.12 m/s.**



**Figura 96 - Na área 1 da simulação 3 (meia maré vazante), durante a maré de sizígia os vetores mostram uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.21 m/.**

Na simulação 4 (estofa de baixamar), durante a maré de sizígia, não houve corrente com velocidade acima de 1.00 m/s.



**Figura 97 - Na área 1 da simulação 5 (meia maré vazante), durante a maré de quadratura os vetores mostram uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.16 m/s.**

Na área 1 da simulação 6 (estofa de baixamar) durante a maré de quadratura, não houve corrente com velocidade acima de 1.00 m/s.

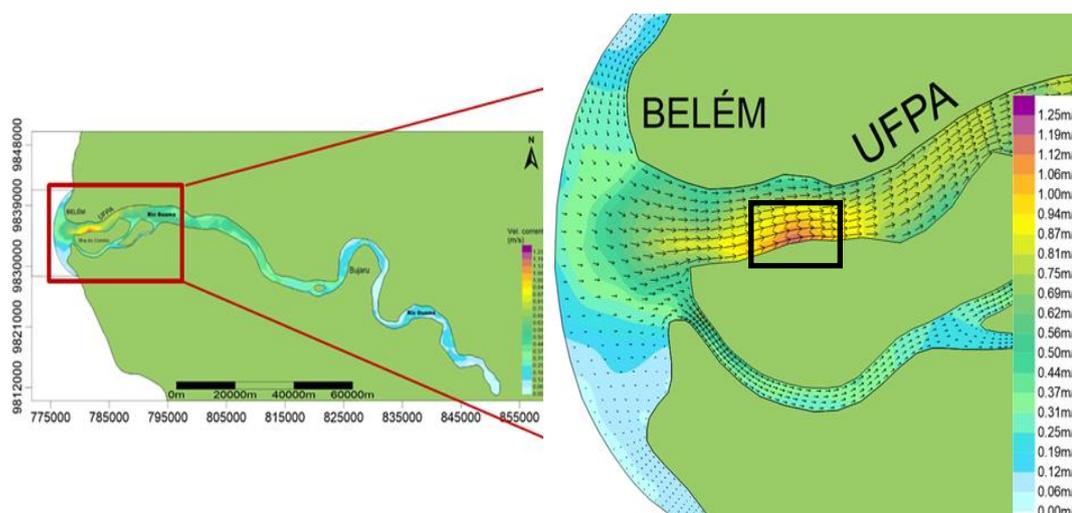


Figura 98 - Área 1 do estuário do rio Guamá da simulação 7 (meia maré enchente). Nesta simulação durante a maré de quadratura os vetores na área indicada pelos retângulos uma corrente que varia de 1.01 m/s à 1.17 m/s.

Na simulação 8 (estofa de preamar) durante a maré de quadratura, não houve correntes com velocidade acima de 1.00 m/s.

A densidade energética é calculada a partir da equação 1, as tabelas 10 e 11 mostram a densidade em cada uma das áreas detectadas acima, considerando a densidade da água ( $\rho$ ) igual a 1000 kg/m<sup>3</sup> (água doce) nas marés de sizígia e quadratura:

Tabela 10 - Velocidade e densidade energética das simulações na maré de sizígia nas áreas com potenciais energéticos.

MARÉ DE SIZÍGIA			
ÁREA	SIMULAÇÃO	VELOCIDADE (m/s)	DENSIDADE ENERGÉTICA (W/m <sup>2</sup> )
1	MEIA MARÉ ENCHENTE (1)	1.24	955
2	ESTOFA DE PREAMAR (2)	1.47	1590
3	ESTOFA DE PREAMAR (2)	1.12	700
1	MEIA MARÉ VAZANTE (3)	1.21	885

Tabela 11 - Velocidade e densidade energética das simulações na maré de quadratura nas áreas com potenciais energéticos.

MARÉ DE QUADRATURA			
ÁREA	SIMULAÇÃO	VELOCIDADE (m/s)	DENSIDADE ENERGÉTICA (W/m <sup>2</sup> )
1	MEIA MARÉ VAZANTE (5)	1.16	780
1	MEIA MARÉ ENCHENTE (7)	1.17	500

Para captar energia das marés, usam-se os CEHs que podem estar dispostos em filas (Conversores de Energia Hidrocinética) chamadas fazendas, ou parques. Nestes projetos de parques de CEHs existe a dificuldade de resolver, conjuntamente, o campo hidrodinâmico

com o problema de posicionamento dos conversores. A otimização de localização de CEHs dentro de um parque acostuma-se fazer, diretamente, através de simulações computacionais da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). O objetivo deste tópico é identificar os pontos com potencial energético no domínio do estuário do rio Guamá e calcular a densidade energética. Anualmente a densidade energética das áreas acima é de 16.038.100 W/m<sup>2</sup>.

## 10. Conclusões

No presente trabalho propomos utilizamos a ferramenta de modelagem computacional como ferramenta para compreensão dos fenômenos ocorrentes no estuário do rio Guamá. O modelo utilizado nas simulações hidrodinâmicas foi o 2DH que utiliza como as dimensões (x, y, t) e foi considerado o mais adequado para este rio. A observação dos modelos gerados nas simulações auxilia nosso entendimento sobre as forças atuantes no sistema hidrodinâmico.

A importância da utilização do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SISBAHIA) foi indiscutível e contribuiu cientificamente para mostrar os padrões de circulação hidrodinâmica além de auxiliar para se escolher os pontos com potenciais energéticos. A performance do software na área de pesquisa foi satisfatória.

Observou-se que as maiores velocidades de corrente ao longo do estuário deram-se no período de meia maré vazante e meia maré enchente. Isto porque o momento de estofa de preamar e baixamar ocorrem quando após atingir seu máximo ou mínimo permanece um instante estacionado e depois por ação das forçantes, movimenta-se conforme o ciclo. O movimento da corrente gerado pelo software está consonante com as leis de Fargues e de acordo com as características batimétricas do estuário, bem como com os ciclos de maré.

A curva de elevação da maré medida em campo, durante 4 dias consecutivos teve seus valores variando no mínimo 0.51 metros e no máximo 3.6 metros, comparando com o resultado do modelo onde teve como resultado de elevação de maré mínima 0.5872 e máxima de 3.6187. Ao comparar os gráficos de elevação e calcular EQM, percebe-se que devida a uma pequena diferença de fase o valor do Erro Quadrático Médio está um pouco acima do esperado, entretanto, não prejudicando o teor da pesquisa.

As marés medidas em campo e as geradas pelo modelo mostraram uma boa relação, uma vez que a oscilação das duas foi bastante similar. Em relação às velocidades geradas nas simulações, observamos que a região da orla da UFPA possui uma velocidade maior em relação aos outros pontos o que corrobora para a erosão da orla da Universidade que tem sido bastante estudada.

Em relação às velocidades de correntes geradas pelo modelo, estas estão dentro dos padrões do estuário do rio Guamá, uma vez que estão de acordo com a geomorfologia do estuário e com as fases de maré. Através das velocidades geradas pelo modelo, verificaram-se os locais com densidade energética mínima para se explorar maremotriz. Seis áreas com velocidade mínima (1,1 m/s) foram identificadas.

Uma vez que há locais no rio com potencial energético, o estuário do rio Guamá tem um potencial extraível, entretanto, o tipo de tecnologia que pode ser utilizada para explorar este potencial energético, deve levar em consideração as peculiaridades deste estuário, tais como a profundidade, o transporte e tipo de sedimento, a geomorfologia a navegação, além da poluição que há no fundo do estuário. Um estudo bem detalhado desses parâmetros deve ser feito para que não haja dúvida quanto à tecnologia a ser utilizada nem quanto a particularidade do local.

Ainda que em todo o número de usinas maremotriz esse já relativamente pequeno em pleno funcionamento, a tecnologia utilizada neste tipo de geração, bem como os princípios operacionais adotados já estão bastante maduras, o que justifica a intensificação de mais pesquisas nessa área a fim de fomentar o conhecimento, o surgimento de novas tecnologias e formas de aproveitamentos. Além disso, a existência de vários locais adequados e inexplorados leva a concluir que a exploração maremotriz atende os requisitos para que esta possa ser utilizada e represente uma parcela significativa na matriz energética mundial.

## 11. Referências Bibliográficas

AB'SABER, A. A região amazônica. In: D'INCAO, M.A.; SILVEIRA, I.M. (Org.). *Amazônia e a crise da modernização*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, p.75-84. 1994.

AMARANTE, O.A.C., BROWER, M., ZACK, J., et al., 2001, *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. 1 ed. Brasília, Ministério de Minas e Energia.

AMARAL, K.J. *Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos*. 2003. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

ANDRADE, R.C. *Uma nova abordagem para a solução numérica de problemas de advecção e difusão multidimensional em corpos de água naturais*. 2006. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

*Aplicação de Modelagem Hidrodinâmica na Circulação do Estuário do Rio Maracanã – (NE do PA)*. Defendida em 10/2007 por Leandro P. F. Barbosa. Programa de Pós-Graduação em Geologia & Geoquímica – UFPA.

*Aplicação do Modelo Hidrodinâmico SisBaHiA no Estuário do Rio Caeté – (NE do PA)*. Defendida em 10/2007 por Marcelo W. Matos de Abreu. Programa de Pós-Graduação em Geologia & Geoquímica – UFPA.

Aquaret. Disponível em: [http://www.aquaret.com/index448e-2.html?option=com\\_content&view=article&id=56&Itemid=206&lang=pt](http://www.aquaret.com/index448e-2.html?option=com_content&view=article&id=56&Itemid=206&lang=pt) 1&lang=pt. Acesso em: Março de 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. <http://hidroweb.ana.gov.br/> acessado em 09/2015.

ADMINISTRAÇÃO DAS HIDROVIAS DA AMAZÔNIA ORIENTAL <http://www.ahimor.gov.br/portal/hidroviav/hidrovia-do-guama-capim/acessado> em 09/2015.

BANHA, T.S., MONTEIRO, S.M., 2014. *Quantificação Da Matéria Orgânica No Sedimento do Rio Guamá em um Trecho adjacente à Universidade Federal Do Pará, Belém, Brasil*, Congresso brasileiro de oceanografia.

BATES PD, ROO APJD. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236: 54–77.

BÉRGAMO, Alessandro Luvizon. *Características da hidrografia, circulação e transporte de sal: Barra de Cananéia, Sul do Mar de Cananéia e Baía do Trapandé*. 2000. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. doi:10.11606/D.21.2000.tde-27052004-190010. Acesso em: 2016-09-22.

BOVEE, K.D., B.L. Lamb, J.M. Bartholow, C.B. Stalnaker, J. Taylor, and J. Henriksen. 1998. Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology. Information and Technology Report USGS/BRD/ITR-1998-0004. Fort Collins, CO: U.S. Geological Survey BRD.

MONTEIRO, M. D. R., Composição e distribuição do microfitoplâncton do rio Guamá no trecho entre Belém e São Miguel do Guamá, Pará, Brasil. Bol. Mus. Para. Emilio Goeldi Cienc. Nat. v.4 n.3 Belém dez. 2009- Universidade Federal do Pará.

Plano Nacional de Energia 2030. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, Brasil. 2016a.

BRAZ, V. B. e MELLO, V. S. A Vera Nobre Braz e Vanessa Souza Álvares de Mello. ESTUDO TEMPORAL DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO GUAMÁ. BELÉM-PA. (2003)

BROWN RA, PASTERNAK GB. 2009. Comparison of methods for analysing salmon habitat rehabilitation designs for regulated rivers. River Research and Applications 25: 745–772.

CAMERON, W. M. & PRITCHARD, D.W., 1963. Estuaries. In: Hill, M. N. (ed). The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. New York; Interscience. Pp. 306 – 324.

CHITTORA MADHU. “India’s First Tidal Power Project Coming up”. Project Monitor. 2010. Date of visit: November 09, 2010. URL: [www.projectsmonitor.com](http://www.projectsmonitor.com)

CUNHA, E M.S. Considerações gerais sobre Zona Costeira (cap.3), p. 126-153. 2005.

DIAS, GUSTAVO NOGUEIRA (2011). Estudo Geofísico Sobre A Erosão Fluvial Do Rio Guamá Na Orla Da Universidade Federal Do Pará, Belém (Pa). Universidade Federal Do Pará Instituto De Geociências Curso De Pós-Graduação em Geofísica.

Diretoria de Hidrografia e Navegação. [http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster\\_disponiveis.html](http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html), acessado em Abril de 2015.

DARAIO JA, WEBER LJ, NEWTON TJ, NESTLER JM. 2010. A methodological framework for integrating computational fluid dynamics and ecological models applied to juvenile freshwater mussel dispersal in the Upper Mississippi River. Ecological Modelling 221: 201–214.

DYER, K.R. Estuaries: a physical introduction. 2 ed. Chichester: Wiley, 1997. 195p.

DOE/EIA, 2011b. International Energy Outlook 2011 - Press Conference. H. Gruenspecht. Washington, DC, USA.: DOE/EIA: 27 pp. Disponível em: <[http://www.eia.gov/pressroom/presentations/howard\\_09192011.pdf](http://www.eia.gov/pressroom/presentations/howard_09192011.pdf)>. Acesso em: Junho de 2017

FEMAR - Tabelas das Estações Maregráficas Brasileiras - Consulta On-Line <http://www.femar.com.br>, 2015.

F.H. Fahmy. "An Optimum Operation and Mathematical Model of Tidal Energy System at Red Sea Area". Chemistry and Chemical Engineering International Conference. Vol. 1, pp. 664-667. 2010.

FRAENKEL, P., 2002. "Power from marine currents". Em: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, vol. 216, Part A: J Power and Energy.

FRAENKEL, P., 2007. "Marine current turbines: pioneering tidal stream technology". Em: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, vol. 221, Issue: 2, Pages: 159-169.

Fundação de Estudo do Mar (FEMAR). [https://www.fundacaofemar.org.br/cursos/prepom/cursos\\_belem.html](https://www.fundacaofemar.org.br/cursos/prepom/cursos_belem.html), acesso em Abril de 2015.

GALLO, M. N. A influência da vazão fluvial sobre a propagação da maré no estuário do rio Amazonas. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

GEOPHYSICS STUDY COMITEE. 1997. "Overview and Recommendations". Estuaries, Geophysics and the Enviroment. Washington, D.C., National Academy of Sciences, pp. 1 – 10.

GARCÍA, A., JORDE, K., HABIT, E., CAAMAÑO, D., PARRA, O., 2011. Downstream environmental effects of dam operations: changes in habitat quality for native fish species. *River Res. Appl.* 27, 312–327.

HARDISTY, J., 2009. *The analysis of tidal stream power*. 1 ed. West Sussex, John Wiley e Sons Ltd.

HORRITT M.S., BATES P.D. 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268: 87–99.

Hydro Tasmania Hydro Electric Corporation. "Study of Tidal Energy Technologies for Derby". Sustainable Energy Development Office-Government of Western Australia. Report N° WA-107384-CR-01. 2001.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.

J. Radtke, S. J. Couch and C. J. Dent. "Capacity of Large Tidal Barrages". IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Vol. 1. pp. 331-336. 2010.

J.M. Pólo, J. Rodríguez y A. Sarmiento. "Potencial de Generación de Energía a lo Largo de la Costa Colombiana Mediante el Uso de Corrientes Inducidas por Mareas". *Revista de Ingeniería-Universidad de los Andes*. Ed. 28, pp. 99-105. 2009.

KHAN, J e BHUYAN, G.,2009. Ocean Energy: Global Technology Development Status. In: Report prepared by Powertech Labs for the IEA-OES., p.83.

KJERFVE, B.1987. “Estuarine Geomorfology and Physical Oceanography. In: Day Jr., J. w., C.H. A.S. Hall, Kemp, W. M. &Yañez- Aranciba, A. (eds). Estuarine Ecology. New York, Wiley, pp. 47-48.

KJERFVE, B., Proehl, J. A., Schwing, F. F! .Spini, H E hrozás, M. (1982). Temporal and spatial considerations in measuring estuarine water fluxes. In: Kennedy, V S. (ed ) Estuarine compansons. Academic Press. New York, p. 37-51

KJERFVE, B. Manual for Investigation of Hydrological Processes in Magrove Ecosytems. Baruch Institute for Marine Biology and Coastal Research. Department of Geological Sciences and Marine Science Program University of South Carolina Columbia, SC 29208, U.S.A. 1990.

LAMOUREUX, N., Capra, H., Pouilly, M., 1998. Predicting habitat suitability for lotic fish: linking statistical hydraulic models with multivariate habitat use models. *Regul. Rivers Res. Manag.* 14, 1–11.

LANDSAT. <https://lv.eosda.com/> . Rio Guamá. Belém-Pará-Brazil.

LECLERC M, BOUDREAULT A, BECHARA JA, CORFA G. 1995. Two-dimensional hydrodynamic modeling: a neglected tool in the instream flow incremental methodology. *Transactions of the American Fisheries Society* 124: 645–662

L.B. Bernshtein. “Tidal Power Development-A Realistic, Justifiable and Topical Problem of Today”.*IEEE Transactions on Energy Conversion.* Vol. 10, Issue 3, pp. 591-599.1995.

L.K. Siong and L.Y. Seng.“Preliminary Investigation of the Potential of Harnessing Tidal Energy for Electricity Generation Malaysia”.*Transmission and Distribution Conference and Exposition.* Vol. 1, pp. 1-7. April 21-24, 2008.

LANNA, A. E. (1997). SAGBAH – Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Bacias Hidrográficas. IPH – UFRGS. Porto Alegre. 55p

LEINZ, V., DO AMARAL, S. E. *Geologia geral.* 13 ed. São Paulo: Nacional, 1998. 399 p.

LIMA, W. N.; SANTOS, M. T. P. Avaliação geoquímica ambiental de águas residuárias e de matéria orgânica degradada de canais de drenagem urbana (Belém, PA). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – série Ciências da Terra.* n. 13, p. 3-40, 2001.

LOPES, M. N., *Modelagem Hidrodinâmica 2DH no furo da Laura – Nordeste paraense.* 2016. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará.

MACIEL, M. A. *Modelagem do padrão de escoamento no canal da passagem (Vitória - ES).* 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -

Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Vitória, 2004.

MANOEL, A; GREGÓRIO, S; CARVALHO, A; MENDES, A (2009). Batimetria e sedimentologia da baía de Guajará, Belém, estado do Pará, Brasil – 2009

Marine Current Turbines. “Strangford Lough Marine Current Turbine-Environmental Statement (Non-Technical Summary)”. 2005. Date of visit: 25 de abril de 2015.

MATURANA O, TONINA D, MCKEAN JA, BUFFINGTON JM, LUCE CH, CAAMAÑO D. 2014. Modeling the effects of pulsed versus chronic sand inputs on salmonid spawning habitat in a low-gradient gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms* 39: 877–889.

MCKEAN JA, TONINA D. 2013. Bed stability in unconfined gravel-bed mountain streams: With implications for salmon spawning viability in future climates. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface* 118: 1–14.

MEIO AMBIENTE. Disponível em: <<http://www.sectam.pa.gov.br/>>. acessado em 11/2015.

MIRANDA, L.B., Castro, B.M., Kjerfve, B., 2012. Princípios de Oceanografia física de estuários. Edusp, São Paulo, 414p.

MOLINIER M., Guyot J.L., Oliveira E., Guimarães V. 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazonie et de ses affluents. In *L'hydrologie tropicale*. IAHS Publ., 238, 209-222.

MORAES. B. C., et al., Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazônica*. PARÁ. (2005)

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo. 2002. Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP). 414 p.

NECHET, D., 1993. Análise da precipitação em Belém-Pará, de 1986 a 1991. *Boletim de Geografia Teórica* 23(45/46): 100-156

NETO, Pedro Bezerra Leite; 2011. Engenharia, *Revista Chilena de Engenharia*, Vol. 19, Nº 2, página 219-232. Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências.

PAIVA, R. S.; et al.. Considerações ecológicas sobre o fitoplâncton da baía do Guajará e foz do rio Guamá (Pará, Brasil). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*. v. 1, n. 2, p. 133-146, 2006.

PASTERNAK GB, GILBERT AT, WHEATON JM, BUCKLAND EM. 2006. Error propagation for velocity and shear stress prediction using 2D models for environmental management. *Journal of Hydrology* 328: 227–241.

PENTEADO, A. R. Belém do Pará, estudo da geografia urbana. Belém: Imprensa Universitária, 1968. 183 p.

PINHEIRO, R. V. L. 1987. Estudos hidrodinâmicos e sedimentológicos do estuário Guajará-Belém/PA. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, 164 f. (Dissertação de Mestrado).

PORTOBRÁS- INPH - 1980 - Medições de Correntes em Suspensão junto ao Porto de Belém - Pará. Relatório INPH 82/80, código Belém 740/01. Rio de Janeiro. 162 p.

PRITCHARD, D. W. (1989). Estuarine Classification - A Help or a Hindrance. In: NEILSON, B. J.; KUO, A.; BRUBAKER, J. (Eds.), Estuarine Circulation. Clifton: Humana Press, p. 1 – 38, 1989.

PRITCHARD, D., 1955. “Estuarine Circulation Patterns”. Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 81:17

RAMOS, J., 2004. Poluição e contaminação da orla de Belém-PA. In: L. UHLY & E. L. SOUZA (Eds.): A questão da água na Grande Belém: 121-148. Casa de Estudos Germânicos, Belém.

RIBAS, T.M. Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

RIBEIRO, K. T. S. Recursos hídricos no estuário amazônico e os agravos à saúde humana. 2001. Disponível em: <http://www.ufpa.br/projetomegam/textos/relasinteseMegam.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2015.

ROSMAN, P.C.C. et al. Métodos numéricos em recursos hídricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos / Fundação COPPETEC, 2001.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA. COPPE – Engenharia Costeira e Oceanográfica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015. [http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V9b\\_.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9b_.pdf) acessado em 07/2015.

ROSSO, T. C. A; ROSMAN, P. C. C. Modelo Hidrodinâmico para as Baías de Ilha Grande e Sepetiba. In: ALFREDINI, P.; RAMOS, C. L.; TAMADA, K.; ORTIZ, J. (Org). Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos, v1, p. 361-365, São Paulo, SP, 1995.

S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid and J.F. Charpatier. “Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status”. IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Vol. 1, pp. 1407-1412. 2007.

SAMPAIO, M. Estudo de circulação hidrodinâmica 3D e trocas de massas d’água da Baía de Guanabara – RJ. 2003. 213 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

SECRETARIA EXECUTIVA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. Disponível em: <<http://www.sectam.pa.gov.br/>>. acessado em 11/2015.

Sh.L. Lima, O.R. Saavedra, A.K. Barros e N.J. Camelo. "Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas". 5th Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission. UNESP. Vol. 1, pp. 1-6. 2003.

SIOLI, H. Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region. *Amazoniana*, v. 1, p. 267-277, 1968.

SOERENSEN, H. C. e WEINSTEIN, A., 2008. "Ocean Energy: Position paper for IPCC". In: IPCC Scoping Conference on Renewable Energy. pp. Lübeck, Germany: European Ocean Energy Association. Disponível em: <[http://www.euoea.com/euoea/files/ccLibraryFiles/Filename/000000000400/Ocean\\_Energy\\_IPCC\\_final.pdf](http://www.euoea.com/euoea/files/ccLibraryFiles/Filename/000000000400/Ocean_Energy_IPCC_final.pdf)>. Acesso em: Março de 2012.

SOTO, Y. J. M. A Modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina Paranaguá-PR. 2004. 187 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

SOUZA, R.F. Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA). 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2006.

Sustainable Development Commission. "Turning the Tide-Tidal Power in the UK". Sustainable Development Commission. 2010. Date of visit: 09 de novembro de 2010.

Th.J. Hammons. "Tidal Power". Proceedings of the IEEE. Vol. 8, Issue 3, pp. 419-433. March, 1993.

Th.J. Hammons. "Tidal Power". Proceedings of the IEEE. Vol. 8, Issue 3, pp. 419-433. March, 1993.

TONINA D, JORDE K. 2013. Hydraulic modeling approaches for ecohydraulic studies: 3D, 2D, 1D and no-numerical models. In *Ecohydraulics: An integrated Approach*, Maddoc I, Wood PJ, Harby A, Kemp P (eds). Wiley-Blackwell: New Delhi; 31-66

TONINA D, BUFFINGTON JM. 2009. A three-dimensional model for analyzing the effects of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66: 2157–2173

TONINA D, MCKEAN JA, TANG C, GOODWIN P. 2011. New tools for aquatic habitat modeling. In *34th IAHR World Congress 2011*. IAHR: Brisbane, Australia; 3137–3144.

TOPAZIO, E. F. S. Modelagem de pluma de emissários com T90 variável na costa oceânica de Salvador, BA. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

TOPÁZIO, E. F. S. Modelagem de pluma de emissários com T90 variável na costa oceânica de Salvador, BA. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

Torres, Marcelo Ferreira - A Pesca Ornamental na Bacia do Rio Guamá: sustentabilidade e perspectivas ao manejo / Marcelo Ferreira Torres; orientador David Gibbs McGrath. – 2007.

Wanderley , Clarissa Maria da Silva. Distribuição Espaço-Temporal Das Larvas De Peixe e Sua Relação À Hidrodinâmica a Qualidade da Água no Entorno das Ilhas do Combu e Murucutu, Belém – Pa, 2010.

XAVIER, A. G. Análise da hidrodinâmica da baía de Todos os Santos (BA). 2002. 205 f. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002.