



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

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM (BIDIMENSIONAL - 2DH) HIDRODINÂMICA NA  
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO NO ESTUÁRIO  
DO RIO PARÁ (ESTADO DO PARÁ/BRASIL)**

**TAYNAN NACLY ABENASSIFF AZEVEDO**

**Belém – PA**

**2021**

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

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM (BIDIMENSIONAL - 2DH) HIDRODINÂMICA NA  
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO NO ESTUÁRIO  
DO RIO PARÁ (ESTADO DO PARÁ/BRASIL)**

**TAYNAN NACLY ABENASSIFF AZEVEDO**

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 Aquaviário  
Orientador: Prof. Dr. Maamar El-Robrini.

**Belém – PA**

**2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Abenassiff Azevedo, Taynan Naclý.

Aplicação da modelagem (bidimensional – 2DH) hidrodinâmica na identificação de áreas com potencial energético no estuário do rio Pará (estado do Pará/Brasil)/ Taynan Naclý Abenassiff Azevedo - 2021.

132 f. : il. color.

Orientador(a) –Maamar El-Robrini.Dissertação de Mestrado –

Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

1.Estuário do rio Pará. 2. Circulação estuarina. 3. Modelagem hidrodinâmica. 4.Potencial energético

**TAYNAN NACLY ABENASSIFF AZEVEDO****APLICAÇÃO DA MODELAGEM (BIDIMENSIONAL - 2DH) HIDRODINÂMICA NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO NO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ (ESTADO DO PARÁ/BRASIL)**

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em engenharia naval do instituto de tecnologia da universidade federal do Pará como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em engenharia naval.

Belém-PA, 29 de Julho de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Maamar El-Robrini- Orientador  
Doutor em Geologia Marinha  
Universidade Federal do Pará



---

Membro: Prof. Hito Braga de Moraes – Membro Interno  
Doutor em Engenharia Oceânica  
Universidade Federal do Pará



---

Membro: Prof. Nélio Moura de Figueiredo- Membro Interno  
Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia  
Universidade Federal do Pará



---

Membro: Profª Maria de Lourdes Souza Santos - Membro Externo  
Doutora em Oceanografia  
Universidade Federal Rural da Amazônia

*Aos meus pais, Anale (in memoriam) e Raimundo  
E à minha irmã Taynara,  
Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, em especial meu pai Raimundo, minha mãe Anale (*in memorian*) por todo o amor, confiança, ensinamentos e sacrifícios que me trouxeram até aqui e minha irmã Taynara por sua amizade e por sempre estar ao meu lado.

À UFPA pelas estruturas e oportunidades dadas para minha formação.

Ao meu orientador Maamar El-Robrini pela paciente orientação, e por toda ajuda e conhecimento repassado.

Ao Instituto de Tecnologia (ITEC) e ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Naval (PPGNAV) que foram meus locais de aula e troca de saberes.

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.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia Fluvial e Oceânica (INEOF) pelo apoio financeiro fornecido durante este curso de pós-graduação,

Ao professor Paulo Rosman (COPPE/UFRJ) por seus direcionamentos no estudo e pelo tratamento recebido, sem os quais não teria sido possível a elaboração deste trabalho.

Never fear to deliberately walk through dark places, for  
that is how you reach the light on the other side.

Vernon Howard

## RESUMO

O consumo mundial de energia deverá aumentar de 50% entre 2018 e 2050 e o consumo final deve resultar em um crescimento de 79% na geração de eletricidade neste mesmo período. A energia renovável é estabelecida globalmente como uma fonte principal de geração de eletricidade há vários anos por conta de sua capacidade de produzir energia ilimitada. Dentre as possibilidades de energias renováveis estão as energias oceânicas, que dependem dos recursos naturais das águas das marés e oceanos. As marés constituem uma fonte de energia promissora haja vista sua periodicidade e previsibilidade, usando técnicas de análise harmônica ou de modelagem oceânica. Nesse cenário, os estuários são os principais ambientes a serem estudados visando conhecer seu potencial energético, baseado em estudos de modelagem hidrodinâmica. Foi feito um estudo no estuário do rio Pará (parte oriental do Golfão Amazônico, norte do estado do Pará). O objetivo foi analisar a circulação hidrodinâmica (sizígia e quadratura) e identificar as áreas com potencial energético por correntes de macromaré. Para isso foi utilizado o programa de modelagem SisBaHia® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). A fim de identificar a variação sazonal optou-se por alimentar o modelo com dados de velocidade e direção dos ventos da estação de Soure. Os dados batimétricos foram obtidos através da digitalização de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação e as constantes harmônicas foram obtidas através do Módulo de Análise e Previsão de Maré do SisBaHia®. O estuário do rio Pará apresenta profundidade média de 11,507 m. Na desembocadura, a profundidade varia entre 5 a 20 m e as maiores profundidades (30-69 m) ocorrem na região do Porto Vila do Conde (Barcarena). As simulações hidrodinâmicas para o mês de janeiro de 2019, mostraram que a elevação máxima foi de 4,68 m enquanto que a mínima foi de 0,76 m, caracterizando o estuário do rio Pará como uma região de macromaré. A modelagem hidrodinâmica no estuário do Rio Pará mostrou resultados esperados onde, observou-se que durante as marés de sizígia, as velocidades são maiores (meia maré enchente: 0 a 0,86 m/s, estofos de preamar: 0 a 1,11 m/s, e meia maré vazante: 0 a 0,93 m/s e estofos de baixamar: 0 a 1,00 m/s) se comparadas com as marés de quadratura (meia maré enchente: 0 a 0,58 m/s, estofos de preamar: 0 a 0,95 m/s, e meia maré vazante: 0 a 0,55 m/s e estofos de baixamar: 0 a 0,60 m/s). As correntes mais fortes ocorrem durante a maré de sizígia quando comparadas com as correntes que ocorrem na maré de quadratura, e estão predominantemente localizadas na foz do estuário do rio Pará. O modelo gerou uma boa representação das condições do estuário, mostrando padrões maregráficos e hidrodinâmicos aceitáveis quando comparados com medições reais, uma vez que os erros entre os dados

medidos e modelados em relação ao nível da água foram menores que 5%. Foram identificadas 6 áreas com potencial energético em diferentes momentos da maré: sendo as maiores  $700,91 \text{ W/m}^2$  e  $610,39 \text{ W/m}^2$  (na maré de Sизígia) e  $439,4 \text{ W/m}^2$  (na maré de quadratura). Acompanhando as tendências mundiais, em termos de produção energética, sugere-se utilização de turbinas submersas no canal de maré, a exemplo de Seagen U

**Palavras-chave:** Estuário do rio Pará. Circulação estuarina. Modelagem hidrodinâmica. Potencial energético

## ABSTRACT

World energy consumption will grow by almost 50% between 2018 and 2050 and the growth in consumption results in a 79% increase in electricity generation between 2018 and 2050. Renewable energy has been globally a major source of electricity generation for several years because of its ability to produce unlimited energy. Among the renewable energies are ocean energies, which depend on the natural resources of the waters of the tides and oceans. Tides are a promising source of energy, given their periodicity and predictability, using harmonic analysis techniques or ocean modeling. In this scenario, estuaries are the main environments to be studied, aiming to know their energy potential, based on hydrodynamic modeling studies. In this work, a study was carried out in the Pará River estuary; located in the eastern portion of the Amazonian Gulf, in the northern region of the state of Pará. The objective was to analyze the hydrodynamic circulation (syzygy and quadrature) and define the energy potential from tidal currents. For this, the SisBaHia® (Base System of Environmental Hydrodynamics) modeling program was used. The Pará River estuary has an average depth of 11.507 m. At the mouth, the depth varies between 5 to 20 m, and the greatest depths occur in the Porto Vila do Conde region (Barcarena), varying between 30 and 69 m. The hydrodynamic simulations for the month of January 2019, showed that the maximum elevation was 4,68 m while the minimum was 0,76 m, characterizing the Pará river estuary as a macro tidal region. Hydrodynamic modeling in the Pará River estuary showed expected results where, it was observed that during the spring tides, the speeds are higher (flood tide: 0 to 0.86 m / s, high tide: 0 to 1.11 m / s, and ebb tide: 0 to 0.93 m / s and low tide: 0 to 1.00 m /s) compared to the neap tides (flood tide: 0 to 0.58 m / s, high tide: 0 to 0.95 m / s, and ebb tide: 0 to 0.55 m / s and low tide: 0 to 0.60 m / s). Tidal currents are typical of semidiurnal tides, in which the ebb speed is higher than that of the flood. The strongest currents occur during the spring tide compared to the currents that occur in the neap tide, and are predominantly located at the mouth of the Pará River estuary. The model generated a good representation of the estuary conditions, showing acceptable tide and hydrodynamic patterns when compared with real measurements, since the errors between the measured and modeled data in relation to the water level were less than 5%. Six areas with energy potential were identified at different times of the tide: the largest being 700,91 W/m<sup>2</sup> e 610,39 W/m<sup>2</sup> (in the Syzygy tide) and 439,4 W / m<sup>2</sup> (in the quadrature tide). Following world trends, in terms of energy production, the use of submerged turbines in the tidal channel is suggested, such as Seagen U.

**Keywords:** Pará River estuary. Estuarine circulation. Hydrodynamic modeling. Energy potential

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo. ....	7
Figura 2. Diagrama esquemático das zonas de ZR, ZM e ZC de um estuário típico. S equivale à salinidade e Qf à descarga de água doce. ....	10
Figura 3. Tipos geomorfológicos de estuários .....	13
Figura 4. Três tipos de estuário de acordo com o balanço de água. ....	15
Figura 5. Estrutura longitudinal estacionária e dos movimentos nos estuários de cunha salina, fortemente estratificado, fracamente estratificado e bem misturado. ....	15
Figura 6. Diagrama de estratificação circulação baseado em Hansen e Rattray (1965). .....	18
Figura 7. Distribuição anual média global de energia das ondas.....	23
Figura 8. Distribuição global de recursos de gradiente de salinidade. ....	25
Figura 9. Distribuição global de recursos de energia térmica oceânica. a) Diferença global média da temperatura dos oceanos entre 20 m e 1.000 m de profundidade. b) Contornos de alta resolução da diferença de temperatura média anual de 20 °C (amarelo) a 24 °C (2012). .....	26
Figura 10. Correntes da superfície do oceano mostrando os sistemas quente (vermelho) e frio (azul). ....	27
Figura 11. Alinhamento Sol-Terra-Lua na formação das marés de sizígia e de quadratura. ....	29
Figura 12. Mapa mundial da amplitude média das marés .....	31
Figura 13. Tipos primários de dispositivos de conversão de energia das marés e das correntes oceânicas. ....	32

Figura 14. Dados de temperatura obtidos no ano de 2019 da estação automática de Soure- A227.....	37
Figura 15. Dados de precipitação obtidos no ano de 2018 da estação automática de Soure- A227.....	38
Figura 16. Rosa dos ventos da distribuição de frequência da direção e intensidade de vento mensais do ano de 2019 da estação automática de Soure- A227. ....	40
Figura 17. Rosa dos ventos da distribuição de frequência da direção e intensidade de vento mensais do ano de 2019 da estação automática de Soure- A227. (continuação).....	41
Figura 18. A) Rosa dos ventos da distribuição de frequência da direção e intensidade de vento do ano de 2019. B) Gráfico da porcentagem da intensidade de vento da estação automática de Soure- A227.....	42
Figura 19. Localização do estuário do rio Pará e seus principais contribuintes, rio Guamá, rio Tocantins e rio Amazonas.....	43
Figura 20. Resultado do modelo 2D da salinidade. a) alta descarga; b) descarga transitória; c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário é o ponto de referência para distâncias. Os pontos de amostra são representados (LB, RB1 e RB2). ....	47
Figura 21. Mapa ilustrativo com um resumo dos regimes de maré que ocorrem no estuário do Rio Pará. São apresentadas as divisões estuarinas (KJERFVE, 1987): ZC – Zona Costeira; ZM –Zona de Mistura e ZR – Zona de Maré ou do Rio. São apresentados ainda os valores gerais de distorção e assimetria da onda de maré no estuário, de acordo com análise das amplitudes e fases das componentes M2 e M4.....	48
Figura 22 Localização da estação automática de Soure- A227 .....	50

Figura 23. Cartas náuticas nº 302,303,304,305e 306 digitalizadas sobrepostas ao mapa base.....	52
Figura 24. Pontos de profundidade digitalizados a partir da Carta náutica Nº 306 georreferenciada. ....	52
Figura 25. Curva de maré genérica no estuário do rio Pará gerada a partir das constantes harmônicas desta área, ao longo de 30 dias, sendo estas condições adotadas na modelagem do Estuário do Rio Pará. O período gerado com auxílio do SisBaHiA®, foi do 1 a 30 de janeiro de 2019. ....	56
Figura 26. Modelo de caixa (Box model) mostrando a descarga fluvial do Rio Pará em direção ao Oceano Atlântico. O valor do Rio Pará é a soma das diferentes entradas, ou seja, 5% da média histórica do Rio Amazonas (QAMAZON (5%)), que deságua no Rio Pará pelo Estreito de Breves, e o aporte total do rio Tocantins (QTOCANTINS) e outros afluentes (QOTHERS TRIBUTARIES). ....	57
Figura 27. A) Domínio de modelagem para o rio Pará em branco, com contorno de terra em verde e contorno de mar em azul. B) Malha de discretização do Rio Pará .....	58
Figura 28- Mapa batimétrico do Rio Pará.....	60
Figura 29. Localização das secções transversais analisadas no estuário do rio Pará. .	61
Figura 30. Perfis batimétricos das secções transversais no estuário do rio Pará.....	61
Figura 31. Comparação de níveis de maré medida no marégrafo e maré simulada gerada no modelo durante todo o mês de março de 2016.....	64
Figura 32. Detalhe da comparação de níveis de maré medida no marégrafo e maré simulada gerada no modelo durante a primeira sizígia (retângulo vermelho) e durante a segunda maré de quadratura (retângulo azul). ....	64

Figura 33. Gráfico da curva de elevação da maré e do módulo de velocidade gerado pelo SISBAHIA para o período de 30 dias, iniciando no dia 01 de janeiro de 2019. Os quadrados verdes representam os instantes de maré de quadratura (meia maré vazante, estofa baixamar, meia maré enchente e estofa preamar).e os quadrados vermelhos representam os instantes de maré de sizígia (meia maré vazante, estofa baixamar, meia maré enchente e estofa preamar).

.....67

Figura 34. Divisão do estuário do rio Pará, de acordo com classificação de Kjerfve (1987):: A) Zona de Maré do Rio(ZR), B) Zona de Mistura (ZM), C) Zona Costeira. (ZC). .68

Figura 35. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 1 referente a meia maré enchente durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores. ...69

Figura 36. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na meia maré enchente durante a maré de sizígia: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....70

Figura 37. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 2, referente ao estofa da preamar durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores. ...71

Figura 38. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades no estofa da preamar durante a maré de sizígia: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....72

Figura 39. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 3, referente a meia maré vazante durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores. ...73

Figura 40. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na meia maré vazante durante a maré de sizígia: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....74

Figura 41. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 4, referente ao estofo de baixamar durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores. ...75

Figura 42. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na estofa de baixamar durante a maré de sizígia A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....76

Figura 43. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 5 referente a meia maré enchente durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores. ...77

Figura 44. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na meia maré enchente durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....78

Figura 45. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 6 referente ao estofo de preamar durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores. ...79

Figura 46. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades no estofo de preamar durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....80

Figura 47. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 7 referente a meia maré vazante durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores. ...81

Figura 48. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na meia maré vazante durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....82

Figura 49. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 8 referente ao estofa de baixamar durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.....83

Figura 50. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades no estofa de baixamar durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira. ....84

Figura 51. Carta de Correntes de Maré referente ao Rio Pará, de Salinópolis a Belém durante o estofa de preamar. ....85

Figura 52. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estofa de preamar na zona maré do rio com as maiores velocidades chegando a 1,11m/s com densidade energética de 700,91 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 674672,1m E; 9805969m S).....87

Figura 53. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estofa de preamar na zona de mistura com as maiores velocidades chegando a 1,06 m/s com densidade energética de 610,19 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 814690,7m E; 9934061m S) .....88

Figura 54. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estofa de preamar na zona costeira com as maiores velocidades chegando a 1,06 m/s com densidade energética de 610,19 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 817745,9m E; 9939973m S) .....88

Figura 55. Locais na maré de sizígia dentro da simulação da meia maré vazante na zona maré do rio com as maiores velocidades chegando a 0,93 m/s com densidade energética de 412,23 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 724272,3m E; 9826917m S) .....89

Figura 56. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estofa de baixamar na zona costeira com as maiores velocidades chegando a 1,00 m/s com densidade energética de 512,5 W/m <sup>2</sup> . (Localização UTM: 826535,5m E; 9948618m S).....	89
Figura 57. Locais na maré de quadratura dentro da simulação de estofa de preamar na zona de maré do rio com as maiores velocidades chegando a 0,95 m/s com densidade energética de 439.4 W/m <sup>2</sup> .(Localização UTM: 674120,9m E; 9809132m S).....	90
Figura 58. .SeaGen S com turbinas submersas e emersas. ....	92
Figura 59.Esquema de SeaGen U .....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Trabalhos de modelagem realizados na região Amazônica.....	4
Tabela 2. Potencial teórico mundial das energias oceânicas.....	21
Tabela 3. Potencial energético teórico por regiões do Brasil. ....	22
Tabela 4: Significado dos termos das equações governantes do modulo 2DH.....	36
Tabela 5- Valores propostos por Abbot e Basco (1989) para amplitude efetiva de rugosidade de fundo ( $\epsilon$ ). ....	53
Tabela 6. Constantes harmônicas obtidas pelo Módulo de Análise de maré do SisBaHiA® para 30 dias de registro no Porto de Vila do Conde (PA). ....	55
Tabela 7. Dados de elevação da maré (máximo, mínimo e média), para a 1ª Maré de Sízigia e a 2ª Maré de Quadratura, e o erro quadrático médio (EQM) entre os dados medidos e modelados. ....	65
Tabela 8. Dados de parâmetros de entrada utilizados para simulação hidrodinâmica no SISBAHIA®. ....	66
Tabela 9. Dados das velocidades de correntes da carta da DHN (1992), Souza (2006) e os dados gerados pelo Sisbahia na meia maré enchente, estofa de preamar, meia maré vazante e estofa da baixar durante a maré de sízigia. ....	86
Tabela 10. Velocidade e densidade energética das simulações na maré de sízigia nas áreas com potenciais energéticos .....	90
Tabela 11. Velocidade e densidade energética das simulações na maré de quadratura nas áreas com potenciais energéticos .....	90

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CEHs - Conversores de energia hidrocínética

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação

EQM - Erro Quadrático Médio

FEMAR - Fundação de Estudos do Mar

IEA - International Energy Agency

INEOF - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia Fluvial e Oceânica

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC - Intergovernmental Panel of Climate Change

IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável

MMA-Ministério do Meio Ambiente

OES - Programa de Colaboração de Tecnologia dos Sistemas de Energia do Oceano

OTEC - Conversão de energia térmica oceânica

PWh/a - PetaWatt-hora por ano

PRO - Osmose de pressão retardada

RED - Eletrodíálise reversa

TWh Terawatt-hora

U -Velocidade longitudinal

USDOT - Departamento dos Transportes dos Estados Unidos

V - Velocidade transversal

ZC - Zona Costeira

ZCA - Zona Costeira Amazônica

ZCEP - Zona Costeira Estuarina Paraense

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

ZM - Zona de Mistura

ZR - Zona de maré de rio

WEC - Conversor de energia das ondas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVAS .....	4
1.2	OBJETIVOS.....	6
1.2.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>6</b>
1.2.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>6</b>
1.3	LOCALIZAÇÃO DA AREA DE ESTUDO .....	7
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>8</b>
2.1	DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIOS.....	8
2.1.1	<b>Classificação dos Estuários</b> .....	<b>11</b>
2.2	DINÂMICA ESTUARINA.....	19
2.2.1	<b>Descarga fluvial</b> .....	<b>19</b>
2.3	ENERGIAS OCEÂNICAS .....	20
2.3.1	<b>Energia das Ondas</b> .....	<b>22</b>
2.3.2	<b>Gradiente de Salinidade</b> .....	<b>24</b>
2.3.3	<b>Energias Térmicas</b> .....	<b>25</b>
2.3.4	<b>Correntes Oceânicas</b> .....	<b>27</b>
2.3.5	<b>Energia das Marés (Maremotriz)</b> .....	<b>27</b>
2.4	MODELO HIDRODINÂMICO .....	32
2.4.1	<b>Modelos de Circulação Hidrodinâmica</b> .....	<b>32</b>
2.4.2	<b>Modelo Hidrodinâmico do Sisbahia</b> .....	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>37</b>
3.1	CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS .....	37
3.1.1	<b>Clima</b> .....	<b>37</b>
3.1.2	<b>Precipitação</b> .....	<b>38</b>
3.1.3	<b>Ventos</b> .....	<b>39</b>

3.2	HIDROLOGIA .....	42
3.3	VAZÃO .....	44
3.4	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA .....	44
3.5	SEDIMENTAÇÃO .....	46
3.6	CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS .....	47
3.7	SALINIDADE.....	47
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E MATERIAIS.....</b>	<b>49</b>
4.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO .....	49
4.2	MODELO DE CIRCULÇÃO HIDRODINÂMICO.....	49
<b>4.2.1</b>	<b>Dados Ambientais utilizados para a implementação do Modelo Hidrodinâmico .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Batimetria .....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Rugosidade de fundo .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Constantes Harmônicas.....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Vazão .....</b>	<b>56</b>
4.3	DOMÍNIO DE MODELAGEM E MALHA .....	57
4.4	INTEGRALIZAÇÃO DOS DADOS .....	58
4.5	DENSIDADE ENEGÉTICA .....	59
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
5.1	GEOMORFOLOGIA DO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ.....	60
5.2	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	63
5.3	SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS .....	66
<b>5.3.1</b>	<b>Maré de Sizígia.....</b>	<b>69</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Maré de quadratura.....</b>	<b>77</b>
5.4	DENSIDADE ENERGÉTICA.....	86

<b>5.4.1 Tecnologias para geração de energia de maré.....</b>	<b>91</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a International Energy Agency (IEA)(2019b), o consumo mundial de energia deverá aumentar de 50% entre 2018 e 2050 e o consumo final deve resultar em um crescimento de 79% na geração de eletricidade neste mesmo período. No ano de 2018 a demanda global de eletricidade cresceu 4% (> 23.000 TWh), posicionando-a como o "combustível" do futuro. Esse rápido crescimento está empurrando a eletricidade para uma participação de 20% no consumo final total de energia. (IEA, 2019a).

A energia renovável é estabelecida globalmente como uma fonte principal de geração de eletricidade há vários anos (MOTYKA *et al.*, 2018). Diferentemente dos combustíveis fósseis, que estão vinculados à quantidade de recursos que o planeta atualmente possui, os recursos de energia renovável podem produzir energia ilimitada. Por conta disso procuram-se cada vez mais áreas no mundo para novas fontes renováveis de energia.

Dentre as possibilidades de energias renováveis estão as energias oceânicas, que dependem dos recursos naturais das águas dos mares e oceanos. Elas possibilitam a produção de eletricidade graças aos fluxos naturais de energia das correntes. As energias oceânicas não emitem gases de efeito estufa e estão disponíveis em muitos países do mundo.

A geração de energia elétrica é obtida mediante diferentes tecnologias e uma dessas tecnologias, com fonte de energia renovável, é a que utiliza a energia procedente das marés. Esta tecnologia em questão consiste em transformar em energia elétrica, a energia cinética oriunda da propagação contínua da onda de maré, com utilização de conversores de energia hidrocínica (CEHs), que pode ser utilizada para obtenção de energia de qualquer corrente hidrodinâmica.

As energias das marés destacam-se entre as energias renováveis por constituírem uma fonte energética bastante promissora e, portanto, tem sido apontada como uma das mais importantes fontes de energia renovável (ASTARIZ E IGLESIAS, 2015). A periodicidade da maré permite previsões exatas das marés. As marés constituem uma fonte de energia promissora haja vista sua periodicidade e previsibilidade. usando técnicas de análise harmônica ou de modelagem oceânica (LEWIS *et al.*, 2017).

Na região amazônica, os estuários têm despertado interesses nas últimas décadas. Estes são ambientes diferenciados devido ao seu gradiente de salinidade por conta da diluição da água do mar com água doce, e são cientificamente relevantes para a sobrevivência humana. As zonas costeiras são densamente povoadas, concentrando assentamentos humanos, atividades de lazer, pesca e outras indústrias marinhas. Nas últimas décadas, a população, os ativos econômicos e as urbanizações nas zonas costeiras experimentaram um crescimento rápido, e

espera-se um aumento contínuo da população nessas regiões no futuro próximo. (DANGENDORF *et al.*, 2012, INTERGOVERNAMENTAL PAINEL OF CLIMATE CHANGE- IPCC, 2012a).

Dessa forma, os estuários vêm sendo amplamente utilizados em simulações hidrodinâmicas e nas últimas décadas, os modelos numéricos tornaram-se ferramentas fundamentais para entender o intrincado funcionamento dos ecossistemas estuarinos e seus resultados foram fundamentais na integração de fatores físicos, ecológicos e socioeconômicos no desenho e implementação de políticas de gestão (JOVANOVIC *et al.*, 2019, SLINGER *et al.*, 2017).

A aplicação de modelos em estuários para fins de estudos, projetos e à gestão de recursos hídricos é uma necessidade indiscutível. Sem o auxílio de modelos, dificilmente consegue-se ter uma visão dinâmica de processos nos complexos sistemas estuários amazônicos.

Os modelos hidrodinâmicos permitem aos usuários simular processos complexos, a partir de representações numéricas da área de estudo, que podem variar de uma escala pequena a uma escala grande. Esses modelos podem ser usados separadamente ou em combinações para simular diversos processos costeiros relevantes, como por exemplo a simulação de tempestades e inundações costeiras; ondas e transformações de ondas incluindo quebra de onda; erosão, transporte e deposição de sedimentos; mudança de linha costeira; erosão de dunas; esfregar; e até qualidade da água (DEPARTAMENTO DOS TRANSPORTES DOS ESTADOS UNIDOS-USDOT, 2017).

Os processos hidrodinâmicos costeiros raramente são descritos por equações matemáticas simples. Ondas, correntes de maré, níveis de água e transporte de sedimentos são processos complexos e que variam substancialmente no espaço devido a mudanças na batimetria (terreno), rugosidade, geometria da linha costeira e meteorologia (por exemplo, vento, pressão, precipitação). Esses processos também são dependentes um do outro (USDOT, 2017).

Uma completa caracterização da dinâmica estuarina / costeira e, particularmente, a avaliação de condições futuras, podem ser alcançadas através de resultados obtidos com modelos numéricos (COELHO *et al.*, 2009, IGLESIAS *et al.*, 2016).

Esses modelos fornecem previsões de tendências e resultados futuros para diferentes cenários, apoiando, portanto, a implementação de planos de ação sustentáveis. No entanto, deve-se notar que os dados de campo são cruciais para a implementação adequada de modelos numéricos. Dados medidos são necessários para definir os estados iniciais dos modelos,

condições de forçamento e cálculo estático dos valores dos parâmetros de calibração ou seu cálculo dinâmico usando técnicas de assimilação de dados. Os dados de campo também são necessários para avaliar o desempenho dos modelos numéricos comparando os resultados do modelo com as medições (IGLESIAS *et al.*, 2019).

Modelos numéricos são essenciais para avaliar adequadamente o efeito de cada condutor forçante, representando com precisão os processos dinâmicos dos sistemas estuarinos / costeiros (BASTOS *et al.*, 2016). Suas informações podem ser manipuladas para representar o impacto de mudanças nas condições iniciais e de contorno, características topo-batimétricas e estruturas costeiras (TENG *et al.*, 2017). Eles podem ajudar a superar a falta de observações e medições em campo, permitindo uma caracterização completa do comportamento morfo-hidrodinâmico, químico e biológico das regiões costeiras e fornecendo informações valiosas para promover a segurança da população, serviços e ecossistemas (PEREIRA, 2016, IGLESIAS *et al.*, 2018).

A região amazônica possui uma vocação natural para a navegação, uma vez que os rios desempenham um papel preponderante, sendo em muitos casos as únicas alternativas de transporte e comunicação, sendo sempre ter estudos sobre a circulação hidrodinâmica da região.

A área de estudo compreende o estuário do rio Pará que pode ser classificado como um grande sistema estuarino tropical (Prestes *et al.*, 2017) e localiza-se na porção oriental do Golfão Amazônico. O acesso das águas do Oceano Atlântico aos portos fluviais de Belém e Vila do Conde (Barcarena), na Região Norte, é feito através do Canal do Quiriri ou do Canal do Espadarte, principais canais de acesso dentro do estuário.

Questionamentos:

- O SisBaHiA® rodou de forma satisfatória no estuário do rio Pará?
- Os padrões de correntes e níveis da altura das marés do estuário estão próximos do modelo hidrodinâmico nas diferentes fases da maré?
- O SISBAHIA® é capaz de identificar locais com potencial energético por correntes de maré no estuário do rio Pará?

## 1.1 JUSTIFICATIVAS

A motivação inicial para a elaboração da presente dissertação de mestrado partiu da constatação da carência de informações sobre os processos hidrodinâmicos na região amazônica. O uso de modelos numéricos para estudos hidrodinâmicos é recente, e devido a isto, ainda se apresenta de forma pontual e desmembrada, ora abrangendo uma extensa área desconsiderando os pequenos afluentes, ora restrito a trechos dos grandes corpos d'água. Podem ser citados dissertações, teses e artigos como produto desses estudos na região amazônica (Tabela 1).

Tabela 1. Trabalhos de modelagem realizados na região Amazônica

Título	Objetivo	Área de estudo	Modelo	Autor, ano
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	Baía de Guajará, Belém - Pará	SisBaHiA®	BATISTA, 2005
Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na baía de Marajó e rio Pará	sistematizar o conhecimento da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA) com foco na área portuária de Vila do Conde,	Rio Pará – Pará	MIKE 21 (DHI),	SOUZA, 2006
Aplicação do modelo hidrodinâmico no estuário do rio Caeté (NE do Pará)	Analisar a circulação hidrodinâmica no estuário do rio Caeté	Rio Caeté (NE do Pará)	SisBaHiA®	ABREU, 2007
Aplicação da modelagem hidrodinâmica na circulação do estuário do rio Maracanã (NE do Pará)	Circulação hidrodinâmica do estuário do rio Maracanã	Rio Maracanã, NE do Pará	SisBaHiA®	BARBOSA, 2007
Influência da Morfologia do Fundo na Hidrodinâmica da Baía de Guajará (Pará)	Caracterizar a variabilidade hidrodinâmica do sistema estuarino da Baía de Guajará,	Baía de Guajará (Pará)	Princeton Ocean Model (POM)	BÖCK, 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	Lago Água Preta - Belém (Pará)	Modeleur e Hydrosim	HOLANDA, 2010
Modelagem Hidrodinâmica e	Caracterizar espacial e sazonalmente algus	Rio Araguari (Amapá)	SisBaHiA®	SANTOS, 2012

Qualidade da Água em região de Pororoça na Foz do rio Araguari (Amapá)	parâmetros da qualidade da água do Rio Araguari			
Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin	Investigar as fontes de erros do modelo por meio dos testes de validação e sensibilidade e explorar o funcionamento físico da bacia amazônica.	Rio Amazonas	MGB-IPH	PAIVA <i>et al.</i> , 2013
Modelagem hidrodinâmica aplicada ao estuário amazônico - Uma Abordagem em Malha Flexível	Implementação de modelo hidrodinâmico no estuário amazônico, baseado em malha flexível.	Rio Amazonas, Rio Tapajós, Rio Xingu, Rio Tocantins, Baía do Guajará e Rio Pará	D-Flow Flexible Mesh	BORBA, 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	Ilha do Marajó – Pará	SisBaHiA®	NASCIMENTO, 2014
Modelagem hidrodinâmica 2DH no Furo da Laura Nordeste Paraense	Calibração e validação de um modelo hidrodinâmico, ponto de convergência	Furo da Laura, rio Guajará-mirim, Pará	SisBaHiA®	LOPES, 2016
Modelagem matemática do sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba (Pará-Br)	Analisar as características hidrográficas e hidrodinâmicas dos estuários superiores rios Mojuim e Mocajuba.	Rios Mojuim e Mocajuba, Pará	D-Flow Flexible Mesh	SANTOS, 2016
Modelagem (Bidimensional – 2DH) Hidrodinâmica Aplicada no Estuário do Rio Guamá (Estado do Pará/Brasil)	Analisar a circulação hidrodinâmica do estuário do rio Guamá.	Rio Guamá (Estado do Pará/Brasil)	SisBaHiA®	CUNHA, 2017
Hydrodynamics and seed dispersal in the lower Amazon	Estimar as distâncias máximas de dispersão de sementes por ciclo de maré, que foram então comparadas com dados de experimentos de dispersão de sementes in situ	Rio Amazonas	SisBaHiA®	CUNHA <i>et al.</i> , 2017
Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River	Simular numericamente três cenários Rt sazonais com base em um modelo numérico hidrodinâmico calibrado aplicado a um trecho representativo do baixo rio Amazonas.	Rio Amazonas	SisBaHiA®	ABREU <i>et al.</i> , 2020

Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution	Simular numericamente a circulação das marés no Golfo do Maranhão para examinar o comportamento das marés e a distribuição de energia associada	Rio Pericumã, Rio Mearim, Rio Itapecuru - Maranhão	Delft3D	CZIZEWESKI <i>et al.</i> , 2020
--	---	--	---------	---------------------------------

Fonte: Autora.

Além do conhecimento científico, esse trabalho busca o aproveitamento, na região amazônica, de energias renováveis e de menor impacto ambiental a partir de correntes de marés. Estas se mostram como boas possibilidades por não se esgotarem e nem produzirem resíduos ou emissões ao meio ambiente.

Nesse sentido, o presente estudo vem com a intenção de somar ao conhecimento acadêmico e científico na região amazônica e no desenvolvimento da aplicabilidade de modelos hidrodinâmicos para a definição de possível potencial energético para a região.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a circulação hidrodinâmica e definir o potencial energético (correntes de maré) no estuário do rio Pará;

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar as características geomorfológicas e de fundo do estuário do rio Pará;
- b) Analisar as simulações dos cenários de circulação hidrodinâmica no estuário do rio Pará, nos instantes de marés de sizígia e de quadratura e comparar variações nos dois estágios de maré;
- c) Determinar a variação da maré e a magnitude das correntes durante estes períodos;
- d) Identificar as áreas com potencial energético por correntes de maré no estuário do rio Pará;
- e) Identificar a(s) melhor(es) tecnologia(s) para aproveitamento da energia elétrica a ser produzida por correntes de maré no estuário do rio Pará.

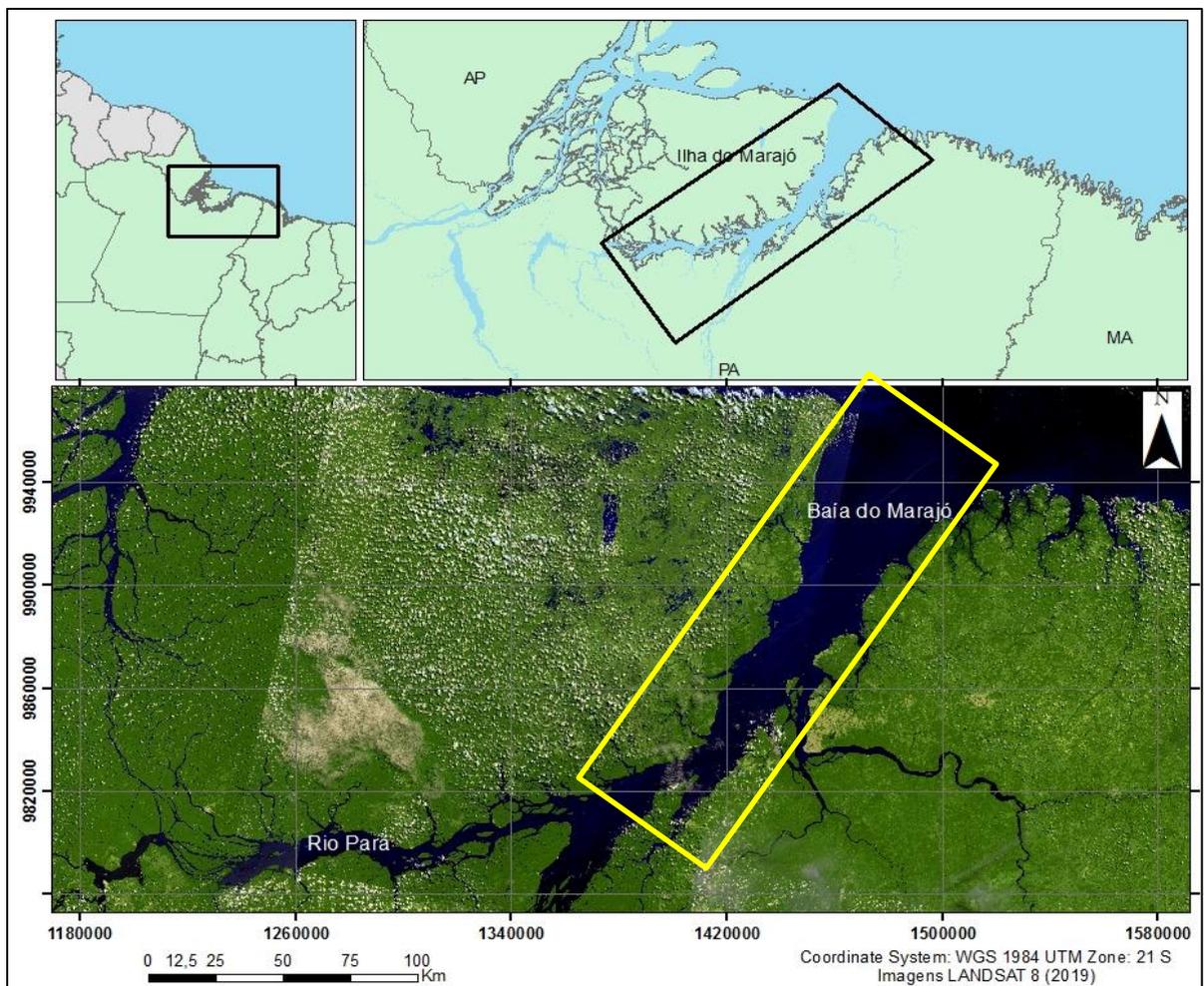
### 1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A abrangência da área de estudo é o estuário do Rio Pará (Figura 1) que se localiza na porção oriental do Golfão Amazônico, na região norte do estado do Pará.

O rio Pará é formado a partir de contribuições do Rio Amazonas, através das vazões veiculadas nos Estreitos de Breves, que se somando às contribuições do Rio Tocantins e Guamá formam a Baía de Marajó.

O Estuário do Rio Pará é caracterizado por ser um ambiente altamente dinâmico, afetado pela sazonalidade das marés e do rio (PRESTES, 2016).

Figura 1. Localização da área de estudo.



Fonte: Autora

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIOS

Os estuários são corpos de água extremamente vulneráveis, constantemente sujeitos a variações ambientais, tanto de origem natural, ocasionados por eventos meteorológicos, locais e remotos, com escala temporal variando em amplos intervalos de tempo, quanto às de origem artificial, provocados pela ação do homem. A renovação de suas águas e a capacidade de assimilação de substâncias estranhas introduzidas nele dependem de uma série de processos de natureza física, química, biológica e geológica que interagem entre si de forma extremamente complexa (BÉRGAMO, 2000).

Existem diferentes definições e classificações atribuídas aos estuários. Estas definições podem ser baseadas na característica geomorfológica, no gradiente de salinidade, nos padrões de circulação e mistura, na variação da altura de maré, na distribuição de fácies sedimentar e das comunidades biológicas presentes neste ambiente (ELLIOTT E MCLUSKY, 2002; DALRYMPLE *et al.*, 1992).

As definições apresentadas nessa dissertação são clássicas e comumente adotadas. Dentre as definições utilizadas na oceanografia física está a clássica de Cameron e Pritchard (1963), que consideram a salinidade da água como critério delimitador: “*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).

Posteriormente, Day *et al.* (2012) ampliam o conceito de Pritchard (1952) para abranger a influência do tipo dos estuários em relação a sua conexão, que podem estar permanentemente ou periodicamente abertos para o oceano, e ter circulação de massas de água e distribuição de organismos específicos de acordo com a conexão com o mar.

As definições de Cameron e Pritchard (1963) e Day *et al.* (2012) não levaram em consideração a influência da maré, que é o principal mecanismo de mistura de massas de água na maioria dos estuários. Shepard (1973) não descarta esta característica costeira na definição de estuários, e enfatiza a ideia da ação de maré para o limite superior (fluvial) de um estuário. O efeito da maré deve promover modificações nos componentes de um estuário, induzindo a

circulação de massas de água, a erosão e a deposição de materiais, criando gradientes de salinidade longitudinal e de profundidade, entre outros (PERILLO, 1995; MIRANDA *et al.*, 2012).

Dionne (1963) apresenta uma definição baseada essencialmente em critérios geomorfológicos: *“Estuário é uma reentrância do mar, que atinge o vale de um rio até o limite de influência da maré, sendo geralmente subdividido em três setores: a) estuário inferior ou marinho, com ligação livre com oceano aberto; b) estuário médio, sujeito à intensa mistura da água do mar com a água fluvial; c) um estuário superior ou fluvial, caracterizado por água doce, mas sujeito à influência diária da maré”*. Sendo assim, o estuário foi considerado como um sistema constituído pela região onde ocorre a diluição da água do mar e também a parte do rio sujeita à oscilação da maré. Os limites entre esses sectores ao longo do estuário são variáveis e dependem da intensidade da descarga fluvial, das correntes de maré e da influência do vento.

Uma definição de cunho mais geológico foi proposta por Dalrymple *et al.* (1992), que sugerem que um estuário é *“o limite mais à jusante de um vale afogado que recebe sedimentos fluviais e marinhos e que contém fácies sedimentares influenciadas pela maré, pelas ondas e pelos processos fluviais. O estuário compreende toda a extensão do vale afogado que se estende do limite à montante das fácies de maré até o limite à jusante das fácies costeiras próximo à embocadura”*.

Perillo (1995) procurou considerar os aspectos físicos, químicos, geológicos e biológicos que caracterizam o estuário, e o definiu como: *“um corpo de água costeira semifechado que se estende até o limite efetivo de influência da maré, no qual a água do mar entra por uma ou mais conexões livres com o oceano aberto ou qualquer outro corpo de água salina costeiro e é mensuravelmente diluída com a água doce provinda da drenagem fluvial, podendo conter espécies eurihalinas durante alguma parte ou em todo seu ciclo de vida”*.

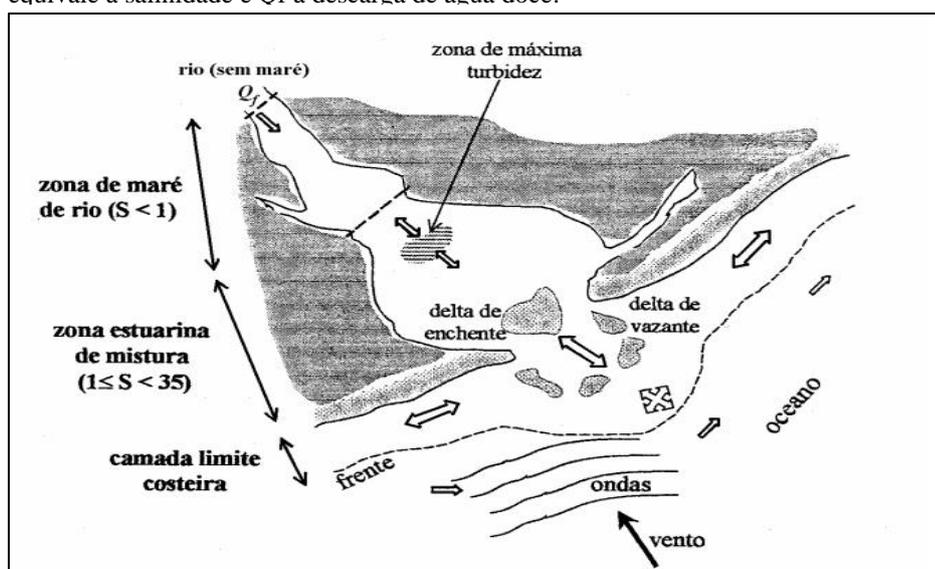
Miranda *et al.* (2017) definem o estuário como um ambiente de transição entre o continente e o mar, caracterizam-se por movimentos de corpos d'águas atribuídas aos resultados da confluência de água doce de origem fluvial com o fluxo de água salgada proveniente do mar. É influenciado por processos sedimentares, hidrológicos, geomorfológicos, oceanográficos, geológicos, climáticos, químicos e biológicos em sua bacia de drenagem e nas áreas adjacentes a esse ambiente.

Kjerfve (1987) definiu um estuário, ou mais adequadamente um sistema estuarino como: *“Sistema estuarino é um ambiente costeiro com conexão restrita com o oceano adjacente à qual permanece aberta pelo menos intermitentemente”*.

Com base na interação entre o prisma de maré e a descarga fluvial, fatores responsáveis pela circulação e padrão de sedimentação, Kjerfve (1987) dividiu o estuário em três zonas (Figura 2):

1. **Zona de Maré do Rio (ZR)** - onde a salinidade da água é sempre menor que 1 (unidade prática de salinidade), mas o efeito da maré dinâmica ainda é observado na cabeceira do estuário, sendo o limite das correntes bidirecionais;
2. **Zona de Mistura (ZM)** - área que apresenta uma variação de salinidade entre 1 a 35, com correntes bidirecionais e onde uma zona de turbidez máxima pode ser observada;
3. **Zona Costeira (ZC)** - localizada na zona costeira adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina, delimitando a camada limite costeira, onde a salinidade observada coincide com a salinidade oceânica.

Figura 2. Diagrama esquemático das zonas de ZR, ZM e ZC de um estuário típico.  $S$  equivale à salinidade e  $Q_f$  à descarga de água doce.



Fonte: (KJERFVE, 1987).

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 (MIRANDA *et al.*, 2017).

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.

## 2.1.1 Classificação dos Estuários

### 2.1.1.1 De acordo com a geomorfologia

Diante do amplo espectro de condições hidrográficas, topográficas, climáticas, químicas, biológicas de estuários, com situações por vezes conflitantes, as quais impossibilitavam um consenso geral a respeito dos estuários, tornou-se cada vez mais eminente a necessidade de analisá-los não apenas como ambientes isolados, como se fazia em décadas passadas. Assim, para comparar diferentes estuários foram propostos critérios de classificação destes ambientes costeiros, organizando-os de acordo com um conjunto de parâmetros e estabelecendo uma estrutura geral de funcionamento. Isto permite prever as principais características de circulação e processos de mistura envolvidos (MIRANDA *et al.*, 2017).

Stommel (1951) propôs o primeiro sistema de classificação, que considerou a maré, o vento e a descarga fluvial como as causas físicas preponderantes dos movimentos de mistura dentro do corpo d'água estuarino. Porém foi Pritchard (1952) quem criou a classificação conhecida de estuários do ponto de vista geomorfológico. Nesta, os estuários são agrupados em quatro tipos: planície costeira/ (vale inundado); fiorde; construído por barras; e por outros processos como falhas tectônicas, erupções vulcânicas, tremores e deslizamento de terra. (CARDOSO DA SILVA, 2000; MIRANDA *et al.*, 2017).

#### A) Planície Costeira

São estuários típicos de regiões costeiras que se formaram durante a subida do nível do mar (Holoceno), que inundou os vales dos rios. O processo de inundação foi muito mais acentuado do que o de sedimentação e a topografia atual tornou-se muito semelhante ao vale do rio. São estuários rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade. A área da seção transversal aumenta estuário abaixo, às vezes de forma exponencial, e a configuração geométrica da seção transversal tem a forma de V. A razão largura/profundidade, é grande, embora esteja na dependência do tipo de rocha em que o vale do rio foi escavado. O fundo é

preenchido com lama e sedimentos finos na sua parte superior, tornando-se mais grossos em direção à entrada (Figura 3) (MIRANDA *et al.*, 2017).

#### B) Fiorde

Os fiordes formaram-se durante o Pleistoceno em regiões recobertas com calotas de gelo, devido à intensa escavação glacial na planície costeira ou próximo à plataforma continental. A pressão das calotas sobre os blocos continentais e os efeitos erosivos durante o descongelamento aprofundaram os vales dos rios primitivos deixando um alto fundo rochoso na entrada. Os fiordes ocorrem em latitudes altas e comuns no Alasca, na Noruega, no Chile e na Nova Zelândia. Por serem sistemas profundos, os fiordes apresentam a razão largura/profundidade relativamente pequena, quando comparada àquela dos estuários de planície costeira, e tem seção transversal aproximadamente retangular (Figura 3) (MIRANDA *et al.*, 2017).

#### C) Construído por Barra

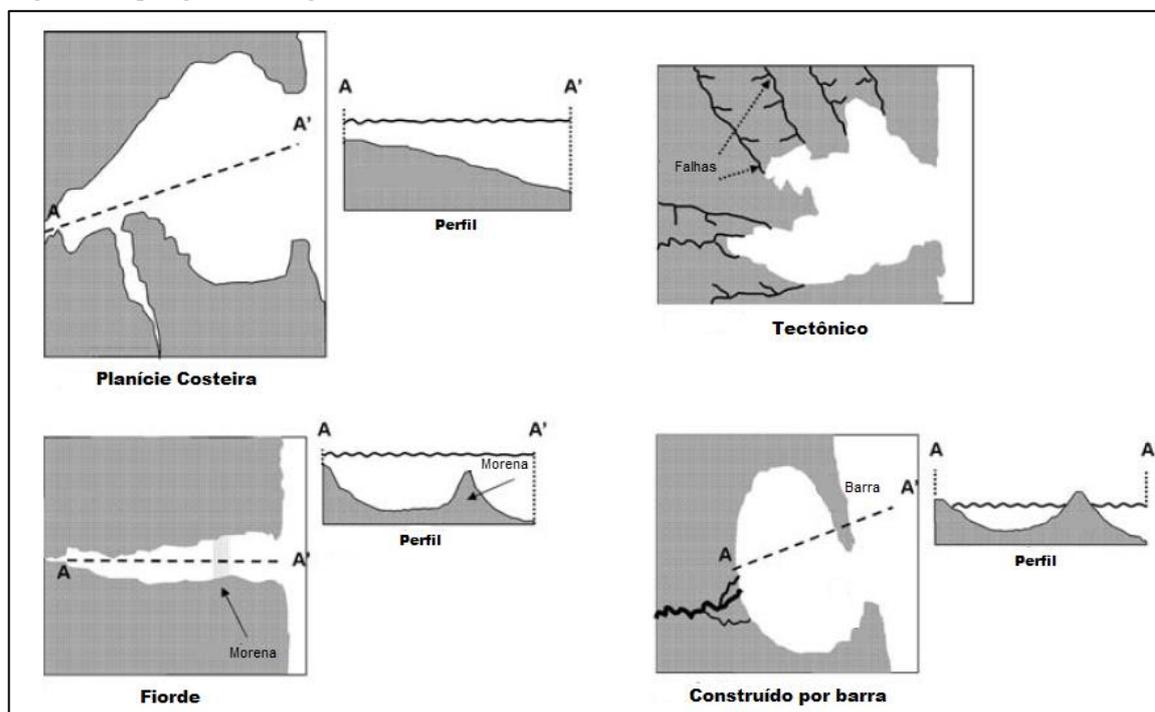
São estuários formados com a inundação de vales primitivos de rios durante a transgressão marinha, mas a sedimentação recente ocasionou a formação de barras na desembocadura. Estes ambientes estão associados a regiões costeiras que podem sofrer processos erosivos com facilidade, produzindo grandes quantidades de sedimentos que são retrabalhados pelas ondas e transportados por correntes litorâneas (Figura 3) (MIRANDA *et al.*, 2017).

São sistemas rasos, com profundidade não superior a 20-30m, e podem apresentar canais e lagunas extensas no seu interior. O rio ou sistema de rios que alimentam esse tipo de estuário, além de apresentarem descarga variável de acordo com a estação do ano, podem transportar grande concentração de sedimentos em suspensão, ocasionando alterações sazonais na geometria da entrada (Figura 3) (MIRANDA *et al.*, 2017).

#### D) Outros

Existem outros estuários que têm uma formação diferente e que não são abrangidas nas classificações geomorfológicas anteriores. Estes sistemas naturais são formados por processos erosivos, como: falhas tectônicas (Figura 3), erupções vulcânicas, tremores e deslizamentos de terra. Nesta categoria, estão também os estuários cuja morfologia foi muito alterada por processos de sedimentação recente nos últimos milênios, como os deltas e as "rias" (MIRANDA *et al.*, 2017).

Figura 3. Tipos geomorfológicos de estuários



Fonte: Modificado de VALLE-LEVINSON, (2010).

### 2.1.1.2 Classificação baseada no balanço de água

Pritchard (1967) propõe uma classificação dos estuários de acordo com a comparação da respectiva salinidade com a da água do mar onde o estuário desagua (CARDOSO DA SILVA, 2000). A definição diz que a água do mar deve ser mensuravelmente diluída pela água da drenagem continental e, no balanço de água, a soma dos volumes que chegam ao estuário, gerados pela precipitação e pela descarga fluvial, devem ser maiores do que o volume de água transferido para a atmosfera pelo processo de evaporação (MIRANDA *et al.*, 2017).

Os estuários podem ser classificados em relação ao balanço de água em três tipos: positivo, inverso e de baixo influxo (Figura 4). Estuários positivos são aqueles que a água proveniente da descarga fluvial, chuva e derretimento de gelo excede a perda de água doce por evaporação ou congelamento e formam um gradiente longitudinal de densidade. Nestes estuários o gradiente longitudinal de densidade apresenta um componente superficial de saída em direção ao oceano (mais forte) e outro componente de fundo em direção contrária proveniente do oceano (mais fraco). Este movimento é em resposta a quantidade de água doce suplementar e é amplamente conhecido como circulação “gravitacional” (VALLE-LEVINSON, 2010).

Os estuários inversos são encontrados em regiões áridas, onde a perda de água doce por evaporação excede a adição por precipitação. Estes são chamados também de estuários

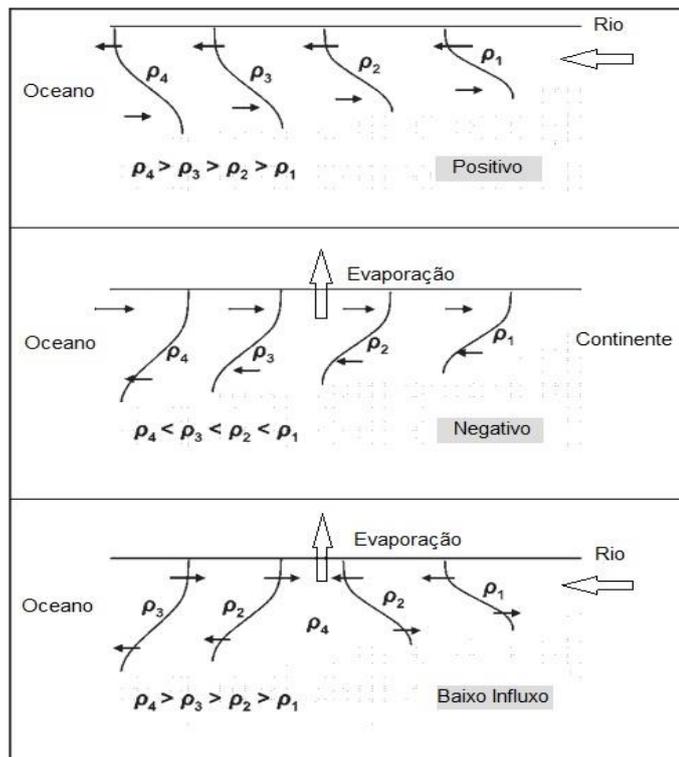
negativos, pois o gradiente longitudinal de densidade ocorre de forma oposta ao estuário positivo. Ou seja, a água que entra no estuário apresenta forte fluxo superficial em relação ao fluxo de fundo que sai do estuário (VALLE-LEVINSON, 2010). Exemplos desse tipo de estuário pode ser encontrado na Baía de Guaymas no Golfo da Califórnia, na Baía Skark, na porção ocidental da Austrália e no Golfo Spencer no Sul da Austrália (VALLE-LEVINSON; DELGADO; ATKINSON, 2001).

Os estuários de baixo influxo ocorrem em regiões semiáridas ou com grandes variações sazonais, são ainda considerados uma combinação entre os estuários inversos e positivos. Durante a estação seca, a vazão do rio é baixa, mas um estuário positivo ainda está presente na área onde o rio entra no estuário. Em outras regiões da bacia condições hipersalinas e inversa se desenvolvem, criando uma região de máxima salinidade dentro do estuário. Esta região da salinidade máxima é conhecida como “salt-plug”, que separa uma zona de circulação gravitacional positiva perto da interface rio/estuário e uma zona de circulação gravitacional inversa entre o “salt-plug” e o oceano costeiro (VALLE-LEVINSON, 2011a). Exemplos desse tipo de estuário são encontrados no Rio Alligator, norte da Austrália e no golfo Fonseca que se localiza na América Central no lado do Oceano Pacífico (VALLE-LEVINSON; BOSLEY, 2003).

### *2.1.1.3 Classificação baseada na estrutura vertical da salinidade*

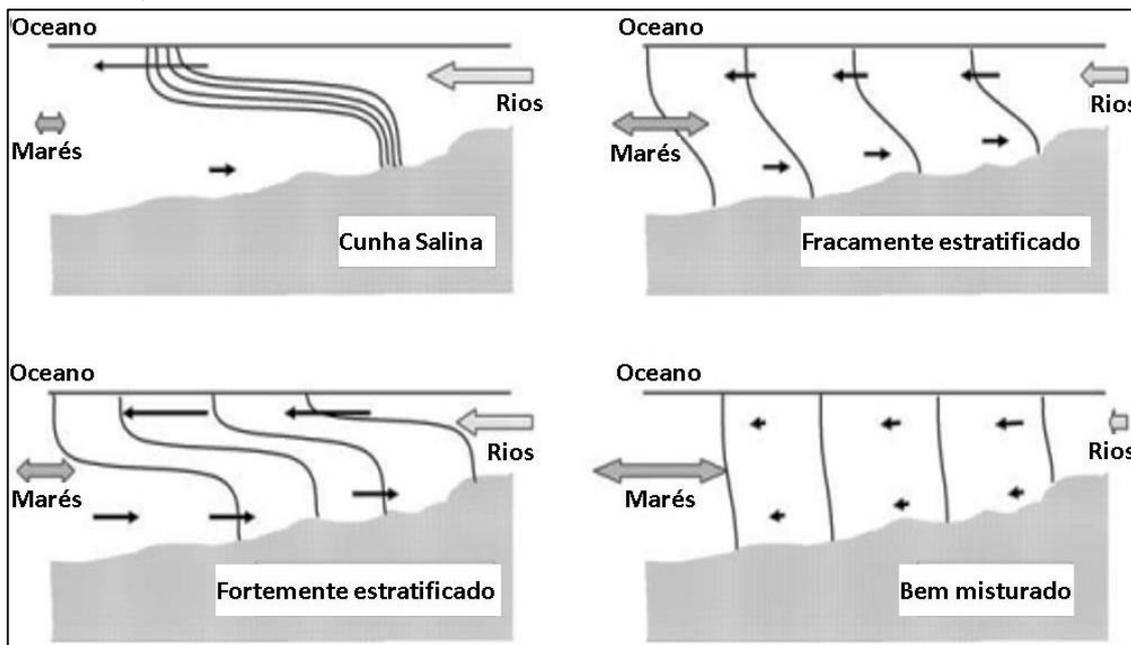
Considerando os trabalhos de Pritchard (1956) e Cameron e Pritchard (1963) podem-se classificar o estuário de acordo com a estrutura vertical da salinidade, podendo ser denominados de estuários de cunha salina, fortemente estratificado, fracamente estratificado ou ainda, verticalmente misturado (Figura 5) (VALLE-LEVINSON, 2010). Esta classificação considera a competição entre a força de empuxo proveniente da descarga fluvial e a mistura causada pela energia das marés (GEYER; MCCREARY, 2014).

Figura 4. Três tipos de estuário de acordo com o balanço de água.



Fonte: Modificado de VALLE-LEVINSON, (2010).

Figura 5. Estrutura longitudinal estacionária e dos movimentos nos estuários de cunha salina, fortemente estratificado, fracamente estratificado e bem misturado.



Fonte: Modificado DE VALLE-LEVINSON, (2010).

Basicamente para gerar um estuário do tipo cunha salina é necessário que a descarga fluvial seja grande e a energia das marés seja fraca, como ocorre no Mississippi (EUA), Rio de La Plata (Argentina), Vellar (Índia), Ebro (Espanha), Pánuco (México) e Itajaí-Açu (Brasil). Esses ambientes são mais estratificados durante o período de enchente das marés, quando a intrusão do oceano gera o formato de cunha (VALLE-LEVINSON, 2010). Há uma interface distinta entre a água do oceano e a água da descarga fluvial sendo o entranhamento do processo de mistura dominante (OFFICER, 1977).

Quando se tem uma descarga fluvial com regime de alto para moderado e uma energia de maré de fraca para moderada, observa-se um estuário fortemente estratificado. Os perfis de salinidade médios ainda apresentam uma picnoclina bem desenvolvida com variações verticais fracas acima e abaixo dela. O fluxo resultante nesse tipo de estuário exibe um perfil vertical com fluxo de saída na superfície e entrada no fundo, porém esse fluxo de entrada no fundo é mais fraco devido ao fraco gradiente horizontal de densidade (VALLE-LEVINSON, 2011a).

Aumentando-se o efeito da maré, em relação à classificação anterior, ou seja, a energia da maré variando de moderada para alta e a energia do rio de baixa para moderada, observa-se um tipo de estuário fracamente estratificado. Muitos estuários de regiões temperadas apresentam essa classificação, como a Baía de Chesapeake, Delaware e o Rio James (EUA) (VALLE-LEVINSON, 2010). A haloclina formada nesse tipo de estuário é menos pronunciada em relação ao tipo anterior e a diferença entre a salinidade de fundo e da superfície é de poucas unidades (MIRANDA *et al.*, 2017).

Por fim, tem-se o tipo bem misturado, onde a descarga fluvial é fraca e a energia da maré é alta, resultando em uma mistura acentuada em relação aos outros tipos. A velocidade residual na vertical é geralmente unidirecional. Em casos em que há essas condições associado a um estuário largo e raso, pode se desenvolver fluxos laterais diferenciados, com entrada por um lado e saída por outro, principalmente durante a estação seca. Partes da Baía de Chesapeake pode apresentar esse comportamento no início do outono. Se o estuário for estreito a entrada da salinidade provavelmente só ocorrerá durante a enchente, pois o fluxo residual será em direção ao oceano. Exemplos deste tipo de estuário são escassos, pois sob condições bem misturada, a média do fluxo (em um ciclo de maré) provavelmente irá ser impulsionada pelo vento ou pela força da maré (VALLE-LEVINSON, 2010).

Vale ressaltar que essas classificações podem mudar entre um ciclo de maré e outro, entre os meses e estações do ano, ou ainda, espacialmente dentro do mesmo estuário. Além disso, de autores para autores.

#### 2.1.1.4 Classificação baseada na hidrodinâmica

Com base na hidrodinâmica do estuário, Hansen e Rattray (1966) propuseram uma classificação amplamente aceita (Figura 6). Esta classificação é baseada em dois parâmetros hidrodinâmicos adimensionais: (1) o parâmetro de circulação e (2) o parâmetro de estratificação. Estes parâmetros referem-se a médias espaciais e temporais das propriedades de velocidade e salinidade. O parâmetro de circulação é a relação entre a velocidade de fluxo residual próxima da superfície ( $u_s$ ) e a média temporal e espacial da velocidade ( $u_f$ ). A velocidade de fluxo próximo da superfície é normalmente relacionada com a descarga fluvial e, por uma questão de argumento, é na ordem de 0,1 m/s. O fluxo  $u_f$  é normalmente muito pequeno, tendendo a zero, pois a troca de água ao longo do ciclo de maré no estuário é grande. Em outras palavras, o balanço de água que entra e sai tende a ser semelhante, sendo o fluxo residual pequeno.

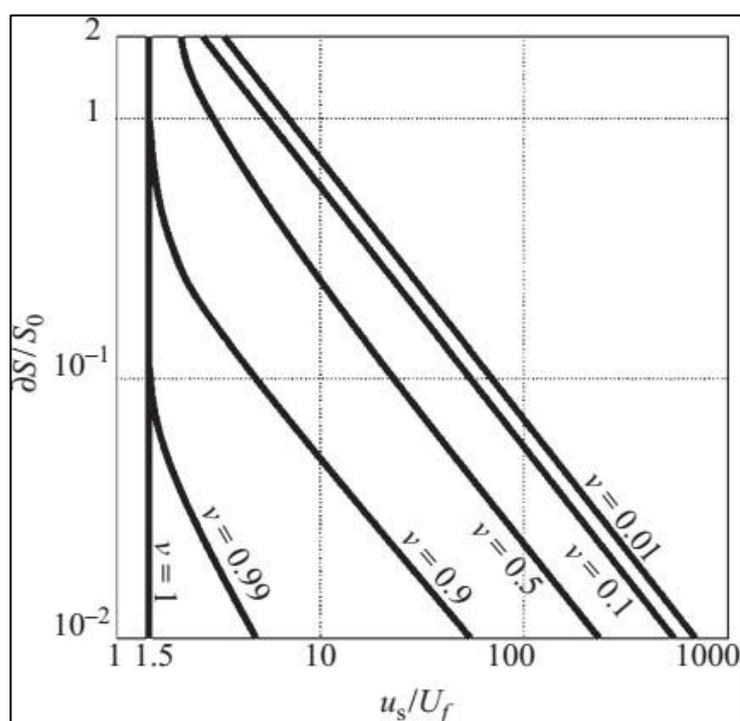
Em estuários com fraco fluxo residual para dentro, tais como bem-misturados e de cunha salina,  $u_f$  será semelhante em magnitude à  $u_s$ . Portanto, o parâmetro de circulação é  $> 10$  em estuários com circulação gravitacional grande e perto de 1 em estuários com fluxo de saída unidirecional. Em geral, quanto maior o parâmetro de circulação mais forte é a circulação gravitacional.

O outro parâmetro adimensional, chamado de parâmetro de estratificação, é a razão entre a diferença de salinidade da superfície e o fundo ( $\partial S = S_f - S_s$ ) e a salinidade média da secção transversal ( $S_0$ ) do estuário. Se a razão foi igual a 1, significa que a estratificação de sal (ou a diferença entre a superfície e fundo) é tão grande quanto a média da secção transversal da salinidade. Por exemplo, se um estuário mostra um  $S_0$  médio de 20, para que possa exibir um parâmetro de estratificação igual a 1, ele deve ter uma estratificação muito grande (da ordem de 20). Em geral, na maioria dos estuários irão apresentar parâmetro de estratificação  $< 1$ . Quanto mais fraca a estratificação da coluna de água, menor será o parâmetro de estratificação (MIRANDA *et al.*, 2017).

Os dois parâmetros descritos acima podem ser utilizados para caracterizar a natureza do transporte de sal em estuários. A contribuição da parcela difusiva do fluxo total de sal no estuário pode ser chamada “ $v$ ”. O parâmetro “ $v$ ” pode oscilar entre 0 e 1. Quando “ $v$ ” é próximo de 0, o transporte de sal é dominado por advecção, isto é, pela circulação gravitacional. Neste caso, os processos de mistura são fracos, como num estuário fortemente estratificado (Fiorde). Quando “ $v$ ” se aproxima de 1, o transporte de sal total é dominado por processos de difusão (por exemplo, mistura de maré), como em fluxos unidirecionais. O parâmetro “ $v$ ” pode ser

retratado em um diagrama de circulação e estratificação. Este diagrama mostra que o transporte de sal é dominado por processos advectivos sob alta circulação gravitacional ou condições fortemente estratificadas. Ele também mostra que os processos de difusão dominam o transporte de sal em baixos valores do parâmetro de circulação (fluxos residuais unidirecionais) independentemente do parâmetro de estratificação. Entre esses dois extremos, o transporte de sal tem contribuições de ambos os processos advectivos e difusivos. Quanto maior forem os parâmetros de estratificação e de circulação, mais forte será a contribuição dos processos advectivos para transporte de sal total (MIRANDA *et al.*, 2017; VALLE-LEVINSON, 2010).

Figura 6. Diagrama de estratificação circulação baseado em Hansen e Rattray (1965).



Fonte: VALLE-LEVINSON, 2010.

De forma análoga à classificação dos estuários em termos de dois parâmetros adimensionais discutidos acima, estes estuários também podem ser classificados em termos de acordo com a estrutura lateral residual relacionados a troca entre os fluxos de entrada e saída de água. A estrutura lateral pode ser fortemente influenciada por variações batimétricas (PRITCHARD, 1956), ou ainda, pelo cisalhamento lateral entre os fluxos de entrada e saída, sendo o movimento de saída sobre as regiões mais rasas da secção transversal e o movimento de entrada pelos canais principais (WONG, 1994). A estrutura lateral dos movimentos de troca (entrada e saída) pode, em última instância depender da competição entre a rotação da Terra (Efeito de Coriolis) e os efeitos de atrito (KASAI *et al.*, 2000), tal como caracterizado pelo

número de Ekman vertical ( $Ek$ ). A estrutura lateral dos movimentos de troca pode também depender do número de Kelvin ( $Ke$ ), que é a relação entre a largura do estuário e o raio interno da deformação.

## 2.2 DINÂMICA ESTUARINA

### 2.2.1 Descarga fluvial

A descarga fluvial é uma importante variável para que ocorram os processos físicos, químicos, biológicos e geológicos nos estuários. As variações na descarga de água doce no estuário influenciam os padrões de circulação, mistura, diluição, intrusão do sal, transporte de sedimentos, nutrientes, poluentes, bem como a distribuição das comunidades biológicas (PERILLO, 1995).

Apesar de sua grande importância, observa-se na literatura a ausência de uma análise adequada das descargas fluviais em estuários. Parte desta deficiência decorre do fato do escoamento superficial da água doce (run-off) ter um comportamento estocástico, de difícil mensuração no tempo e espaço (KJERFVE, 1996; BONETTI E MIRANDA, 1997). Além disso, séries temporais longas (difíceis de serem obtidas) são necessárias, de forma a permitir análises estatísticas mais confiáveis (PEKAROVA *et al.*, 2003). Contudo, o enfoque do estudo hidrológico em bacias de drenagem sempre foi voltado para o gerenciamento da captação e geração de energia, abastecimento, consumo humano, irrigação e controle de enchentes por barragens, sendo assim excluído de projetos gerenciais o baixo curso fluvial dentro do estuário.

Com a regulamentação da Lei Federal nº 9.433 de 1997, que instituiu o Programa Nacional de Recursos Hídricos, os ecossistemas que envolvem a zona costeira passaram a ser considerados nos programas de gerenciamento das bacias hidrográficas. Porém, desde então, pouca discussão ocorreu sobre a quantificação do volume necessário de água doce para promover a manutenção dos estuários.

Uma quantificação aproximada da entrada total de água doce no estuário pode ser feita, utilizando-se de séries históricas confiáveis de estações fluviométricas (dados medidos) existentes na porção mais a jusante de um rio, somando-se a estimativa da descarga potencial da área de drenagem sem monitoramento (LIMA e LESSA, 2001), ou por meio de métodos empíricos (MIRANDA *et al.*, 2017). Para esta estimativa devem-se levar em consideração as características hidro meteorológicas de cada bacia hidrográfica, como área de captação, precipitação, evapotranspiração e os tipos de solos.

Os estuários que tiverem seu fluxo controlado por barragens, necessitam de estudos detalhados sobre o comportamento hidrodinâmico e sedimento lógico. Este estudo deve envolver, principalmente, as alterações na intensidade das descargas (sólida e líquida). As grandes vazões são capazes de remover o volume de sedimentos marinhos importados para a zona estuarina ou acumulados ao longo de anos de baixa descarga fluvial. A regularização das vazões máximas pode comprometer a função natural das grandes descargas, em ejetar sedimento para fora do estuário. Estes eventos apresentam uma particular importância, podendo movimentar, em um curto período de tempo, uma carga sedimentar superior a verificada durante longos períodos em condições normais (DYER, 1988). O efeito oposto, de atenuação dos picos da descarga fluvial, resultara em déficit de sedimento na zona costeira a longo prazo, permanecendo os sedimentos retidos a montante da barragem, ou ocorrer assoreamento da calha fluvial a jusante com a penetração de sedimento marinho.

Por outro lado, flutuações na taxa de pluviosidade no interior das bacias provocam redução ou aumento das descargas fluviais (TUCCI, 1997). As flutuações podem ocorrer em intervalos sazonais ou interanuais em alternância aos períodos secos e úmidos. Porém, nas últimas décadas, flutuações de longo período de precipitação e descarga fluvial vêm sendo cada vez mais discutidas (IPCC, 2001; Marengo e Tomasella, 1998). Pekarova *et al.* (2003) demonstraram a existência destas flutuações nas descargas dos rios em todos os continentes nos últimos 20 a 30 anos. No Brasil, os trabalhos de Molion e Moraes (1987), Marengo e Tomasella (1998) e Genz *et al.* (2003) utilizaram dados de rios (precipitação e de cotas/vazões) para investigar a variabilidade interanual do clima, nas regiões Amazônica e Nordeste. Atualmente, o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) vem realizando diversos estudos para verificar a existência de sinais de mudanças climáticas, com base nas observações hidro meteorológicas.

### 2.3 ENERGIAS OCEÂNICAS

Energia oceânica, geralmente chamada de energia renovável marinha, é um termo que abrange todos os recursos de energia renovável encontrados nos oceanos; isto é, aqueles que usam as propriedades cinéticas, potenciais, químicas ou térmicas da água do mar (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL-IRENA, 2014a).

Os oceanos são uma fonte de enorme energia inexplorada, acessível à maioria dos países costeiros. O potencial de energia oceânica estimado é de 32 PWh/a (Wahyudie *et al.*, 2017); no entanto, apenas uma quantidade menor é explorada em todo o mundo.

As energias oceânicas podem ser exploradas de diferentes formas, e a partir de estudos locais para cada região pode-se adequar tecnologias que convertem esses recursos de energia renovável em uma forma útil - normalmente eletricidade (IRENA, 2014a). Segundo Programa de Colaboração de Tecnologia dos Sistemas de Energia do Oceano – OES (2020) existem seis formas de aproveitamento das energias oceânicas:

1. Ondas: criadas pela ação do vento que passa sobre a superfície do oceano;
2. Gradiente de maré subida e descida da maré: derivada das forças gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol;
3. Correntes de maré: fluxo de água resultante das enchentes e vazantes das regiões costeiras como resultado do aumento e queda das marés;
4. Correntes oceânicas: derivadas de energia eólica e circulação oceânica termohalina;
5. Conversão de energia térmica oceânica (OTEC), derivada de diferenças de temperatura entre a energia solar armazenada como calor nas camadas superiores do oceano e água do mar mais fria, geralmente abaixo de 1000 m;
6. Gradientes de salinidade: derivados de diferenças de salinidade entre a água doce e do oceano na foz do rio.

A Tabela 2 apresenta uma estimativa do potencial teórico mundial das energias oceânicas.

Tabela 2. Potencial teórico mundial das energias oceânicas.

<b>FONTE</b>	<b>POTENCIAL TEORICO em TWH/ANO</b>	<b>POTENCIAL TEORICO EM EJ/ANO</b>
<b>Ondas</b>	18.000	65
<b>Marés</b>	22.000	79
<b>Gradiente de Salinidade</b>	23.000	83
<b>Gradiente de Temperatura</b>	2.000.000	7.200
<b>Total</b>	2.063.000	7.427

Fonte: IPCC, 2012b.

No mundo existem 180 instalações de energia oceânica em todo o mundo, 109 são de maré, 58 para ondas, 12 para gradiente térmico e apenas uma para gradiente de salinidade (OES, 2018).

Estima-se que o potencial energético brasileiro, levando em consideração apenas ondas e marés, é de 114 GW, que poderia contribuir para a ampliação da demanda de energia e para a diversificação da matriz energética. O potencial está dividido entre o uso da energia das marés

na região Norte e a energia das ondas nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste. A Tabela 3 apresenta o potencial teórico da energia das ondas no país, onde nota-se que no Sul, ele é maior quando comparado com as outras regiões (ESTEFEN, 2012).

Tabela 3. Potencial energético teórico por regiões do Brasil.

Região	Potência (GW)
Norte (marés)	27
Nordeste (ondas)	22
Sudeste (ondas)	30
Sul (ondas)	35
Total	114

Fonte: ESTEFEN,2012

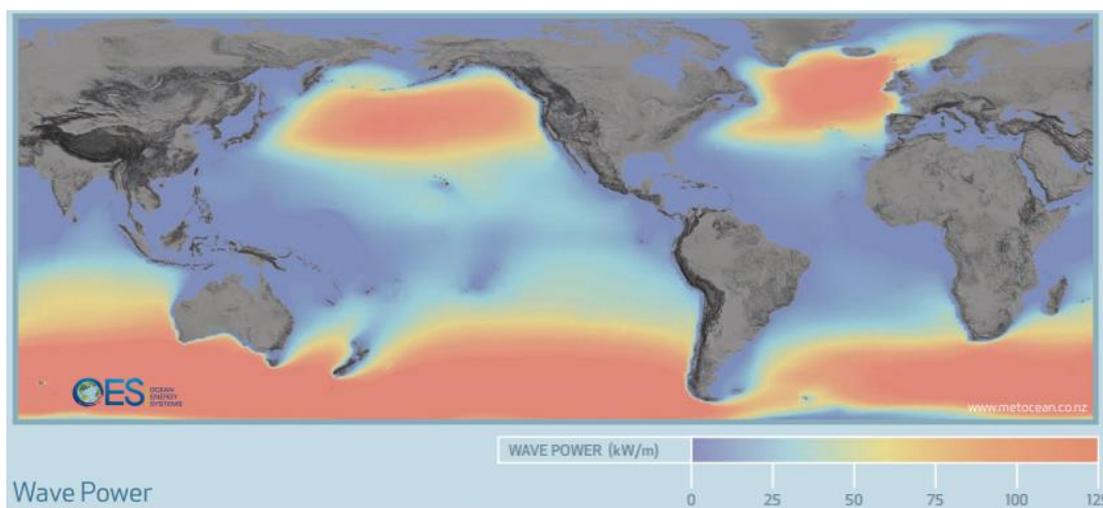
### 2.3.1 Energia das Ondas

A energia das ondas oceânicas possui uma fonte abundante de energia renovável, com características periódicas e previstas (ALAMIAN *et al.*, 2017). As ondas são criadas pelo vento soprando sobre a superfície do oceano (ondulações) e se propagam sobre as águas profundas com perda mínima de energia e continuam a ganhar energia do vento dentro do vasto oceano aberto (swells). A formação da energia das ondas é influenciada pela duração, extensão e velocidade do vento (BOEM, 2017)

A energia das ondas, como recurso, tem a vantagem de uma previsibilidade relativamente boas para as condições do estado do mar (utilizando métodos e redes de medição desenvolvidos para o benefício das indústrias *offshore* existentes). Embora exista sazonalidade, onde as condições de ondas mais altas são observadas mais no inverno do que no verão na maioria dos locais, as ondas chegam dia e noite, 24 horas por dia, e os estados do mar têm mais inércia do que as condições solares / eólicas, com menos potencial para mudanças repentinas no potencial de recursos (IRENA, 2014a).

As melhores condições de ondas para a exploração estão em latitudes médias-altas e águas profundas (acima de 40 m de profundidade), uma vez que a energia das ondas atinge densidades de potência de 60 a 70 kW / m nesses locais (Figura 7). Por exemplo, países como Austrália, Chile, Irlanda, Nova Zelândia, África do Sul, Reino Unido e EUA possuem excelentes recursos de ondas com densidades médias de potência de 40-60 kW/m. (IRENA, 2014b).

Figura 7. Distribuição anual média global de energia das ondas



Fonte: IRENA, 2014a

Um conversor de energia das ondas (WEC) é empregado para converter a energia cinética e / ou potencial de ondas em energia elétrica. O processo de conversão envolve a captura e transmissão da energia para um gerador que produz energia elétrica. O tipo de WEC escolhido dependerá das características físicas do local específico, tipos de ondas locais e seus princípios de trabalho. Considerando a classificação proposta por Mustapa *et al.* (2017) os WECs podem ser divididos em quatro grupos:

- Wave-activated bodies (WABs): Corpos ativados por ondas - Esses dispositivos parcialmente flutuantes geralmente são dispostos paralelamente à direção das ondas. Articulados, eles seguem o movimento das ondas e extraem energia através de transmissão hidráulica ou mecânica.

- Point absorbers: Absorvedores pontuais - esses corpos flutuantes ou submersos oscilam em relação ao movimento das ondas e são capazes de tirar proveito das ondas multidirecionais. O dispositivo consiste em um flutuador e uma unidade de absorção, onde a tomada de força está conectada. O Aqua Buoy (Canadá), OPT Power (USA), e Archimedes Buoy (Escócia) (ALAMIAN *et al.*, 2014).

- Oscillating water columns (OWC): Colunas de água oscilante - Esses WECs capturam o ar pressurizado derivado da oscilação das ondas dentro de uma câmara. Esse ar se expande e retrai horizontalmente, ativando uma turbina a ar. O Mighty Whale, o Osprey, e o Oceanlink são alguns exemplos de OWCs (ALAMIAN *et al.*, 2014). De acordo com Liu (2016), os sistemas têm a maior chance de serem comercializados entre outros tipos de WEC.

- Overtopping device: Dispositivo de galgamento - Esse tipo de dispositivo usa as variações na energia potencial de um reservatório de água para ativar uma turbina submersa.

As variações na energia potencial são produzidas por sobreposição de ondas em uma estrutura. O Wave Dragon, para fins de demonstração já foi aplicado no País de Gales para o protótipo de 7MW, e a matriz de 50MW ainda está a meio dos preparativos em Portugal (ALAMIAN *et al.*, 2014).

### 2.3.2 Gradiente de Salinidade

O gradiente de salinidade é obtido no encontro da água do mar e água doce, como por exemplo o encontro de um rio com o oceano (IRENA, 2014a, TOLMASQUIM, 2016). A energia é proveniente da diferença de pressão química; com base na diferença da concentração de sal entre água doce e água salgada.

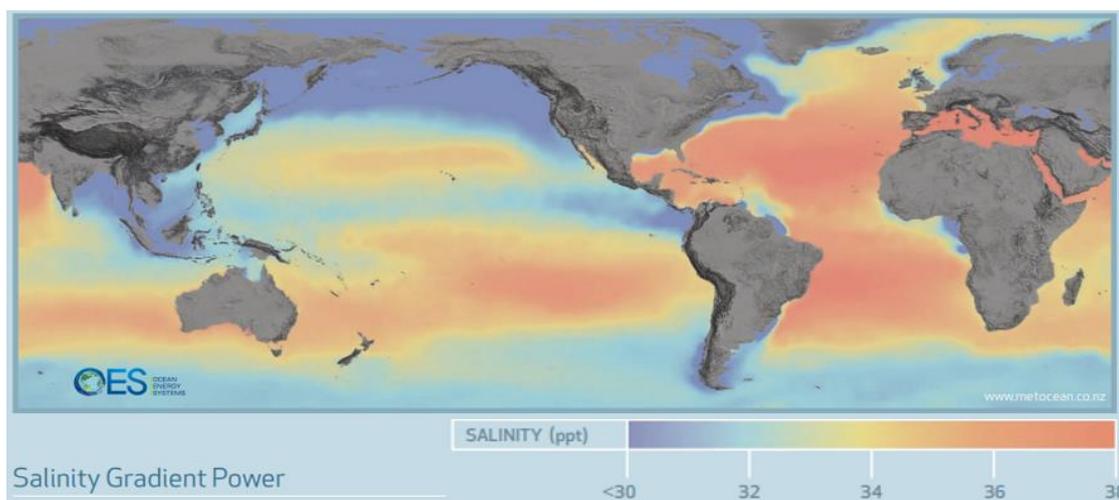
A energia gerada pelo gradiente de salinidade é proveniente da diferença de pressão química; com base na diferença de concentração de sal entre água doce e água salgada. (HUCKERBY *et al.* , 2012). Os recursos de gradiente de salinidade são distribuídos globalmente (Figura 8) e podem ser explorados principalmente na foz dos rios. (IRENA, 2014a).

Existem dois métodos comuns para gerar energia a partir do gradiente de salinidade: eletrodialise reversa (RED – *Reversed electro dialysis*) e a osmose de pressão retardada (PRO – *Pressure-retarded osmosis*).

- Método RED: é baseado no transporte de íons (sal) através das membranas. Dois fluidos de salinidades diferentes (água doce e água do mar) passam por uma série de membranas específicas. A diferença no potencial químico entre membranas resulta em uma voltagem elétrica. A água salobra é então descartada no mar. (AVCI *et al.*, 2018, TUFA *et al.*, 2018).

- Método PRO: é baseado em membranas semipermeáveis que permitem apenas o deslocamento da água moléculas. Nesta abordagem, a água flui da solução diluída (água doce) para o concentrado solução (água do mar) para fornecer um equilíbrio potencial químico em ambos os lados da membrana. Isso ocorre apenas quando a diferença de pressão entre os líquidos é menor que a diferença nos valores osmóticos. Esse fluxo de água pode ser usado para alimentar turbinas que transformam energia mecânica em eletricidade (HAN *et al.*, 2015, ALTAEE *et al.*, 2017).

Figura 8. Distribuição global de recursos de gradiente de salinidade.



Fonte: IRENA, 2014a

### 2.3.3 Energias Térmicas

Uma parte significativa da energia solar incidente na superfície do oceano é retida como energia térmica armazenada como calor nas camadas superiores do oceano. O gradiente de temperatura entre a água da superfície do mar e a água do mar mais fria e profunda - geralmente em profundidades abaixo de 1.000 m - pode ser aproveitado usando diferentes processos de conversão de energia térmica do oceano (OTEC). O OTEC requer diferenças práticas de temperatura de pelo menos cerca de 20 graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Esse recurso é distribuído principalmente nos trópicos (latitudes de 0 a 35 graus) em ambos os lados do Equador (Figura 9). Como é de se esperar, nessas latitudes tropicais as temperaturas da superfície do oceano são mais altas e geralmente há estratificação estável da coluna d'água oceânica. Embora exista uma ligeira variação sazonal nos gradientes de temperatura, o recurso pode ser considerado continuamente disponível e, como tal, o OTEC representa uma tecnologia de energia oceânica com potencial para gerar energia de carga de base (IRENA, 2014 a).

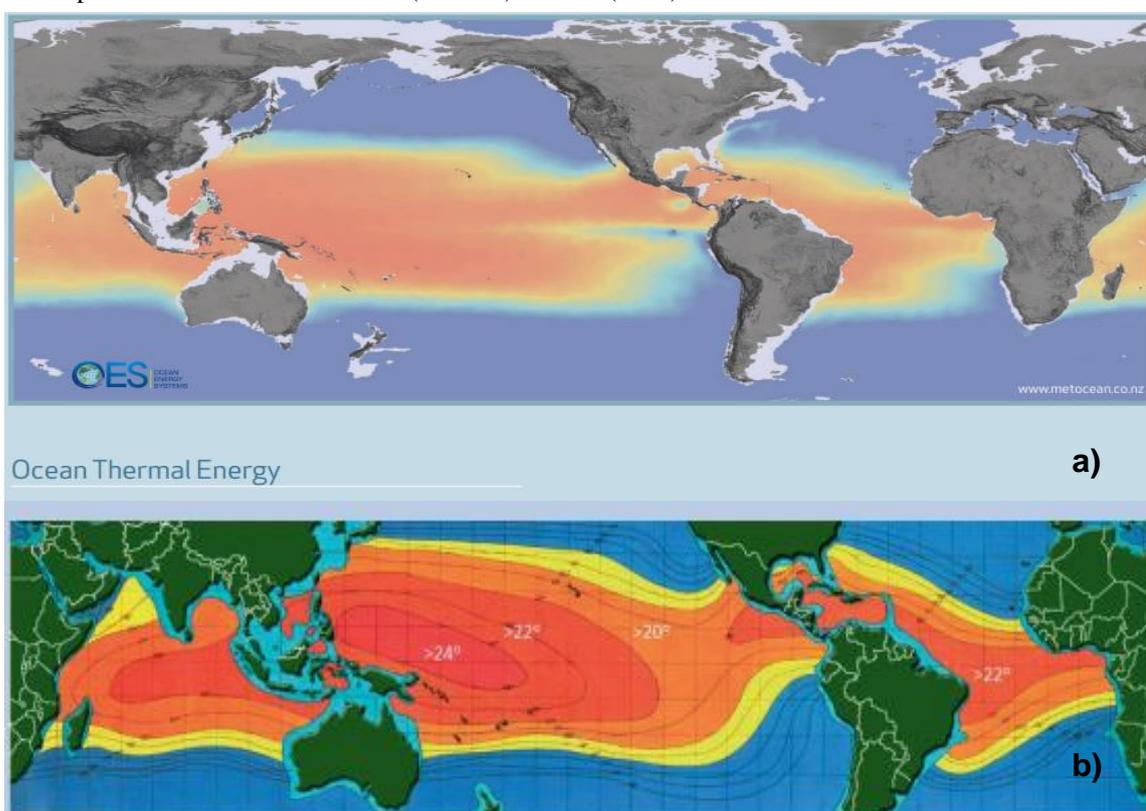
Existem três processos principais para realizar essa conversão, o sistema instantâneo de ciclo aberto, o sistema de ciclo fechado e o híbrido.

- Sistema de ciclo aberto: usam uma câmara de vácuo para "evaporar" um pouco do calor água do mar de superfície. O vapor gerado, que é o fluido de trabalho do sistema (gás pressurizado ou líquido que aciona uma máquina), passa por uma turbina geradora antes de ser condensado pelo frio profundo água do mar. Também pode se possível usar essas plantas de sistema de ciclo aberto para aplicações de dessalinização. (IRENA, 2014a).

- Sistema Ciclo fechado: têm desempenho térmico mais eficiente e bombeia a água quente da superfície através de trocadores de calor para vaporizar um fluido de trabalho secundário (como amônia com baixo ponto de ebulição). O vapor de alta pressão resultante aciona a turbina, antes de ser posteriormente resfriado pela água do mar mais profunda para retornar para uma fase líquida. O fato de o fluido de trabalho secundário operar a uma pressão mais alta na conversão em ciclo fechado, os sistemas geralmente podem ser menores do que as em plantas do sistema de ciclo aberto (IRENA, 2014a).

O ciclo híbrido combina as tecnologias de ciclo fechado e aberto. Semelhante ao ciclo aberto processo, a água quente da superfície é evaporada rapidamente em vapor. O vapor é usado para vaporizar o fluido de amônia que trabalha em um circuito fechado e aciona uma turbina para produzir eletricidade. Depois, o vapor é condensado através de um trocador de calor, fornecendo água dessalinizada (OCTAVIANI *et al.*, 2016). Esse ciclo pode realizar a geração de eletricidade e água potável simultaneamente.

Figura 9. Distribuição global de recursos de energia térmica oceânica. a) Diferença global média da temperatura dos oceanos entre 20 m e 1.000 m de profundidade. b) Contornos de alta resolução da diferença de temperatura média anual de 20 °C (amarelo) a 24 °C (2012).



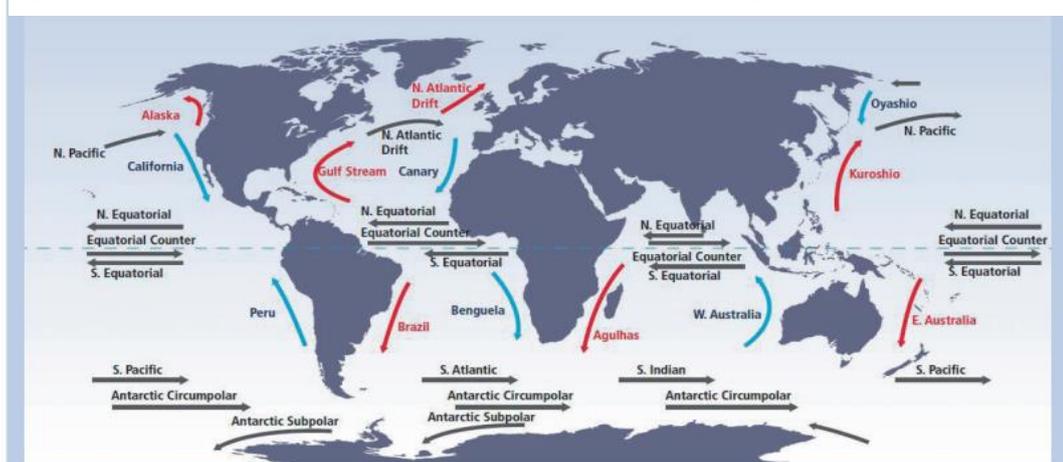
Fonte: IRENA, 2014a

### 2.3.4 Correntes Oceânicas

As correntes oceânicas são os fluxos constantes de água ao redor dos oceanos. Essas correntes sempre fluem em uma direção e são impulsionadas pelo vento, temperatura da água, salinidade e densidade da água, entre outros fatores. Eles fazem parte do sistema de convecção termo-haline, que move a água ao redor do mundo (HUCKERBY *et al.*, 2012). As correntes oceânicas geralmente são mais lentas, porém mais contínuas que as correntes de marés e, embora frequentemente localizadas em locais do fundo do oceano, elas tendem a operar mais fortemente perto da superfície. Outra diferença em relação às correntes de maré é que os fluxos são unidirecionais, enquanto existe uma direção inversa da corrente de maré com cada ciclo de inundação e vazante (IRENA, 2014a).

Embora essas correntes sejam distribuídas globalmente (Figura 10), ainda não está claro quantos podem ser o suficiente para gerar interesse para o desenvolvimento de projetos. No entanto, se as tecnologias puderem ser desenvolvidas para aproveitar essas correntes de velocidade mais baixa, a escala de projetos nesses locais poderia potencialmente ser muito maior, dados os grandes volumes de água e escala de correntes oceânicas em comparação com correntes de maré (IRENA, 2014a).

Figura 10. Correntes da superfície do oceano mostrando os sistemas quente (vermelho) e frio (azul).



Fonte: LEWIS *et al.*, 2011.

### 2.3.5 Energia das Marés (Maremotriz)

A energia das marés é uma forma de energia hidrelétrica que converte a energia do aumento e queda naturais das marés em eletricidade. As marés são um fenômeno natural que se manifesta através da elevação e queda do nível do mar causada pelos efeitos combinados das

forças gravitacionais exercidas pela Lua, o Sol e a rotação da Terra. Esse movimento vertical cíclico do nível do mar também é acompanhado por movimentos horizontais variáveis, designados pelas correntes de maré (OWEN, 2008).

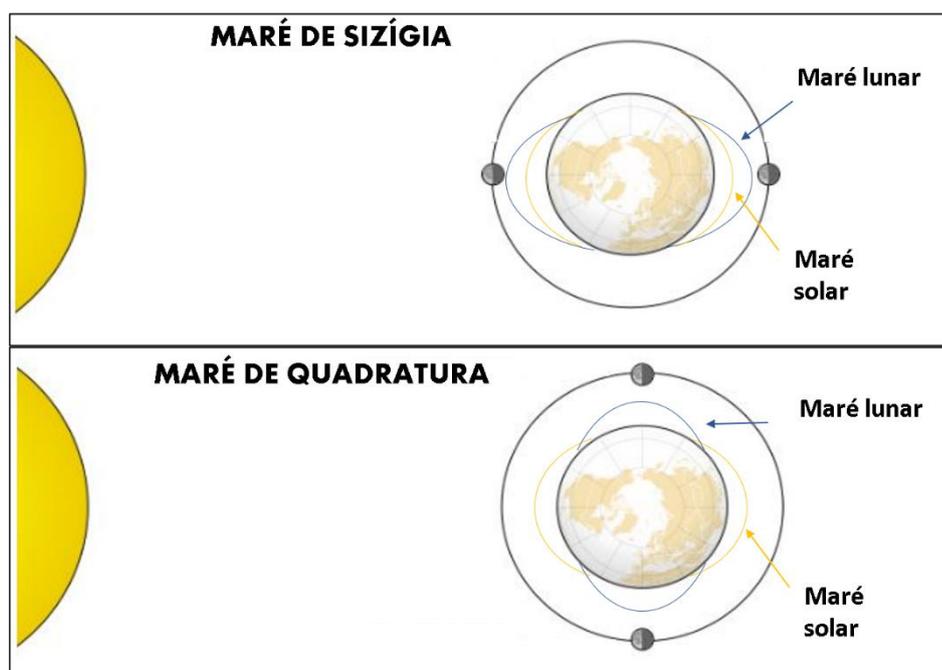
Forças gravitacionais solares e lunares, combinadas com a rotação da Terra, geram mudanças periódicas no nível do mar, conhecidas como as marés. As marés alta e baixa ocorrem duas vezes por dia na maioria dos locais costeiros do mundo (marés semiduras), embora alguns lugares experimentem apenas uma maré alta e baixa por dia (marés diurnas). Outros lugares são caracterizados por uma combinação de diurna e oscilações semiduras (marés mistas). A diferença em altura do nível do mar entre a maré alta e a baixa em um dado local é chamada de amplitude das marés e pode variar diariamente, dependendo da localização do sol e da lua, e globalmente, da localização costeira (IRENA, 2014).

O alinhamento ou o não alinhamento entre a Lua e o Sol também geram uma mudança na atração do corpo d'água na Terra, produzindo as marés de sizíguas (spring tides) e marés de quadratura (neap tides), respectivamente. As marés de sizíguas ocorrem quando o Sol, a Lua e a Terra se alinham, uma configuração conhecida como a sizígia, resultando na soma da atração gravitacional da Lua e do Sol nas massas de água da Terra. Nesse momento ocorrem as maiores marés altas e as menores marés baixas. Por outro lado, as marés de quadratura, acontecem quando a Lua e o Sol são perpendiculares um ao outro. Isso faz com que a atração gravitacional de cada corpo celeste se alongue, causando menos variações extremas das marés (maré alta e maré baixa mais próximas da média) (Figura 11).

A energia das marés consiste em componentes potenciais e cinéticas, graças à elevação no nível da água e às correntes resultantes, respectivamente. Portanto, as tecnologias de energia das marés podem ser categorizadas em dois tipos principais: tecnologias de amplitude de maré e corrente de maré, que aproveitam o potencial da maré e a energia cinética, respectivamente (O'ROURKE *et al.*, 2010).

Para o aproveitamento dessa energia é necessária uma variação de altura de maré superior a 5 m (ETAMADI *et al.*, 2011). Regiões como a costa norte do Brasil são adequadas para tanto, assim como o litoral do Maranhão, cuja amplitude das marés chega aos 7m (ESTEFEN, 2012).

Figura 11. Alinhamento Sol-Terra-Lua na formação das marés de sizígia e de quadratura.



Fonte: Modificado de WILLEMSSEN, 2019.

#### 2.3.5.1 Gradiente de Maré

As mudanças de altura no nível do mar, causadas pela atração gravitacional da lua, do sol e de outros corpos astronômicos nos corpos d'água oceânicos podem gerar uma energia potencial. Os efeitos dessas marés são complexos e a maioria dos grandes oceanos e mares tem sistemas de marés internos (HUCKERBY *et al.*, 2012). Sendo assim, para se prever a maré em determinada região deve-se fazer medições locais do nível de maré e a partir delas fazer uma análise harmônica e determinar a intensidade de determinadas componentes naquele local específico. Ainda assim serão observadas diferenças entre a maré prevista e a maré real, causadas por fenômenos meteorológicos que influenciam no nível do mar. Mesmo assim, as previsões de maré são extremamente confiáveis e podem ser feitas para longos períodos no futuro e no passado.

O aproveitamento desta fonte energética é realizado através de barragens com a instalação de turbinas apropriadas para baixa queda e grande vazão com ou sem controle do ângulo de ataque. Desta forma, as marés enchem o reservatório criando um desnível suficientemente elevado entre os lados da barragem, que resulta em uma energia potencial que é convertida em mecânica através das turbinas e em elétrica através de um gerador acoplado. Portanto, trata-se do mesmo princípio utilizado em usinas hidroelétricas, se diferenciando apenas que o

reservatório é enchido pela ação das marés, além da intermitência e inversão do fluxo (LEITE NETO, 2017).

Para existir a disponibilidade energética dessa fonte são necessárias grandes amplitudes de maré e uma morfologia do local adequada para o represamento da água que formará o reservatório (BEZERRA *et al.*, 2011). A Figura 12 ilustra a gama de marés encontrada globalmente em constituintes primários das marés, o que demonstra que existem certas áreas ao redor do mundo onde é provável que o recurso seja suficiente para aplicar projetos de maré.

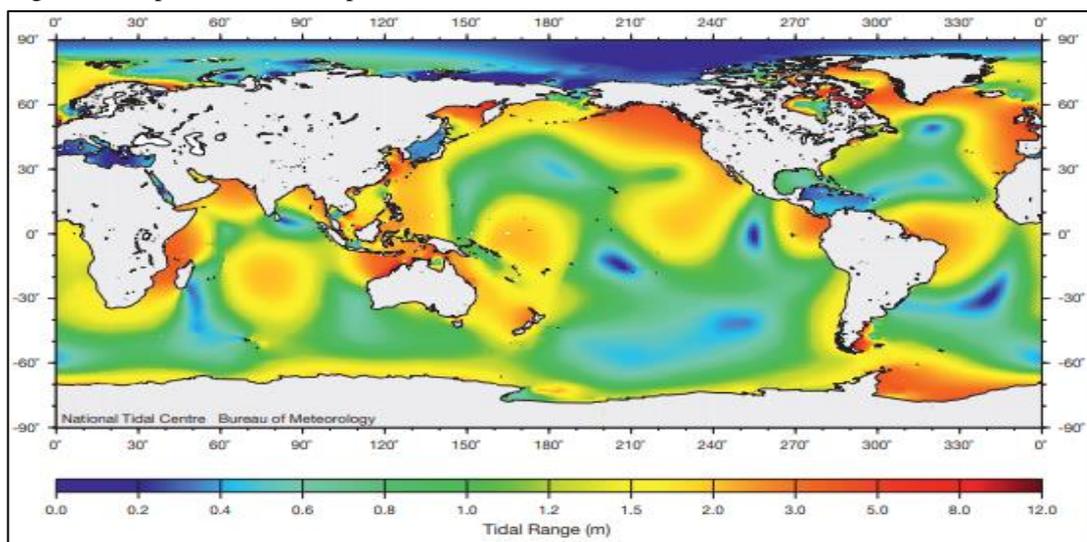
As usinas de alcance das marés podem ser costeiras (barragem) ou localizadas inteiramente em alto-mar (como uma lagoa). A principal diferença entre os dois se refere ao perímetro do represamento. Existem também lagoas costeiras, onde a maior parte do perímetro é artificial, potencialmente possibilitando desenvolvimentos menores com impactos ambientais mais limitados do que as barragens - as últimas abrangendo geralmente toda a largura de um estuário (NEILL *et al.*, 2018).

Uma usina de gradiente de maré pode ser operada de três formas, que são: 1) geração em maré vazante, 2) geração em maré enchente e 3) geração de efeito duplo, que é a combinação das duas primeiras. A primeira forma é a mais simples, após a maré cheia, as comportas de enchimento são fechadas e o processo de geração é iniciado quando o desnível é aproximadamente a metade da amplitude da maré e se mantém até que a energia potencial não seja mais suficiente para a geração de energia, e então é fechada a passagem de água para as turbinas e aberta a do enchimento do reservatório e o processo se repete. O segundo modo de operação é similar ao anterior, todavia, a geração é na enchente. Entretanto, o terceiro modo é a combinação dos dois anteriores (BEZERRA *et al.*, 2011).

#### 2.3.5.2 *Correntes de Maré*

A geração de energia através da corrente de maré possui características semelhantes à geração eólica, quanto à modelagem de potência mecânica transformada da energia cinética contida no fluido. A geração de energia ocorre a partir do deslocamento da massa de água com uma velocidade  $v$  vindo de encontro perpendicular com a turbina, transformando a energia cinética em mecânica. No eixo da turbina está acoplado um gerador elétrico, que pode ser gerador de indução ou gerador síncrono, que transforma energia mecânica em elétrica. A energia elétrica gerada pela maioria destas máquinas não possui características de tensão e frequência compatíveis com a rede elétrica, necessitando assim de um conversor de potência. (CHEN *et al.*, 2012, SÁ *et al.*, 2017).

Figura 12. Mapa mundial da amplitude média das marés



Fonte: IRENA, 2014a

As correntes de maré podem ser excepcionalmente fortes em áreas onde grandes faixas de maré são ainda mais limitadas pela topografia local. Também haverá período de tempo em que ocorrerá pouco ou nenhum fluxo horizontal de água (ou seja, água frouxa - pouco tempo antes da maré mudar entre vazante e inundação e vice-versa) (IRENA, 2014a).

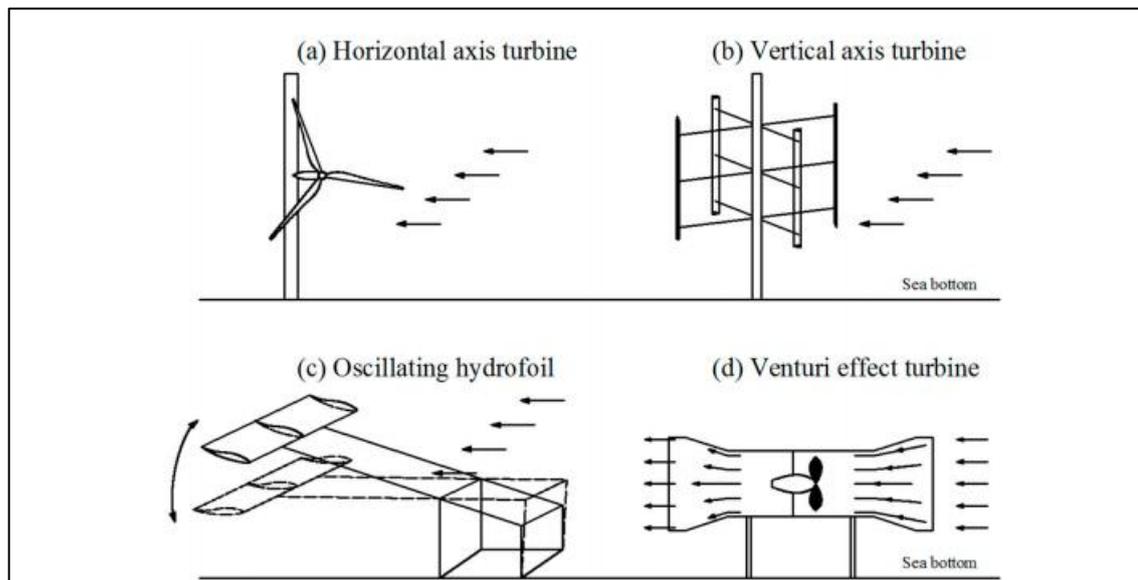
O poder da corrente de maré captura a energia cinética do movimento da maré. Várias correntes diferentes de energia das marés, baseados em conceitos de tecnologia de dispositivos como os conversores foram propostos e desenvolvido nos últimos anos. As principais diferenças entre os conceitos referem-se ao método de fixação da turbina em posição, o número de lâminas e como o tom das lâminas é controlado. Os dispositivos de correntes de maré são geralmente modulares e destinado à implantação em "matrizes" para uso comercial, a fim de obter uma produção combinada significativa de energia (HUCKERBY *et al.*, 2012).

Os quatro principais tipos de dispositivos de conversão de energia atuais são os seguintes (Figura 13):

- a) Turbina de eixo horizontal - as pás, acionadas pela energia atual, giram em torno do eixo horizontal;
- b) Turbina do eixo vertical - as pás, acionadas pela energia atual, giram em torno do eixo vertical;
- c) Hidrofólio oscilante - as correntes que passam no hidrofólio resultam na força de elevação, que pode conduzir o movimento do sistema hidráulico para gerar eletricidade;
- d) Turbinas com efeito Venturi - aproveitam a energia cinética da corrente

amplificando a corrente velocidade pelo efeito Venturi na seção estrangulada de um tubo.

Figura 13. Tipos primários de dispositivos de conversão de energia das marés e das correntes oceânicas.



Fonte: SHADMAN et al., 2019

## 2.4 MODELO HIDRODINÂMICO

### 2.4.1 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. Para solucionar esses tipos de equações, substituir o modelo numérico, passando-os de um modelo contínuo para um modelo analítico. 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, tendo como exemplo baías, sistemas estuarinos, rios, lagos reservatórios, etc. As propriedades de fluxo podem ser medidas no campo, previsto com métodos estatísticos, avaliada com soluções analíticas ou estimado com modelos hidrodinâmicos numéricos as características hidrodinâmicas são simuladas por modelos hidrodinâmicos unidimensional (1D) ou bidimensional (2D) com modelagem tridimensional ainda rara e usada para casos especiais. 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.

Pode se aplicar três tipos de sistemas hidrodinâmicos, que variam de acordo com sua complexidade: modelo unidimensional (1D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D) (ROSMAN 1997).

Na presente dissertação de mestrado é utilizado o Modelo Hidrodinâmico (2DH). O modelo bidimensional (2D) possui somente as dimensões (x, y, 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). Normalmente se aplica corpos d'água que tem pouca estratificação lateral e estratificação predominantemente vertical. Normalmente são corpos d'água estreitos.

#### 2.4.2 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.

O SisBaHiA® foi desenvolvido na COPPE/UFRJ, no âmbito dos programas de Engenharia Oceânica e Engenharia de Sistemas e Computação, e é cedido gratuitamente para fins acadêmicos. De acordo com ROSMAN (2020) 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 com o programa quando considera 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.

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.

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.

O modelo hidrodinâmico determina em cada ponto,  $(x, y)$ , do corpo d'água, os valores médios na vertical das componentes nas direções  $x$  e  $y$ , da velocidade de corrente de maré,  $u(x, y, t)$  e  $v(x, y, t)$ , 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  $y$ . 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 rasas).

O modelo resultante, bidimensional na horizontal (2DH), e 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.

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.

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 Pond e 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 módulo de transporte Euleriano é 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**

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:

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

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

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

3. Equação da continuidade (do volume):

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

Onde:

- u e v são as componentes da velocidade do escoamento respectivamente, nas direções x e y
- $\zeta$  (x, y) 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 referência;
- $\Phi$  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 ângulo de latitude.

Tabela 4: Significado dos termos das equações governantes do módulo 2DH

$\frac{\partial U}{\partial t}$	aceleração local do escoamento;
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y}$	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;
$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial H \bar{\tau}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{\tau}_{xy}}{\partial y} \right)$	resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento;
$2\phi \sin \theta V$	força de Coriolis devido ao fato do referencial estar em movimento na terra;
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S)$	tensão no vento na superfície livre por unidade de massa;
$\frac{1}{\rho_0 H} (-\tau_x^B)$	tensão de atrito no fundo atuante no escoamento por unidade de massa.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

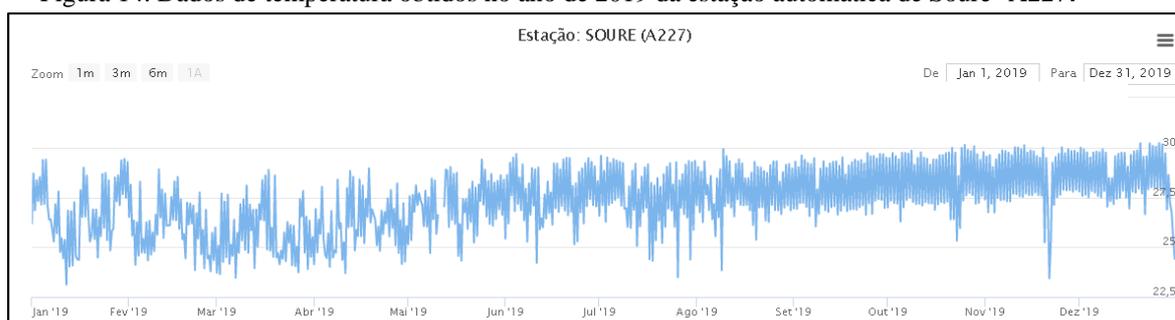
#### 3.1 CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

##### 3.1.1 Clima

O clima da região é do tipo Af na classificação de Köppen (1900-1936), que caracteriza um clima tropical equatorial, ou seja, quente e úmido. As chuvas são constantes, com ausência de estação de secas. Considerando as precipitações pluviais, o clima da região é marcado por duas estações: o verão, de julho a outubro (temperaturas máximas próximas de 35°C); e o inverno, de novembro a junho (temperaturas mínimas, próximas de 19°C). O inverno é a estação das grandes chuvas. Segundo Menezes *et al.* (2015), as temperaturas médias anuais estão entre 24 °C e 26 °C.

As menores temperaturas médias do ar ocorrem de janeiro a maio, representando a estação chuvosa com elevada nebulosidade. A temperatura máxima do ar aumenta continuamente de junho a novembro e as temperaturas medias do ar mais elevadas ocorrem em outubro, que representa o período menos chuvoso (Figura 14). No ano de 2019 a temperatura do ar média foi de 27,3 °C com umidade relativa do ar muito alta o ano todo, mantendo-se sempre acima dos 80 % (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2020).

Figura 14. Dados de temperatura obtidos no ano de 2019 da estação automática de Soure- A227.



Fonte: INMET (2020).

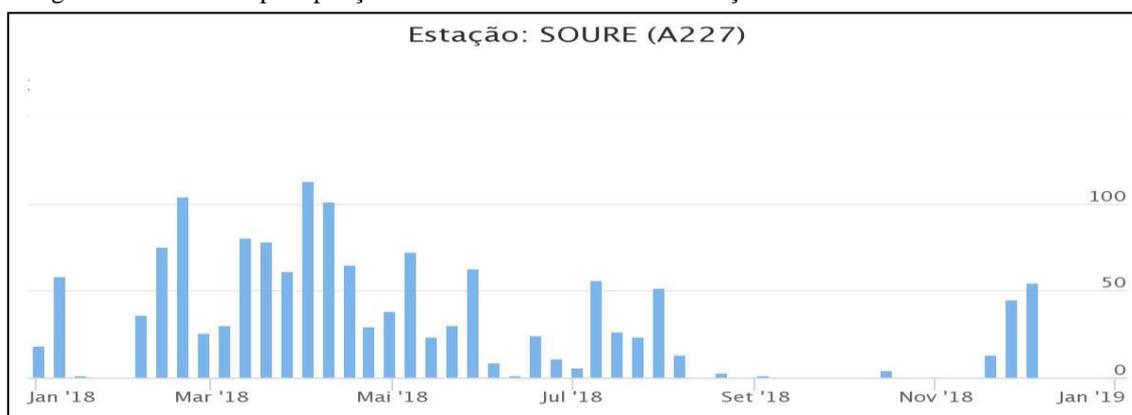
### 3.1.2 Precipitação

Na Amazônia Oriental os sistemas meteorológicos atuantes vão desde sistemas de grandes escalas como a Zona de Convergência Intertropical-ZCIT a sistemas de menor escala, onde todos contribuem para a formação e distribuição das chuvas na região. Especificamente na mesorregião Nordeste Paraense, ocorre a junção de vários sistemas meteorológicos, o que favorece a incidência de chuva ao longo do ano (Cordeiro *et al.*, 2017). Essa característica confere à mesorregião como a mais chuvosa do ano no estado do Pará (LOPES; SOUZA; BEZERRA, 2013).

A ilha do Marajó apresenta certa variabilidade espacial na estação chuvosa, com índices mais expressivos na porção Leste, marcadamente influenciada por circulações de brisa e, principalmente, pela ZCIT, com volume de chuvas reduzindo-se em direção ao Oeste (LOPES; SOUZA; BEZERRA, 2013).

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 ocorreu em março, seguido de fevereiro, e o de menor precipitação é o de outubro (Figura 15) (INMET,2020).

Figura 15. Dados de precipitação obtidos no ano de 2018 da estação automática de Soure- A227.



Fonte: INMET (2020).

### 3.1.3 Ventos

Ao longo do ano as mudanças na posição da ZCIT produzem uma variação sazonal. Na região norte os ventos alísios locais são mais intensos entre janeiro e abril, quando sopram predominantemente de nordeste, e mais amenos entre junho e outubro, quando sopram principalmente para oeste / noroeste. (ARRAUT *et al.*, 2012).

Devido a sua localização, a Ilha do Marajó recebe ventos de superfície litorânea vindos de nordeste, atingindo velocidades em torno de 2,6 m/s na costa do município de Soure e observam-se rajadas de vento de até 15 m/s (INMET, 2020).

Em janeiro, são observadas frequências de até 35% dos ventos, provenientes de Nordeste, cerca de 10 % de ENE e pouco menos de 20 %, da direção NNE. Em fevereiro, a frequência de Nordeste diminui para 20 %, observa-se um aumento na frequência NNE que sobe para 25%, também surgem as direções Norte, NNE e Sudoeste com uma frequência de 10 %, 5% e <5% respectivamente. Em março e abril, os padrões se assemelham com os de fevereiro. Já em maio, uma diferente configuração surge, com as frequências divididas entre as direções de Nordeste-Leste-Sudeste, com frequências entre 5% e 20%. Uma provável explicação para essa nova configuração é a atuação enfraquecida da ZCIT na região e a migração do fenômeno para o hemisfério Norte. Em junho a direção Leste se torna mais frequentes, com cerca de 30%. Em julho os padrões se assemelham com os de junho. Em agosto os ventos de Nordeste são os mais frequentes novamente. Nesse mês as frequências ficam bem distribuídas entre as direções Nordeste e NNE, e, devido a fortes aquecimentos na costa, as linhas de instabilidades, formadas no oceano, forçam as frequências de Nordeste. O mês de julho pode ser considerado um mês de transição entre as baixas e altas frequências. No quadrimestre seguinte, setembro, outubro, novembro e dezembro, as mais altas frequências do vento são observadas. Nesse período, é notável as frequências de até 71 % do vento, de direção Nordeste. (Figuras 16 e 17).

A direção predominante dos ventos é no sentido Nordeste, ou seja, os ventos são provenientes do oceano, em grande escala espacial, interagindo com os efeitos mecânicos locais (Figura 18).

Figura 16. Rosa dos ventos da distribuição de frequência da direção e intensidade de vento mensais do ano de 2019 da estação automática de Soure- A227.

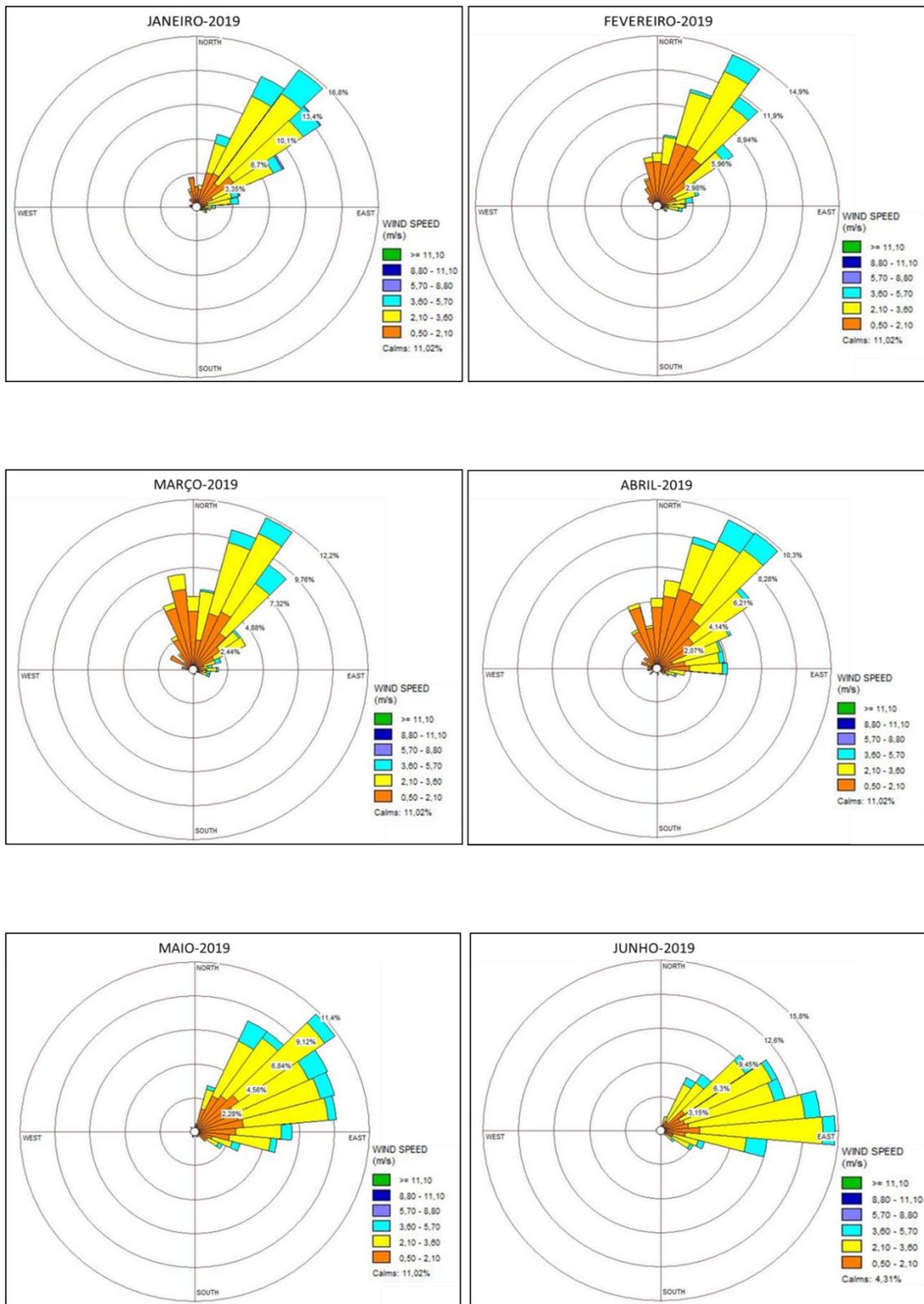
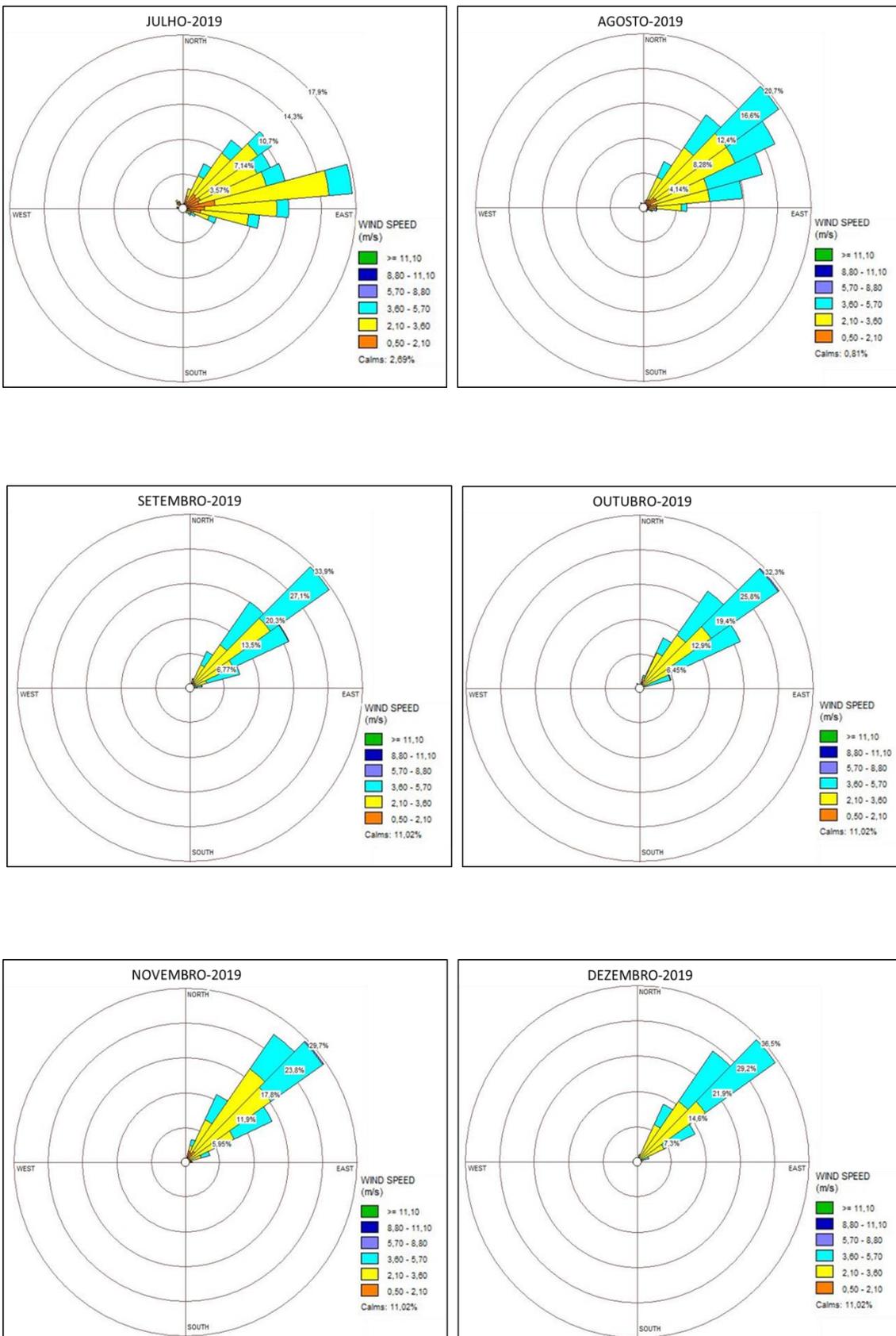
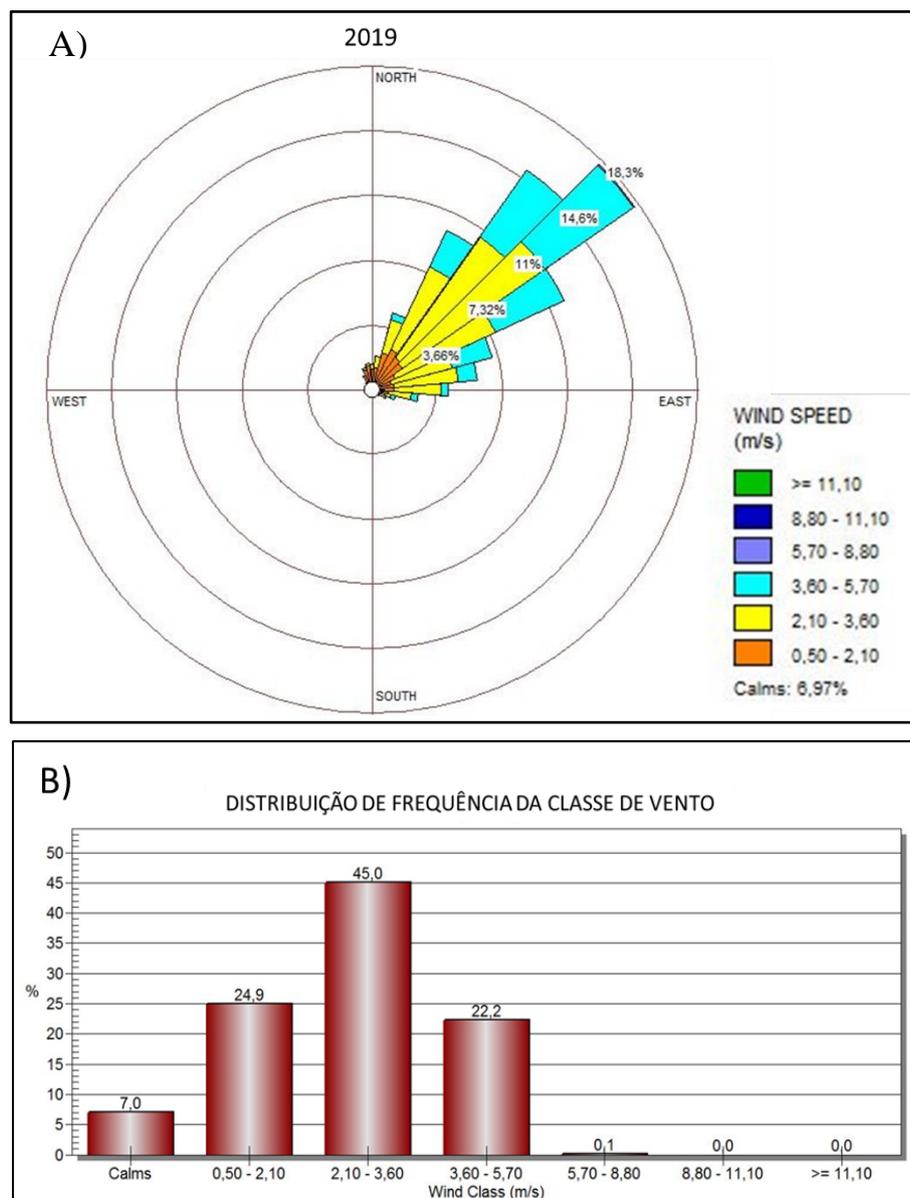


Figura 17. Rosa dos ventos da distribuição de frequência da direção e intensidade de vento mensais do ano de 2019 da estação automática de Soure- A227. (continuação)



Fonte: INMET, 2020

Figura 18. A) Rosa dos ventos da distribuição de frequência da direção e intensidade de vento do ano de 2019. B) Gráfico da porcentagem da intensidade de vento da estação automática de Soure- A227.



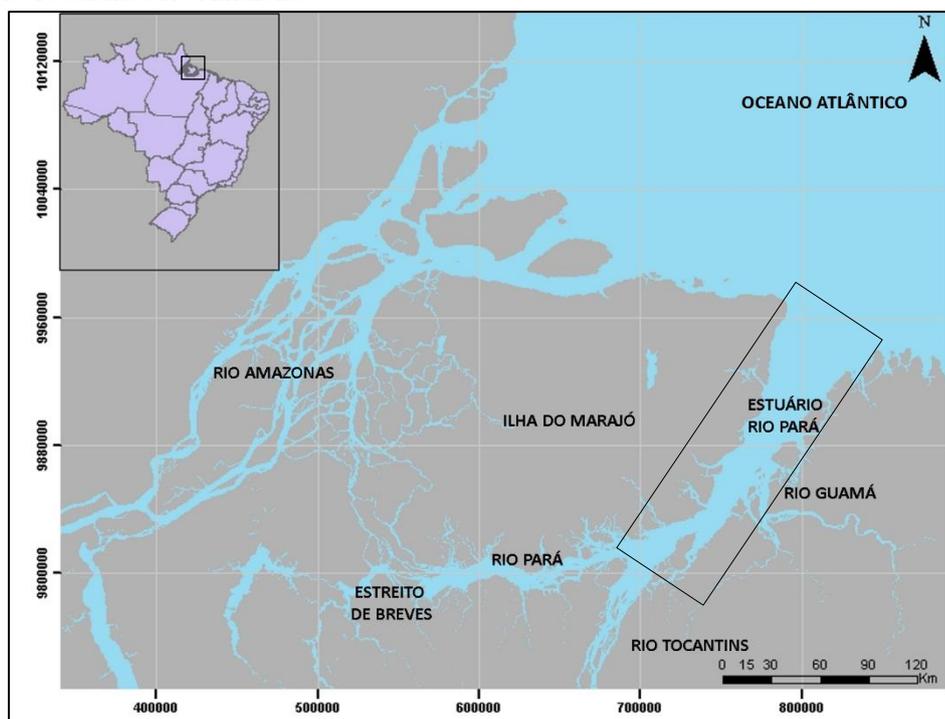
Fonte: INMET (2020).

### 3.2 HIDROLOGIA

O rio Pará não é um rio no sentido estrito do termo, pois carece de sua própria fonte e fluxo unidirecional em suas cabeceiras, antes, é formado pela entrada de vários outros sistemas fluviais antes de descarregar no Oceano Atlântico. Apesar da escala da bacia hidrográfica na qual está localizado o rio Pará é na verdade um sistema estuarino, e não um sistema fluvial, dado que é dominado por intensas correntes de maré semi-diurnas ao longo de sua extensão (PRESTES *et al.*, 2017).

O rio Pará não apresenta uma nascente propriamente dita, formado a partir da Baía das Bocas, a sudoeste da Ilha do Marajó, local onde recebe aporte fluvial do Rio Amazonas através de pequenos canais conhecidos como “Estreitos de Brêves” (COSTA, 2014). O rio flui para o leste, sul da ilha de Marajó, até sua confluência com o rio Tocantins, seu principal afluente (PRESTES *et al.*, 2014). A partir desse encontro começa o estuário do rio Pará, que, recebe a entrada de vários afluentes costeiros antes de chegar na sua foz, o Oceano Atlântico (Figura 19). Três bacias hidrográficas influenciam o rio estudado sendo elas: a bacia amazônica (rios Amazonas, Tapajós e Xingu), a bacia Araguaia-Tocantins (rio Tocantins) e as bacias da costa atlântica norte / nordeste (rios Guamá e Capim) com base nas categorias definidas pela ANA (PRESTES, 2020).

Figura 19. Localização do estuário do rio Pará e seus principais contribuintes, rio Guamá, rio Tocantins e rio Amazonas



Fonte: Autora.

Com aproximadamente 350 km de extensão e 60 km de largura na foz, este rio tem 25 km no estuário do meio e 10 km a montante. A profundidade em sua foz varia de 15 a 35 m de profundidade; no entanto, eventos neotectônicos geraram geometrias complexas de falhas. Os valores batimétricos máximos (80 m de profundidade) podem estar relacionados a falhas normais e transcorrentes no estuário médio (COSTA *et al.*, 2002).

### 3.3 VAZÃO

O estuário do Rio Pará apresenta 3 de contribuições: (i) parte da vazão do Rio Amazonas, que corre pelo Estreito de Breves; (ii) a descarga total do rio Tocantins, ao sul da Ilha de Marajó, e (iii) a descarga de outros sistemas fluviais costeiros, que estão representados no presente estudo pelos rios Capim e Guamá, que estão agrupados em um sistema único (Prestes et al., 2020).

Em relação à descarga líquida que atinge o estuário do rio Pará a divisão pode ser feita em dois períodos, alta descarga de janeiro a maio e baixa descarga de agosto a novembro (PRESTES, 2016). Na zona estuarina, a 150 km a montante, a vazão atinge um pico de 300.000 m<sup>3</sup>/s na maré vazante e 200.000 m<sup>3</sup>/s na maré cheia (PRESTES *et al.*, 2014).

O período chuvoso, a maior descarga do rio Tocantins e de seus afluentes barram a entrada de água do rio Amazonas pelo Estreito de Breves bem como a intrusão salina na baía do Marajó (Barthem e Schwassmann, 1994). Por outro lado, durante o período seco, a redução da descarga da bacia Tocantins-Araguaia permite a intrusão de água do rio Amazonas pelos Estreitos de Breves e de água marinha na baía do Marajó.

A baía do Marajó está sujeita a variações de nível significativas devido ao ciclo anual de enchente e vazante dos rios associado ao regime de chuvas da região. A água doce que é adicionada à baía do Marajó durante o período de cheia dos rios, altera não só o domínio da baía como também causa alterações físico-químicas na plataforma continental adjacente (CORRÊA, 2005).

### 3.4 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A Planície Costeira paraense ocorre entre a linha de costa e os tabuleiros costeiros formados por arenitos imaturos ou conglomeráticos (Grupo Barreiras) e calcários (Formação Pirabas), delimitados por paleofalésias. Esta unidade é constituída por sedimentos inconsolidados (Holoceno/Recente).

O relevo da Ilha do Marajó é constituído por duas unidades: (1) Planalto Rebaixado da Amazônia ou Pediplano Pleistocênico e (2) Planície Amazônica, constituída por sedimentos recentes e marca um relevo plano e baixo que abrange a maior parte da Ilha (Barbosa *et al.*, 1974;). Na borda da ilha, os sedimentos do Grupo Barreiras e Pós-Barreiras constituem o Planalto costeiro, com falésias ativas, em recuo em determinados trechos.

Segundo CPRM (2013), na parte S-SW da Ilha do Marajó, predominam planícies aluviais, onde se destacam terrenos baixos e inundáveis (Lago do Arari – Centro - Oriental da ilha). Na parte centro-ocidental da ilha, ocorrem baixos tabuleiros (de terra firme da Amazônia, Ab'Saber, 1967) e consistem em superfícies de topos planos a ligeiramente ondulados muito baixas (5-20m). No litoral Leste, as planícies costeiras estão encaixadas no Planalto Costeiro que avança sobre a Baía do Marajó (município de Salvaterra), fortemente erodido, entretanto, após o canal de maré de Paracauari, as planícies costeiras (Soure) são mais desenvolvidas. Dois grandes rios deságuam nos entornos da ilha do Marajó (Golfão Marajoará), a Oeste o Amazonas com largura de 150km (linha reta da Ilha do Bailique ao Canal Sul do rio Amazonas) e a Leste o Pará, com largura de 60km (Cabo Maguari – Ilha dos Guarás), e altas descargas de água e de sólidos, produzindo ilhas sedimentares, tais como: Grande de Gurupá, Pará, Queimada, Mexiana e Caviana, entre outras.

As unidades litoestratigráficas aflorantes na Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP) incluem rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, com idades variando do Pré-Cambriano até o recente. As rochas pré-cambrianas restringem-se à área continental adjacente, e ocorrem nas proximidades da Costa Atlântica do Salgado Paraense. A Bacia de Bragança-Viseu é assoalhada por rochas pré-cambrianas, sobre as quais ocorrem os sedimentos Cenozóicos (Terciário e Quaternário) (Ministério do Meio Ambiente-MMA, 2018).

O Terciário é marcado inicialmente pela sedimentação da Formação Pirabas. Esta formação é representada por calcários marinhos, compostos de micritos, bioclastitos, dolomicritos, biohermitos e margas intercalados com folhelhos cinza esverdeados a negros, contendo vegetais piritizados, tendo sido encontrados arenitos calcíferos nas camadas superiores (Ferreira, 1982).

Subsequentemente a esta deposição (transgressiva), houve a fase regressiva responsável pela instalação dos sedimentos do Grupo Barreiras. Segundo Rossetti *et al.* (1989), o Grupo Barreiras possui litofácies exclusivamente siliciclásticas. Goés e Truckenbrodt (1980) e Góes (1981) dividem o Grupo Barreiras em três litofácies: argilo-arenosa, arenosa e conglomerática. Rossetti *et al.* (1989) conseguiram identificar treze litofácies para os sedimentos do Grupo Barreiras e do Pós-Barreiras do Costa Atlântica do Salgado Paraense, podendo representar leques aluviais/planícies de areia/planície de lama, com rápidas inundações ocorrentes em clima árido e semiárido, e influência marinha.

Os depósitos sedimentares da formação Pós-Barreiras repousam sobre os sedimentos do Grupo Barreiras, e destes separam-se por uma discordância erosiva (Sá, 1969). Segundo Tatum *et al.* (2008), os sedimentos Pós-Barreiras na ZCEP incorporam dois episódios de sedimentação

Os sedimentos Pós-Barreiras I, inferiores, com até 10m de espessura, consistem, predominantemente, em areias de coloração vermelho-clara a alaranjada, friáveis a endurecidas, maciças, bioturbadas, de seleção moderada a boa. Esses depósitos são recobertos, em discordância erosiva, pelos sedimentos Pós-Barreiras II, com espessura entre 2 a 5m e são compostos por areias finas a muito finas, bem selecionadas, com fragmentos de carvão dispersos e, eventualmente, fragmentos de cerâmica e cores desde amarela clara a amarela dourada, laranja acinzentada, marrom amarelado e amarelo amarronzado (Rossetti *et al.*, 1989). Segundo os mesmos autores, a formação desses estratos ocorreu no final do Pleistoceno tardio ao Holoceno, entre 430.000 (60.000) e 3.400 (400) anos AP.

O Quaternário é representado por sedimentos areno-argilosos (Pleistoceno) do Pós-Barreiras e pelos depósitos da planície aluvionar, estuarina e costeira da cobertura sedimentar recente (MMA, 2018).

### 3.5 SEDIMENTAÇÃO

Um aspecto importante a ser considerado no estuário do Rio Pará é o processo hidrológico que determina a maior sedimentação arenosa, nos setores mais expostos à ação das ondas, possibilitando o desenvolvimento de praias estuarinas. Nos setores mais abrigados, onde predomina a deposição lamosa, formam-se as planícies de maré com manguezal. Nas áreas de contato, à medida que diminui a salinidade, na direção do interior da baía, os manguezais coexistem com as várzeas ou são substituídos por várzeas influenciadas por maré (FRANÇA e PIMENTEL, 20012).

Corrêa (2005) identificou duas áreas com dinâmicas sedimentares e circulação distintas na baía do Marajó: o lado oeste da baía do Marajó, onde predominam os sedimentos de areia média e fina e a morfologia de fundo altamente entrecortada apontam um regime hidrodinâmico de maior energia; e o lado leste da baía, com morfologia de fundo mais suave predominando silte grosso a fino, com áreas argilosas, o que caracteriza um regime hidrodinâmico de baixa energia. A região central da baía apresenta fácies transicional formada por areia muito fina. A classe silte e argila predomina por toda margem leste da baía do Marajó preenchendo os canais de maré. Esta classe se distribui em maior área na porção norte do estuário mesmo nas profundidades intermediárias (CORRÊA, 2005).

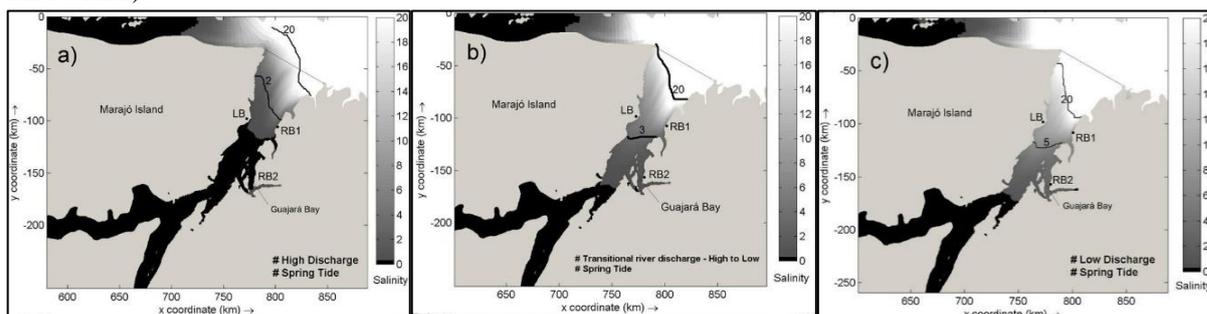
### 3.6 CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS

Na foz do estuário do rio Pará, as principais constituintes das marés são as componentes semidiurnas (M2, S2 e N2) identificadas por Beardsley *et al.* (1995), onde as três são responsáveis por 85 % da variação considerada. Ainda segundo esses autores, a onda de maré entra como uma onda progressiva e a amplitude da M2 é atenuada em 70 % estuário acima (350 km da foz até os Estreitos de Breves). Já a amplitude do semieixo maior da corrente de maré (M2) aumenta em direção rio acima de 0,6 m/s, próximo a foz do estuário do Rio Pará, para 1 m/s próximo a cidade de Belém. Prestes *et al.* (2017) em recente estudo da propagação das componentes M2 e M4 no estuário do Rio Pará, constataram a existência de assimetria positiva, no qual o período da enchente é mais curto que o período de vazante. A assimetria positiva das marés aumenta à medida que a altura diminui, resultando na atenuação total das marés rio abaixo no estuário do rio Pará (FREITAS *et al.*, 2012).

### 3.7 SALINIDADE

A partir de um modelo numérico 2D, Rosário et al. (2016) estudaram a variação temporal e espacial de salinidade. O modelo considerou apenas a vazão do rio e a variação das marés, pois os ventos eram constantes no espaço e no tempo. Assim, no período de alta vazão e maré sizígia, a intrusão de salinidade ocorreu em aproximadamente 70 km (Figura 20a). No período de transição entre a vazão alta e baixa do rio e também a maré de sizígia, a intrusão de salinidade ocorreu até aproximadamente 110 km (Figura 20b). No outro caso, em condição de baixa vazão da principal nascente do estuário (Rio Tocantins) e condição de maré de sizígia, a intrusão de salinidade no estuário atingiu cerca de 130 km da foz do estuário (Figura 20c).

Figura 20. Resultado do modelo 2D da salinidade. a) alta descarga; b) descarga transitória; c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário é o ponto de referência para distâncias. Os pontos de amostra são representados (LB, RB1 e RB2).

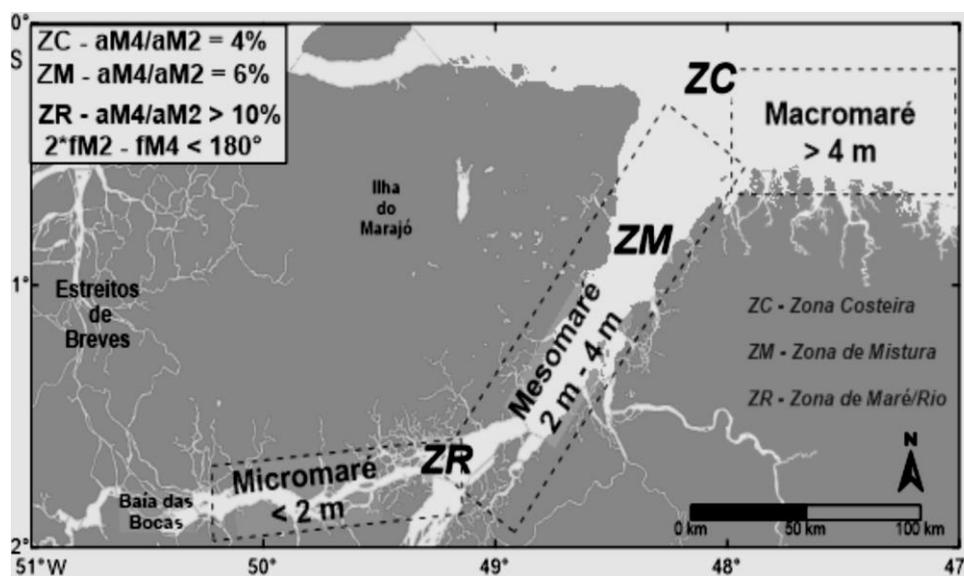


Fonte: Rosário et al, 2016.

Prestes, (2016), gerou um mapa com os regimes de maré e suas divisões estuarinas a partir do modelo de salinidade aplicado.

Segundo o estudo de Prestes, (2016), o estuário do Rio Pará apresenta três divisões estuarinas classificado a partir da salinidade (KJERFVE, 1987), a Zona Costeira, Zona de Mistura e Zona de Maré. A figura 21 representa o mapa ilustrativo indicando o domínio dos regimes de maré e suas divisões estuarinas.

Figura 21. Mapa ilustrativo com um resumo dos regimes de maré que ocorrem no estuário do Rio Pará. São apresentadas as divisões estuarinas (KJERFVE, 1987): ZC – Zona Costeira; ZM –Zona de Mistura e ZR – Zona de Maré ou do Rio. São apresentados ainda os valores gerais de distorção e assimetria da onda de maré no estuário, de acordo com análise das amplitudes e fases das componentes M2 e M4.



Fonte: Prestes, 2016.

## 4 METODOLOGIA E MATERIAIS

### 4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Esta etapa apresenta uma síntese dos principais conceitos teóricos necessários para um melhor desenvolvimento da dissertação de mestrado. Foi realizado um levantamento de dissertações, teses, artigos, papers e relatórios referentes aos aspectos oceanográficos, geológicos e geomorfológicos da região e do local; aos ambientes costeiro ao longo da costa brasileira e outros locais do mundo, com características semelhantes às da costa nordeste paraense e; as metodologias que foram aplicadas neste trabalho. Com este material científico, foi possível fazer uma caracterização da área de estudo, visando contribuir para a interpretação dos resultados obtidos.

### 4.2 MODELO DE CIRCULÇÃO HIDRODINÂMICO

A modelagem hidrodinâmica foi realizada mediante o uso do sistema de base hidrodinâmica ambiental (SisBaHiA ®) da COPPE/UFRJ. Para aplicar um modelo hidrodinâmico faz-se necessário fornecer ao modelo utilizado as características básicas do ambiente a ser modelado. Neste trabalho as condições de entrada foram temperatura (°C), precipitação, intensidade e direção do vento, cotas de batimetria, constantes harmônicas e valores de vazão.

Além disso faz-se necessária a confecção de mapas de contorno de terra e mar, juntamente com outros contornos relevantes para área como ilhas, para poder assim gerar o domínio da modelagem e a malha a ser utilizada.

#### 4.2.1 Dados Ambientais utilizados para a implementação do Modelo Hidrodinâmico

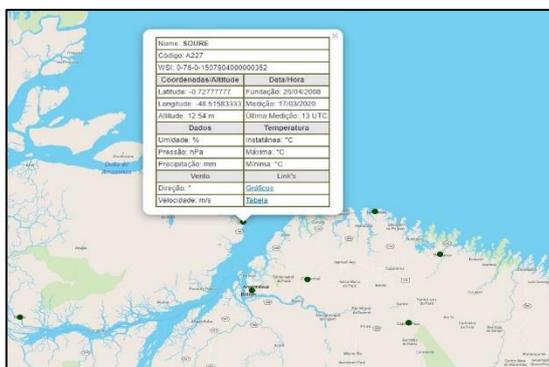
##### 4.2.1.1 Variáveis Meteorológicas

As variáveis meteorológicas usadas nas informações de entrada do modelo foram temperatura (°C), precipitação e ventos (direção e velocidade). Os dados foram fornecidos pelo INMET, da estação automática de Soure- A227 localizada na margem esquerda do estuário do rio Pará nas coordenadas UTM 22M 776075.065092 E e 9910390.07089 S. (Figura 22).

A fim de identificar a variação sazonal optou-se por alimentar o modelo com dados de velocidade e direção dos ventos. A partir desses dados foi gerada uma planilha anual de

velocidade do vento e direção para o ano de 2019, que foram estudados pelo formato de rosa dos ventos, elaborado através do software WRPLOT View versão 8.0.2 (Wind Rose Plots e Meteorological Data).

Figura 22 Localização da estação automática de Soure- A227



Fonte: INMET (2020).

#### 4.2.2 Batimetria

Os dados de profundidades foram obtidos a partir das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN, 2020), que abrangem toda a área de estudo. As cartas náuticas utilizadas na montagem da base de dados de batimetria foram as seguintes:

- Carta Náutica nº 302 - Brasil - Costa Norte - de Salinópolis ao Canal do Espadarte. 4ª ed. 2006. Escala 1:100.000.
- Carta Náutica nº 303 - Brasil - Rio Pará - do Cabo Maguari à Mosqueiro. 4ª ed. 2013. Escala 1:100.000.
- Carta Náutica nº 304 - Brasil - Rio Pará - de Mosqueiro à Vila Do Conde. 4ª ed. 2014. Escala 1:75.000.
- Carta Náutica nº 305 - Brasil - Rio Pará - da Ilha do Capim à Ilha da Conceição. 5ª ed. 2014. Escala 1:100.000.
- Carta Náutica nº 306 - Brasil - Rio Pará - Da Ilha da Conceição aos Estreitos. 2ª ed. 1993. Escala 1:99.960.

Com a área delineada, as cartas foram digitalizadas e georreferenciadas no sistema de projeção UTM, datum WGS-84, através dos softwares ArcGis 10.2.2 e Global Mapper 11, e sobrepostas ao mapa base da área de estudo (Figura 23). A partir das cartas georreferenciadas, os dados de profundidade foram digitalizados através da ferramenta “digitalize” contida no Surfer (Figura 24), gerando uma sequência de dados contendo as seguintes informações:

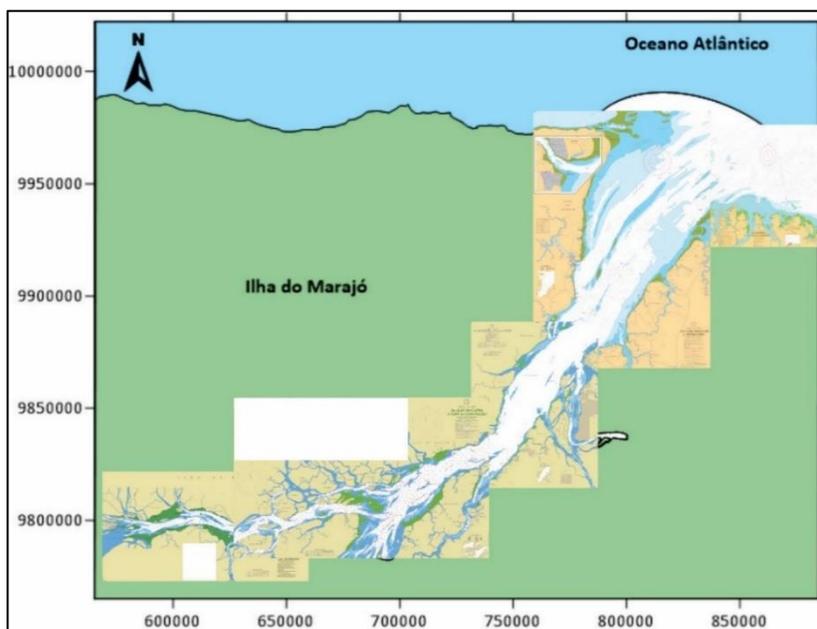
latitude, longitude e profundidade (eixos x, y e z), sendo o eixo z, de profundidade, inserido manualmente e negativo, por se tratar de uma bacia sedimentar abaixo do nível da água. Os dados digitalizados geram uma única planilha com informações de latitude, longitude e a quantidade de pontos coletados em cada coluna.

Para gerar um mapa batimétrico a partir desses dados foi utilizado o método de interpolação. Esse método estima valores desconhecidos através de valores conhecidos. O uso de uma determinada técnica interpoladora irá depender do conhecimento dos dados de entrada e das características do interpolador a ser utilizado na geração das imagens, os mais usados são a Krigagem, a mínima Curvatura e o Bidirecional (SANTOS *et al.*, 2016). A interpolação é considerada de estimativa indireto, uma vez que os contornos são obtidos a partir de dados, porém, são estimados para os nós da grade. Após a reticulação, um algoritmo de interpolação deve ser usado para ajustar uma superfície através dos dados estimados para os nós (LANDIM, 2003).

A técnica de interpolação utilizada nesta dissertação de mestrado foi o de krigagem (kriging) do Surfer 11. Com isso foi gerado um grid para interpolar os pontos digitalizados e gerar os mapas batimétricos. Esse processo foi repetido em todos os mapas.

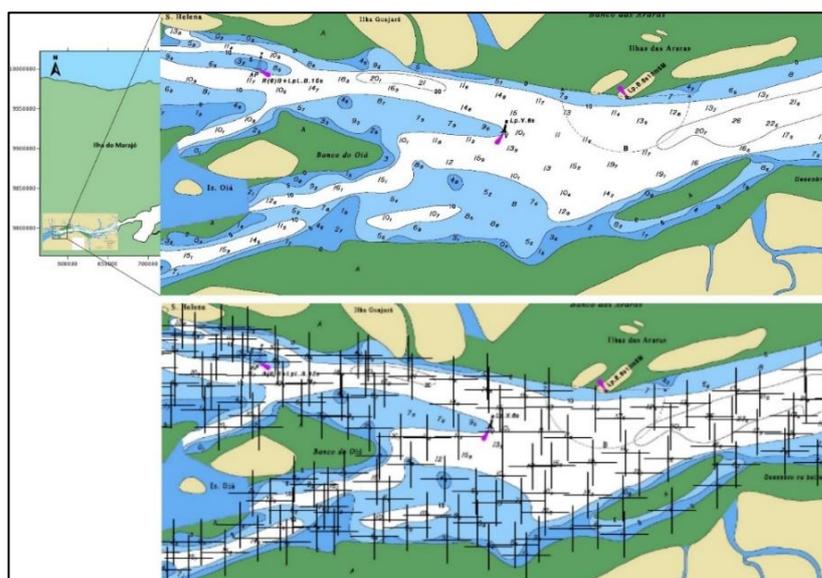
A krigagem se diferencia de outros métodos de interpolação pela estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (CÂMARA; MEDEIROS, 1998). Segundo Yang (2012), a krigagem é capaz de expressar melhor as tendências sugeridas pelos dados, de forma que valores de picos podem ser conectados ao longo de uma crista, em vez de ficarem isolados caracterizando o efeito indesejado em imageamento por interpolação conhecido como “bull’s eye”. Para Santos *et al.* (2016) a escolha do método para cada tipo de dado e também a célula usada deve ocorrer de acordo com a necessidade do operador em ter um determinado quesito qualificado em detrimento de outro.

Figura 23. Cartas náuticas n° 302,303,304,305e 306 digitalizadas sobrepostas ao mapa base.



Fonte: Autora

Figura 24. Pontos de profundidade digitalizados a partir da Carta náutica N° 306



Fonte: Autora

### 4.2.3 Rugosidade de fundo

Os valores de rugosidade equivalente do fundo ( $\epsilon$ ) aplicados à modelagem, que são recomendações de Abbot e Basco (1989), serão associados à composição do sedimento de fundo (Tabela 5). Nesta dissertação de mestrado, foi adotado um valor único, que foi de 0,03 utilizado para rugosidade de fundo que compreende ao fundo com areia média, que foi determinado para o estuário do rio Pará.

Tabela 5- Valores propostos por Abbot e Basco (1989) para amplitude efetiva de rugosidade de fundo ( $\epsilon$ ).

Leito de sedimento com rugas e similares	
Predominância de silte e finos	$0.0001\text{m} < \epsilon < 0.0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0150\text{m}$
Predominância de areia média	$0.0100\text{m} < \epsilon < 0.0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0.0250\text{m} < \epsilon < 0.0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400\text{m} < \epsilon < 0.0800\text{m}$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1200\text{m}$
Sedimento com vegetação	$0.0500\text{m} < \epsilon < 0.1500\text{m}$
Sedimento com obstáculo (e.g. pedras, troncos)	$0.1500\text{m} < \epsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \epsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto ou similar	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho	$0.0070\text{m} < \epsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias	$0.0150\text{m} < \epsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras	$0.0400\text{m} < \epsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas	$0.1000\text{m} < \epsilon < 0.2500\text{m}$
Fundo de Concreto	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \epsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de Concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \epsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \epsilon < 0.0100\text{m}$

Fonte: ABBOT E BASCO ,1989

#### 4.2.4 Constantes Harmônicas

As constantes harmônicas disponíveis para a região de estudo no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras fornecido pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) foram obtidas através de levantamentos antigos, da década de 1991, com registros abrangendo aproximadamente 30 dias. Devido a defasagem dos dados existentes, optou-se por realizar uma análise a partir de dados disponíveis mais recentes para obtenção das constantes harmônicas necessárias.

Com isso as constantes harmônicas utilizadas para o modelo hidrodinâmico foram obtidas através do Módulo de Análise e Previsão de Maré do SisBaHiA®. Os módulos implementados no SisBaHiA® para análise e previsão das marés foram elaborados a partir das rotinas propostas por M. Foreman do Institute of Ocean Sciences, British Columbia, as quais também constituem a base do sistema TOGA utilizado pela Universidade de Honolulu - Hawaii para o controle de qualidade dos dados do programa GLOSS - Global Sea Level Observing System (ROSMAN, 2020).

A análise harmônica foi feita a partir de dados distribuídos pelo Porto de Vila do Conde em Barcarena. Os dados foram medidos entre os dias 01 de março de 2016 e o dia 30 de março de 2016 contemplando o total de 30 dias de registro do nível da água, numa taxa de 1 registro a cada 10 minutos.

A tabela 6 mostra a amplitude e a fase das 30 principais constituintes de maré obtidas a partir da de séries temporais de elevação do nível d' água. 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.

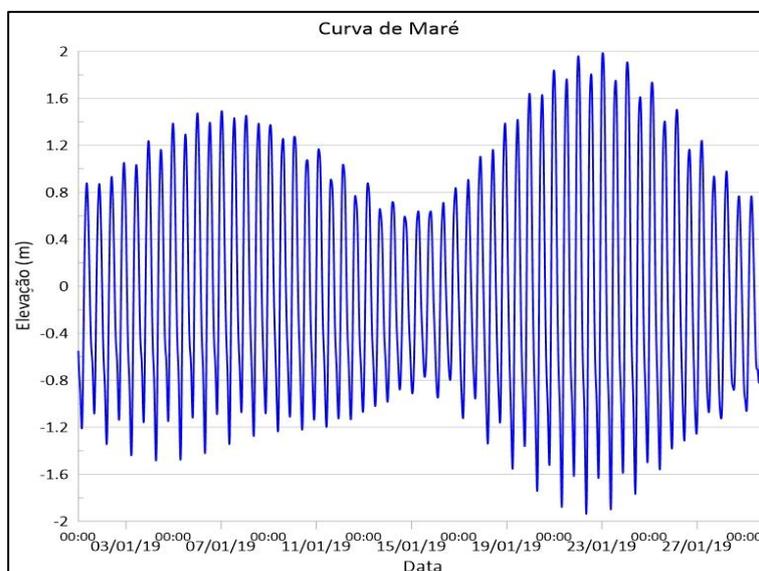
A curva de maré genérica para um mês gerada a partir das constantes harmônicas pode ser observada na figura 25. Analisando a curva de maré prevista é possível observar os ciclos de sizígia e quadratura, como também a desigualdade diurna.

Tabela 6. Constantes harmônicas obtidas pelo Módulo de Análise de maré do SisBaHiA® para 30 dias de registro no Porto de Vila do Conde (PA).

Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)
MSf	1275721.42312253	0.134400	34.205580
Mtm	789085.41438629	0.026200	44.862595
2Q1	100822.40076133	0.022600	140.431956
Q1	96726.08376243	0.020600	269.748530
O1	92949.63009972	0.102500	296.734842
M1	89399.69357361	0.009500	357.697552
K1	86164.09057816	0.061800	333.404141
J1	83154.51628312	0.003700	25.496622
OO1	80301.86721024	0.011800	120.493024
KQ1	77681.65186442	0.013900	284.187066
N2	45570.05357246	0.247200	349.848030
M2	44714.16431338	1.123400	357.067298
S2	43200.00001728	0.375800	39.992454
KJ2	42316.27820368	0.022700	172.918663
MO3	30190.69066682	0.038200	201.050890
M3	29809.44288793	0.006900	266.024304
MK3	29437.70382038	0.017400	229.985259
SK3	28773.74002598	0.012100	277.999122
MN4	22569.02602606	0.070900	277.426164
M4	22357.08217057	0.162700	284.358954
MS4	21972.02138947	0.105500	323.205492
S4	21599.99999568	0.020400	31.799158
2MK5	17751.16877578	0.003500	81.417303
2SK5	17270.54296292	0.000600	269.003685
2MN6	14998.62199535	0.049400	118.258489
M6	14904.72144396	0.075600	127.826884
2MS6	14732.59512973	0.070400	164.267000
2SM6	14564.39901535	0.021600	227.521540
3MK7	12706.70687471	0.000600	343.545494
M8	11178.54108182	0.027200	40.393525

Fonte: Autora.

Figura 25. Curva de maré genérica no estuário do rio Pará gerada a partir das constantes harmônicas desta área, ao longo de 30 dias, sendo estas condições adotadas na modelagem do Estuário do Rio Pará. O período gerado com auxílio do SisBaHiA®, foi do 1 a 30 de janeiro de 2019.

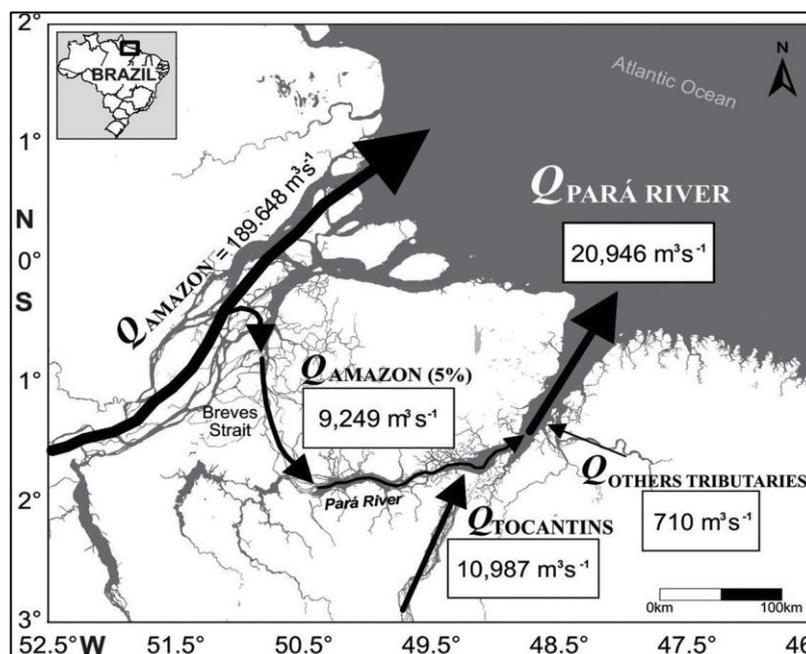


Fonte: Autora.

#### 4.2.5 Vazão

O dados de vazão foram retirados do trabalho de Prestes *et al.* (2020) que, através de dados históricos de vazão provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA), idealizou um modelo de caixa (*box model*) de descarga dos rios que banham a Zona Costeira Amazônica (ZCA), estimando a vazão do Rio Pará em condições estacionárias, ou seja, *inputs* dos contribuintes hídricos alimentam o sistema de forma constante ao longo do tempo (Figura 26). A elaboração desse modelo de caixa levou em consideração o somatório das descargas líquidas do Rio Amazonas, que flui através dos Estreitos de Breves; a descarga fluvial do Rio Tocantins e de outros tributários, neste caso, os Rios Guamá e Capim. Este modelo levou em consideração o trabalho de Callède *et al.* (2010) que estimaram a contribuição do Rio Amazonas através dos Estreitos de Breves como sendo 5% da descarga média.

Figura 26. Modelo de caixa (Box model) mostrando a descarga fluvial do Rio Pará em direção ao Oceano Atlântico. O valor do Rio Pará é a soma das diferentes entradas, ou seja, 5% da média histórica do Rio Amazonas ( $Q_{AMAZON} (5\%)$ ), que deságua no Rio Pará pelo Estreito de Breves, e o aporte total do rio Tocantins ( $Q_{TOCANTINS}$ ) e outros afluentes ( $Q_{OTHERS TRIBUTARIES}$ ).



Fonte: Prestes et al, 2020.

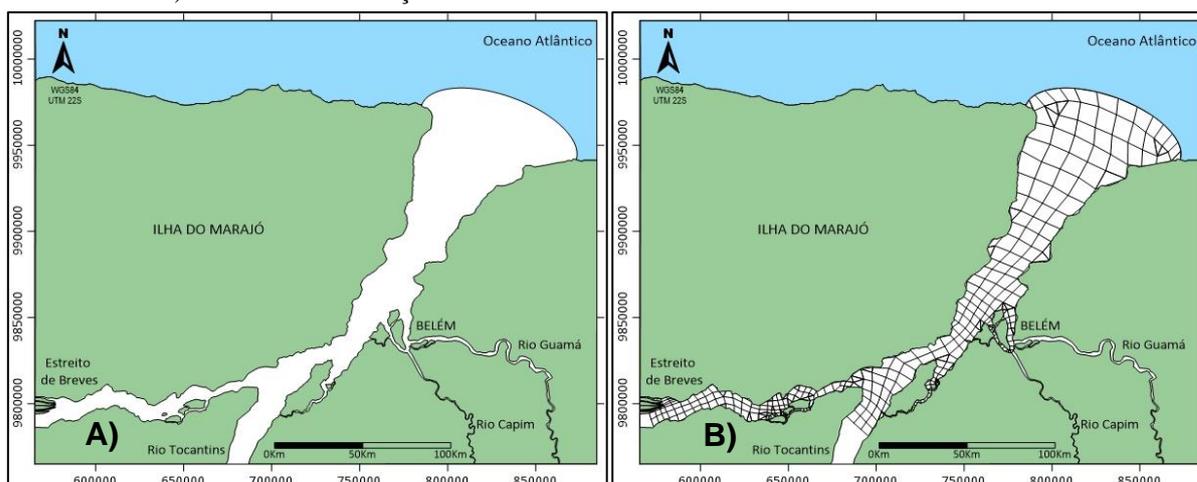
#### 4.3 DOMÍNIO DE MODELAGEM E MALHA

O domínio de interesse é uma etapa fundamental do processo de modelagem, devendo ser feita na fase de pré-processamento. Para tanto, faz-se necessária a confecção de mapas de contorno de terra e mar, juntamente com outros contornos relevantes para área como ilhas (Figura 27a).

Os dados utilizados para confecção dos mapas foram obtidos através de shapefiles do Brasil. Com o auxílio do software ArcGis os arquivos de shapefiles foram editados gerando os polígonos dos contornos de terra e de mar referente a área e estudo. Os mapas de base, de contorno de terra e de contorno de mar, adicionados ao sistema de modelagem, foram produzidos pelo programa de confecção de mapas Surfer®.

A malha foi confeccionada inteiramente no SisBaHiA® a partir do mapa base e seus respectivos contornos (estuário do rio Pará e margens). O domínio de modelagem foi discretizado por uma malha de elementos finitos. A malha utilizada no estuário do rio Pará possui 466 elementos, sendo 378 elementos quadrangulares e 88 triangulares, e contendo um total de 2151 nós de cálculo. A área total da malha de  $9527857878,576 m^2$  (Figura 27b).

Figura 27. A) Domínio de modelagem para o rio Pará em branco, com contorno de terra em verde e contorno de mar em azul. B) Malha de discretização do Rio Pará



Fonte: Autora.

#### 4.4 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®, com a finalidade de gerar modelos reproduzindo virtualmente a realidade hidrodinâmica do estuário do rio Pará. Os dados utilizados foram: 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. Os dados de batimetria foram organizados em planilhas do programa Excel e digitalizados no programa Surfer versão 8, após ter feito isso, foram inseridos no programa SisBaHiA®. Os dados de correntes e nível de maré foram submetidos a rotinas de processamento em ambiente Excel; os dados de correntes 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.

#### 4.5 DENSIDADE ENEGÉTICA

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

$$\left(\frac{P}{A}\right) = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad \text{equação 4}$$

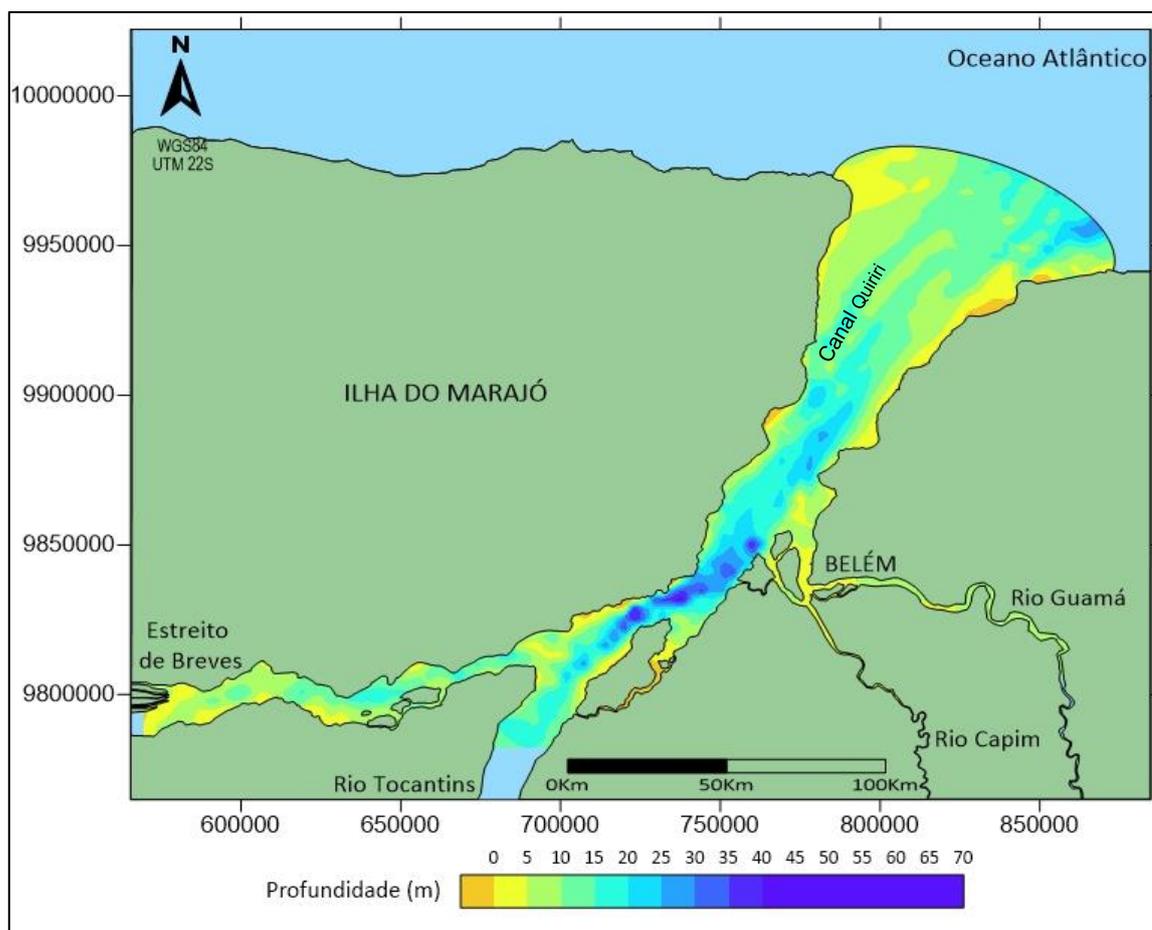
onde  $P$  é a potência,  $A$  é área transversal de fluxo interceptada pelo dispositivo (em m<sup>2</sup>),  $\rho$  é a densidade da água (1000 kg/m<sup>3</sup> para água doce e 1025 kg/m<sup>3</sup> para água salgada) e  $V$  é a velocidade da corrente (em m/s), sendo o resultado em W/m<sup>2</sup>.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 GEOMORFOLOGIA DO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ

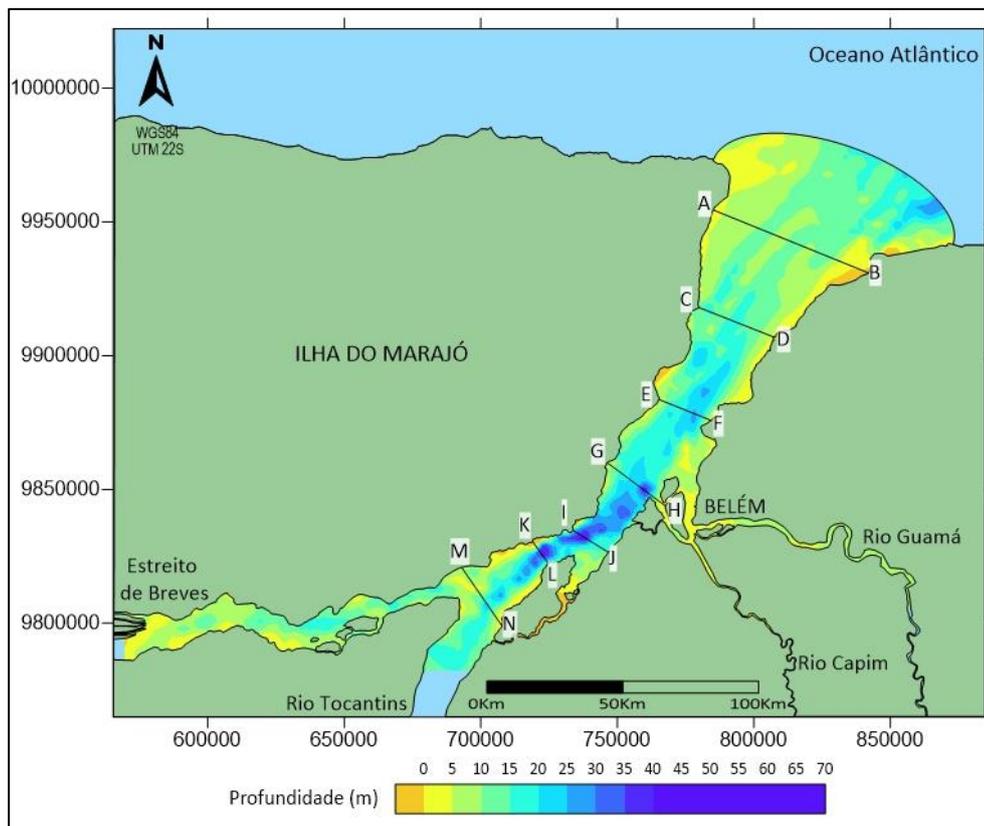
O estuário do rio Pará apresenta profundidade média de 11,507 m. Na desembocadura, a profundidade varia entre 5 a 20 m. As maiores profundidades ocorrem na região do Porto Vila do Conde, em Barcarena, variando entre 30 a 69 m (Figura 28). Essa área possui um canal de navegação denominado de "Quiriri", principal meio de acesso ao Porto de Vila do Conde, em Barcarena, que próximo à foz tem profundidade média de 12 m e atinge até 30 m na região a 65 km da foz. Sete secções transversais foram feitas ao longo do estuário e são dispostas de jusante para montante, o primeiro perfil foi gerado a norte, próximo a foz, e o sétimo perfil foi gerado no início do estuário (Figura 29). A Figura 30 mostra os perfis batimétricos gerados para a área de estudo.

Figura 28- Mapa batimétrico do Rio Pará



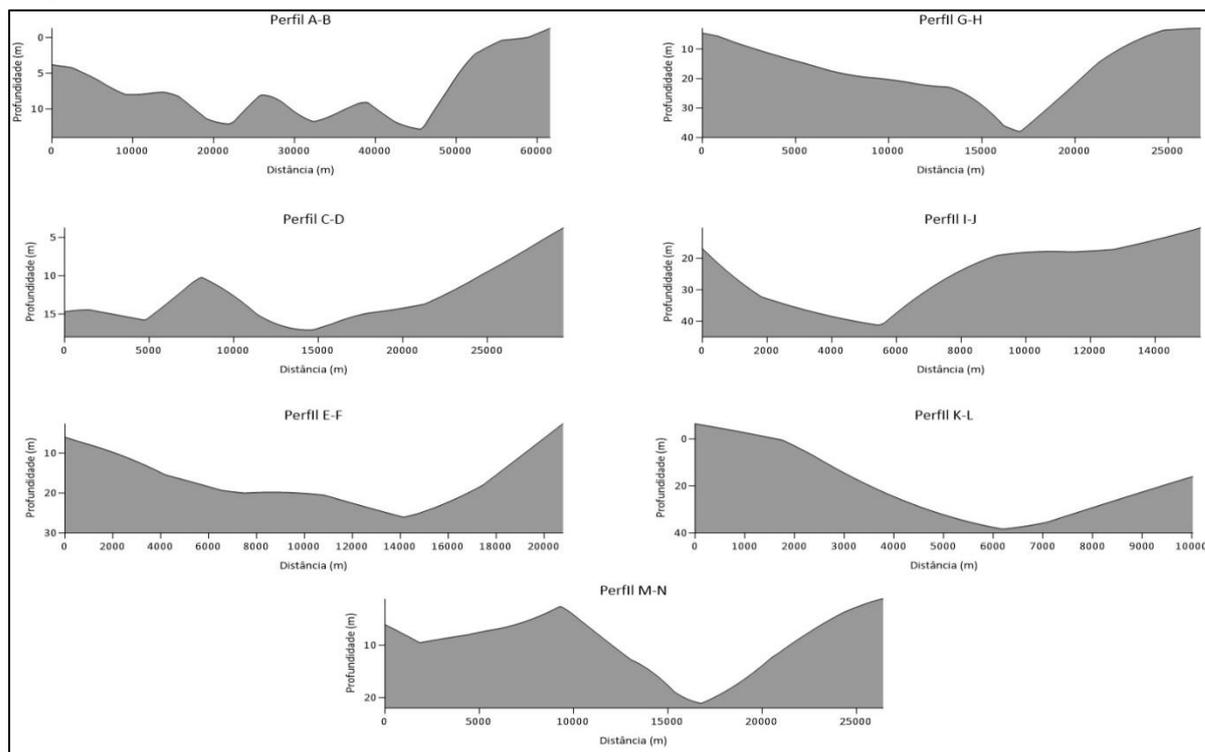
Fonte: Autora.

Figura 29. Localização das secções transversais analisadas no estuário do rio Pará.



Fonte: Autora.

Figura 30. Perfis batimétricos das secções transversais no estuário do rio Pará



Fonte: Autora.

As sete secções apresentam larguras entre 5 km e 70km.

**PERFIL A-B:** Esse perfil está localizado próximo da desembocadura do rio Pará. Esse trecho apresenta uma largura de 60 km, onde a profundidade varia entre 0 a 12,84 m.

**PERFIL C-D:** Esse trecho apresenta uma largura de 29 km com uma variável de profundidade de 3 a 17,08 m.

**PERFIL E-F:** Esse trecho apresenta uma largura de 20 km com a profundidade variando entre 2 a 25,91 m.

**PERFIL G-H:** Esse trecho apresenta uma largura de 26 km com uma variável de profundidade de 2 a 37,94 m.

**PERFIL I-J:** Esse trecho apresenta uma largura de 15 km com a maior profundidade variando entre 10 a 41,18 m.

**PERFIL K-L:** Esse trecho apresenta uma largura de 10 km com uma variável de profundidade de 0 a 38,30 m.

**PERFIL M-N:** Esse trecho apresenta uma largura de 26 km com a maior profundidade variando entre 1 a 21,09 m.

A morfologia do estuário pode favorecer a intrusão de salinidade pelos canais. Próximo à foz, a entrada da maré tende para a margem direita (PRESTES *et al.*, 2016), o canal de navegação parece favorecer esta entrada. Na margem esquerda, existe uma área rasa (menos de 8 m) próxima à Ilha do Marajó.

## 5.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Segundo Rosman (2020), o primeiro passo da calibração do modelo é checar se as escalas características dos fenômenos de interesse e as escalas de discretização do modelo são compatíveis. O segundo é verificar cuidadosamente se a geometria do domínio de interesse está adequadamente representada, especialmente ao longo dos contornos, ao longo dos nós de ilhas e de canais estreitos. O terceiro passo no processo de calibração refere-se às condições de contorno e forçantes dos modelos. O quarto passo foca nas variações dos níveis de água, ou no caso de corpos de água costeiros, níveis de maré. O quinto e último passo refere-se aos valores de velocidade das correntes. Uma vez que os quatro passos anteriores foram checados positivamente, as correções necessárias para calibrar o campo de velocidades devem ser obtidas através de ajustes no modelo hidrodinâmico.

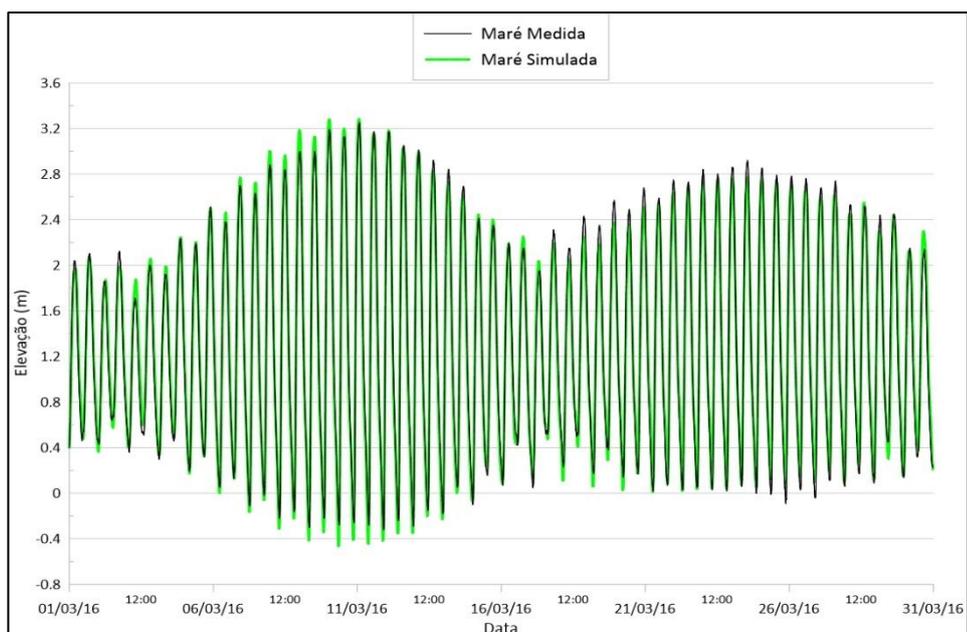
O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA® possui atributos para minimizar o processo de calibração e conseqüentemente maximizar a confiabilidade dos resultados. O SisBaHiA® necessita da batimetria do domínio modelado, assim como da rugosidade equivalente do fundo. Quando estes não são totalmente conhecidos pode estima-los utilizando para isso o bom senso.

Após obter a calibração do modelo é necessário que os parâmetros do modelo sejam validados, ou seja é preciso haver a validação do modelo. Banks et al. (2010) definem a validação do modelo computacional como o processo de provar que o modelo se comporta com precisão satisfatória, consistente com os objetivos do projeto, dentro dos limites de sua aplicabilidade. Segundo Sargent et al. (2016), o principal aspecto que afeta a estratégia de validação do modelo computacional é a possibilidade de se observar e obter as saídas do sistema real. Nesta etapa da validação, experimentos computacionais devem ser realizados para provar o modelo como um todo e não buscar erros isolados, resultando na representação da habilidade do modelo em reproduzir os fenômenos reais. Durante o processo de validação não se pode alterar os parâmetros do modelo obtidos na etapa da calibração e os resultados do modelo computacional devem ser comparados com informações de campo.

Na presente dissertação, os valores de amplitude de maré foi o parâmetro utilizado para a validação do modelo, a partir de uma comparação das séries temporais e a relação estatística dos dados de campo e dos gerados nas simulações. Os dados utilizados para calibrar o modelo constam de uma série de altura da maré no período de 01/03/2016 à 30/03/2016, obtida dos registros do marégrafo localizado no Porto de Vila do Conde.

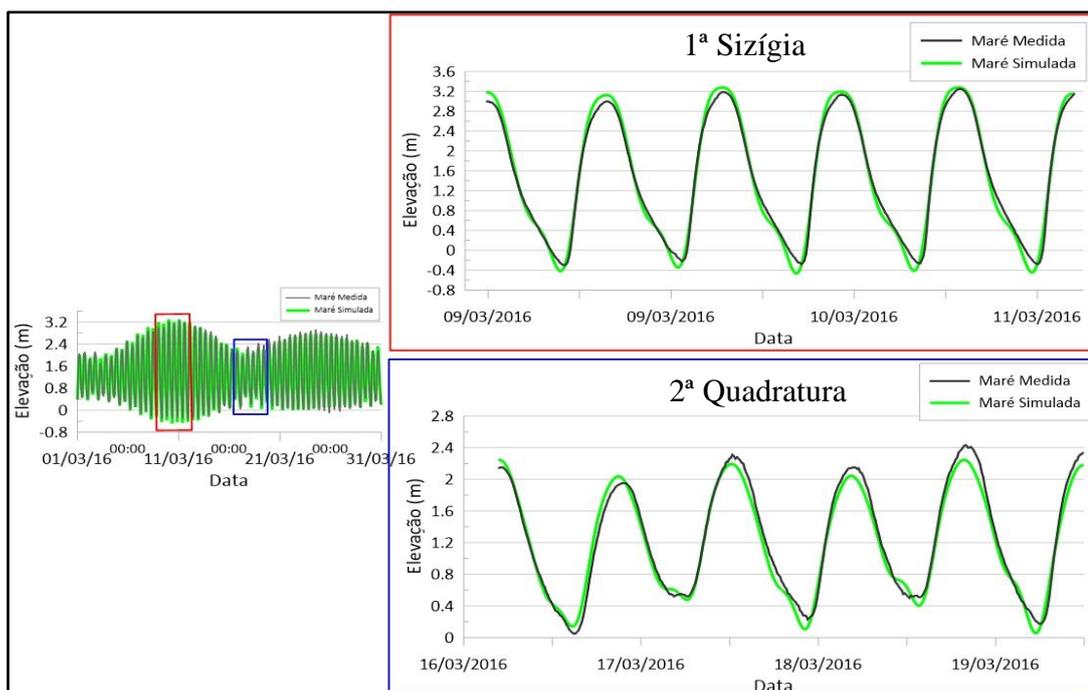
A figura 31 representa a comparação das curvas de maré medida, gerada a partir dos dados observados e de maré simulada, obtida a partir do modelo, para todo o mês de março de 2016. Em detalhe pode-se observar a comparação das marés durante a primeira maré de sizígia e a segunda maré de quadratura (Figura 32).

Figura 31. Comparação de níveis de maré medida no marégrafo e maré simulada gerada no modelo durante todo o mês de março de 2016.



Fonte: Autora.

Figura 32. Detalhe da comparação de níveis de maré medida no marégrafo e maré simulada gerada no modelo durante a primeira sizígia (retângulo vermelho) e durante a segunda maré de quadratura (retângulo azul).



Fonte: Autora.

Além da comparação entre as séries temporais, também foi feita a relação estatística entre os dados. O parâmetro considerado durante o processo de validação foi o Erro Quadrático Médio (EQM) que avalia a diferença entre o dado simulado e o dado observado. O resultado dos valores de EQM para a primeira maré de sizígia e a segunda maré de quadratura foram de 1,729% e 1,296% respectivamente (tabela 7).

Tabela 7. Dados de elevação da maré (máximo, mínimo e média), para a 1ª Maré de Sizígia e a 2ª Maré de Quadratura, e o erro quadrático médio (EQM) entre os dados medidos e modelados.

	<b>Dados</b>	<b>Elev. Máxima</b>	<b>Elev. Mínima</b>	<b>Elev. Média</b>	<b>EQM (%)</b>
1ª Sizígia	Real	3,24	-0,2	1,47	1,729%
	Modelados	3,28	-0,47	1,47	
2ª Quadratura	Real	2,43	0,05	1,24	1.296%
	Modelados	2,25	0,17	1,2	

Fonte: Autora

### 5.3 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS

O tempo que é utilizado no modelo hidrodinâmico do SisBaHiA® é dado em segundos. Para a simulação do estuário do Rio Pará 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 0s, e o tempo final foi de 2592000s. O passo de tempo utilizado foi de 100s (Tabela 8).

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

	Parâmetros	Simulações Mensais
Simulação	Instante inicial(s)	0
	Instante final(s)	2592000
	Passo de tempo(s)	100
Intervalo de tempo dos resultados	Espacial (s)	900
	Temporal (s)	900
Condições iniciais	Elevação(m)	2,1328

Fonte: Autora

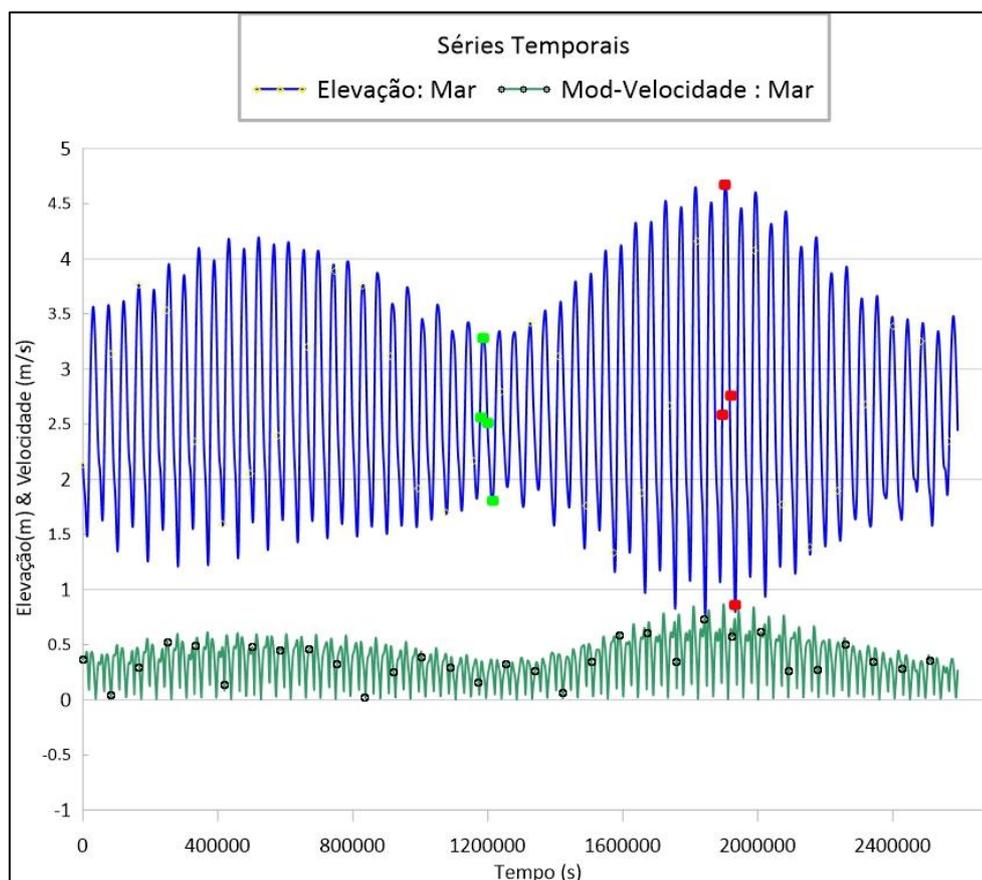
A determinação dos padrões das correntes de maré foi feita através dos resultados fornecidos pelo modelo 2DH, por meio de campos de vetores representativos da velocidade resultantes das seguintes componentes: x e y, integradas na coluna d'água. Assim, avaliando a velocidade média, a direção e intensidade das correntes de maré no interior do estuário.

No modelo hidrodinâmico do SisBaHiA é preciso fornecer, no instante inicial de simulação ( $t_0$ ), os valores da elevação da superfície livre ' $\zeta$ ' e as componentes da velocidade 2DH, U e V, em todos os nós do domínio. Se não houver nenhum resultado prévio adequado para ser usado como condição inicial, então uma condição chamada 'partida a frio' deverá ser utilizada. Para se obter uma condição de 'partida a frio' que satisfaça às equações governantes as velocidades 2DH (U e V) devem ser iguais a zero e o valor de amplitude deve ser o fornecido pelo próprio SisBAHIA na curva das constantes harmônicas. Ao utilizar a condição de 'partida a frio' deve-se evitar diferenças significativas entre os valores de condição inicial e os valores de condição de contorno no primeiro passo de tempo. Após o aquecimento pode-se obter

valores de condições iniciais de velocidades 2DH (ROSMAN,2020). Para esse trabalho o modelo foi aquecido para um período de 86400 s (24h).

As simulações tiveram como objetivo observar o comportamento hidrodinâmico durante as marés de sizígia e de quadratura (meia maré enchente, meia maré vazante, estufa de preamar e estufa de baixamar). A série temporal foi iniciada no dia 01 de janeiro de 2019 e o programa rodou por 30 dias. A partir da observação de elevação, é possível fazer o estudo nas diferentes marés do mês supracitado no nó 38 (mar). A confiabilidade também é o parâmetro do rio, uma vez que a elevação máxima observada foi de 4.68 m enquanto que, a mínima foi de 0,76 m (Figura 33), tais valores estão dentro de parâmetros razoáveis. Essas amplitudes caracterizam esta região como de macromaré de acordo com a classificação de Davies (1964), sendo semidiurna com duas preamares e duas baixa-mares por dia. Ressaltando-se que foi considerada apenas a maré astronômica, ou seja, dados que podem ser previstos com certeza. Não foi considerada a influência da maré meteorológica no nível do mar.

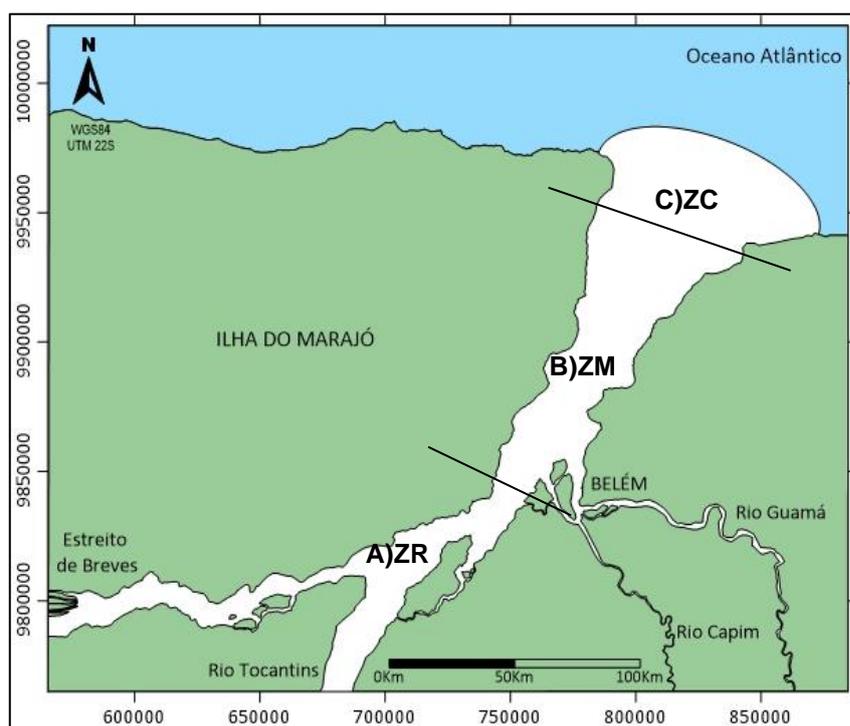
Figura 33. Gráfico da curva de elevação da maré e do módulo de velocidade gerado pelo SISBAHIA para o período de 30 dias, iniciando no dia 01 de janeiro de 2019. Os quadrados verdes representam os instantes de maré de quadratura (meia maré vazante, estufa baixamar, meia maré enchente e estufa preamar).e os quadrados vermelhos representam os instantes de maré de sizígia (meia maré vazante, estufa baixamar, meia maré enchente e estufa preamar).



Fonte: Autora.

Com o intuito de reproduzir uma análise mais detalhada do estuário do rio Pará, foi feita uma divisão do mesmo em três setores de acordo com classificação de Kjerfve (1987): A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira apresentados na Figura 34.

Figura 34. Divisão do estuário do rio Pará, de acordo com classificação de Kjerfve (1987): A) Zona de Maré do Rio (ZR), B) Zona de Mistura (ZM), C) Zona Costeira (ZC).



Fonte: Autora.

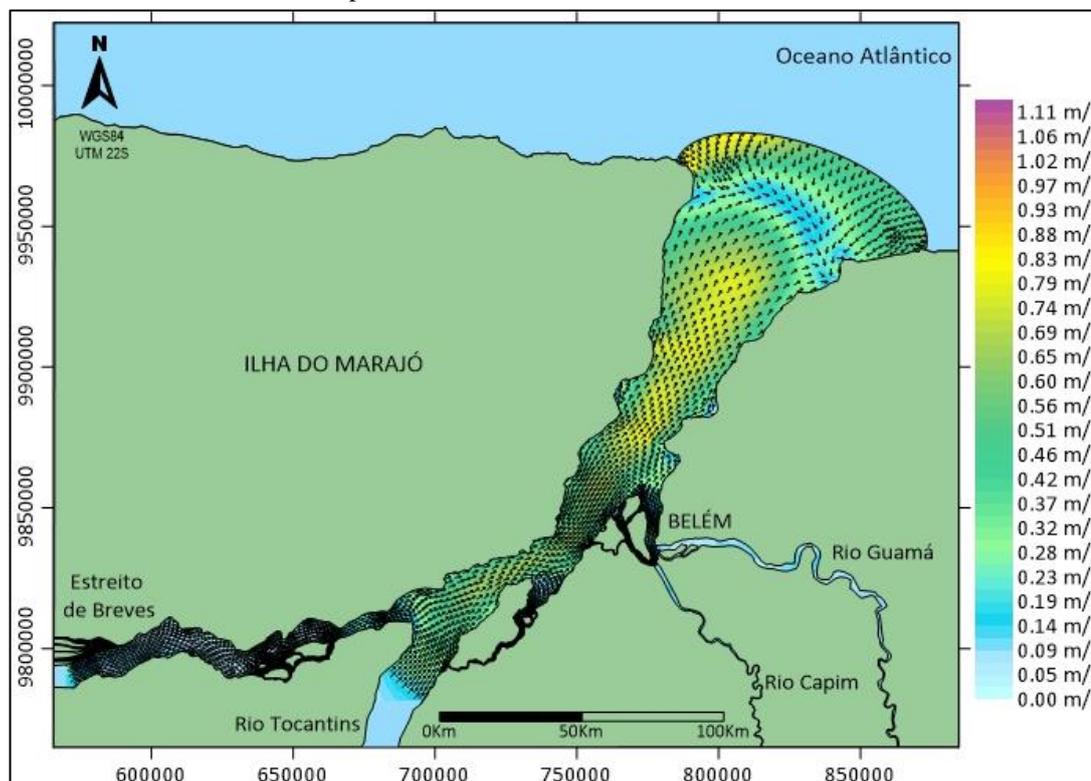
### 5.3.1 Maré de Sizígia

#### 5.3.1.1 Cenário 1 (Meia Maré Enchente)

Esta simulação hidrodinâmica é indicada pelo primeiro quadrado vermelho (Figura 33), e ocorre no instante 1894500 s durante a maré de sizígia em uma meia maré enchente. As velocidades representadas na área de estudo foram geradas pelo modulo das velocidades em U e V, onde as velocidades variam de 0,00 m/s a 0,86 m/s. O comportamento das correntes e das velocidades na meia maré enchente é apresentado na Figura 35.

Na zona de maré do rio as velocidades oscilam entre 0,00 m/s e 0,69 m/s. De maneira geral essa área é dominada por velocidades de 0,37 m/s e 0,69m/s, e as menores velocidades ocorrem na margem direita (Figura 36A). Na zona de mistura as velocidades variam entre 0,00 m/s e 0,78 m/s, sendo dominado por altas velocidades (Figura 36B). Na zona costeira as velocidades oscilam entre 0,00 m/s e 0,86 m/s é possível observar uma região nula onde as marés convergem, isso ocorre devido ao início da inversão das correntes em relação ao resto do estuário, indicando a influência da maré enchente com a entrada da água do oceano para o estuário do rio Pará.

Figura 35. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 1 referente a meia maré enchente durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

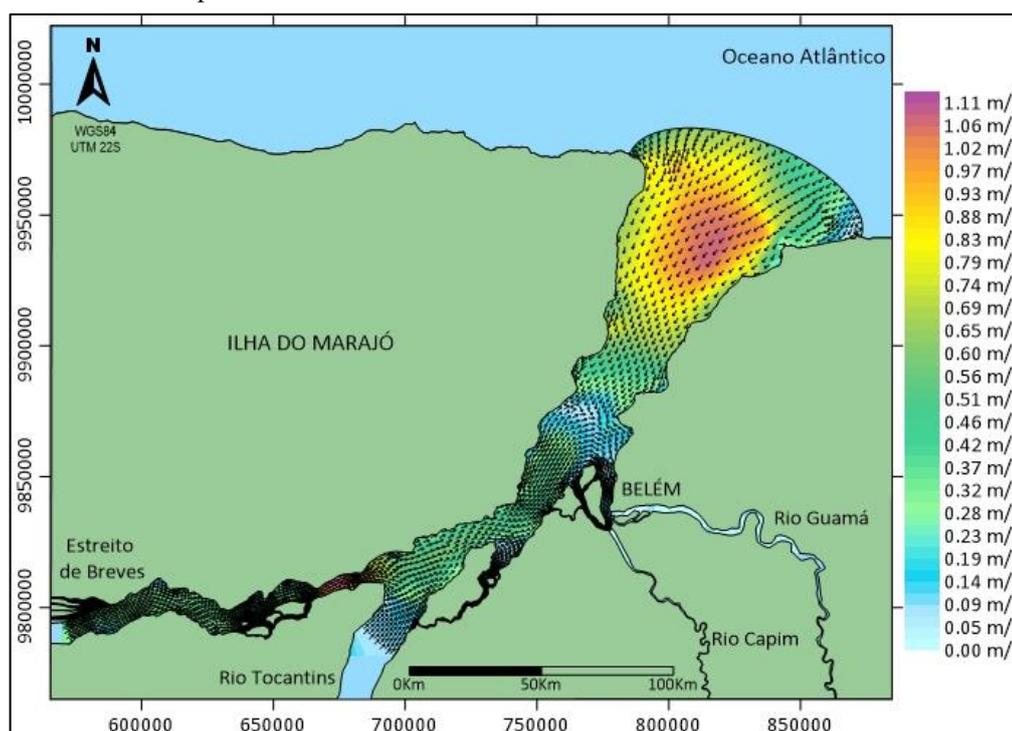


na estufa de preamar é apresentado na Figura 37.

Na zona de maré do rio as velocidades diminuem entre 0,28 m/s e 0,65 m/s e sua distribuição é mais uniforme (Figura 38A), o que indica que ocorre um menor fluxo de contribuição do rio Tocantins. As maiores velocidades para essa simulação na ZR chegam a 1,11 m/s, e elas ocorrem próximo do início do estuário e podem estar relacionadas a influência da maré enchente entrando no estuário do rio Amazonas e que por consequência passa pelo estreito de breves até chegar no rio Pará. Além disso, essas maiores velocidades ocorrem em uma área de afunilamento do rio o que explica essa ocorrência em uma área mais restrita.

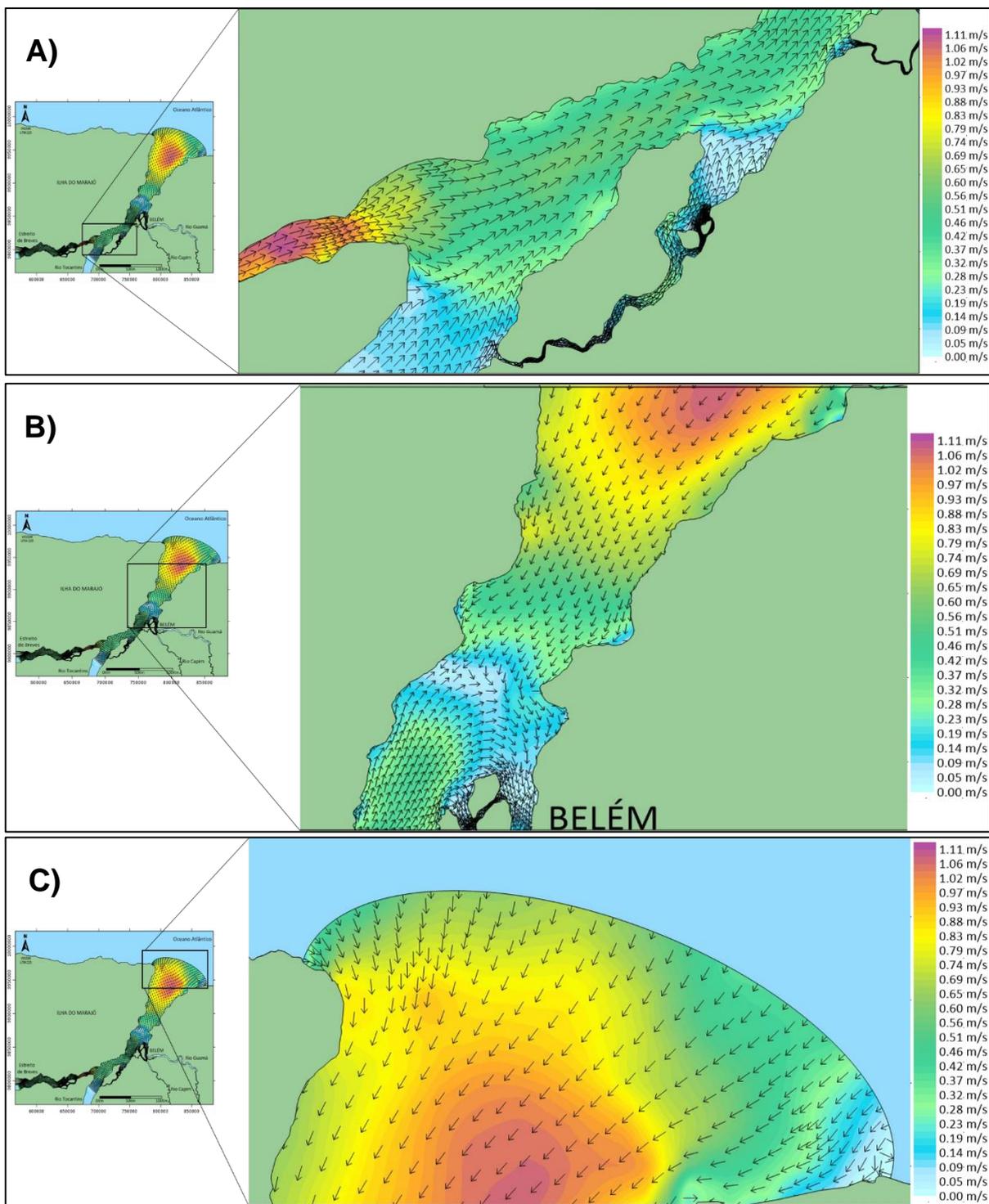
Na zona de mistura, os principais rios contributários do estuário passam a tem uma menor influência e com isso é possível observar uma área com velocidades nulas e com as direções de correntes indo para sentidos iguais. Nessa simulação, a ZM mostra que grande parte do estuário já apresenta um comportamento de maré enchente, demonstrado pelo sentido das correntes, porém devido ao tamanho do estuário, a influência dessa maré demora um pouco mais para mudar as correntes em toda sua extensão. As velocidades na ZM apresentam valores próximos de 0,37 m/s na parte sul e vão aumentando até 1,06 m/s ao norte (Figura 38B). Na zona costeira, as velocidades chegam a 1,06 m/s com predominância na parte interna, variando para 0,39-0,69 m/s na foz e diminuindo para 0,05 m/s na margem direta da foz (Figura 38C).

Figura 37. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 2, referente ao estufa de preamar durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

Figura 38. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades no estófo da preamar durante a maré de sizígia: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira.



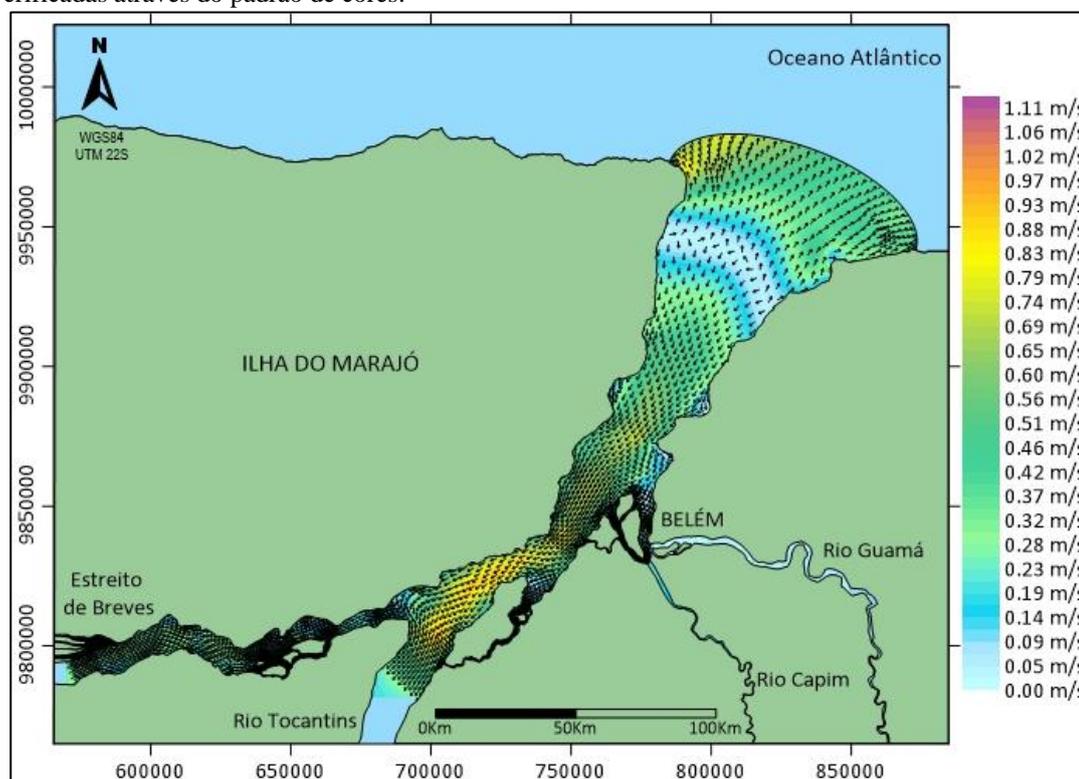
Fonte: Autora.

### 5.3.1.3 Cenário 3 (Meia Maré Vazante)

Essa simulação ocorre na meia maré vazante durante uma maré de sizígia e está representada pelo terceiro quadrado vermelho (Figura 33) no instante 1916100 s. Os valores de velocidade, em sua maioria, estão no intervalo entre 0 m/s e 0,93 m/s, o comportamento das correntes e das velocidades, na estufa de preamar é apresentado na Figura 39.

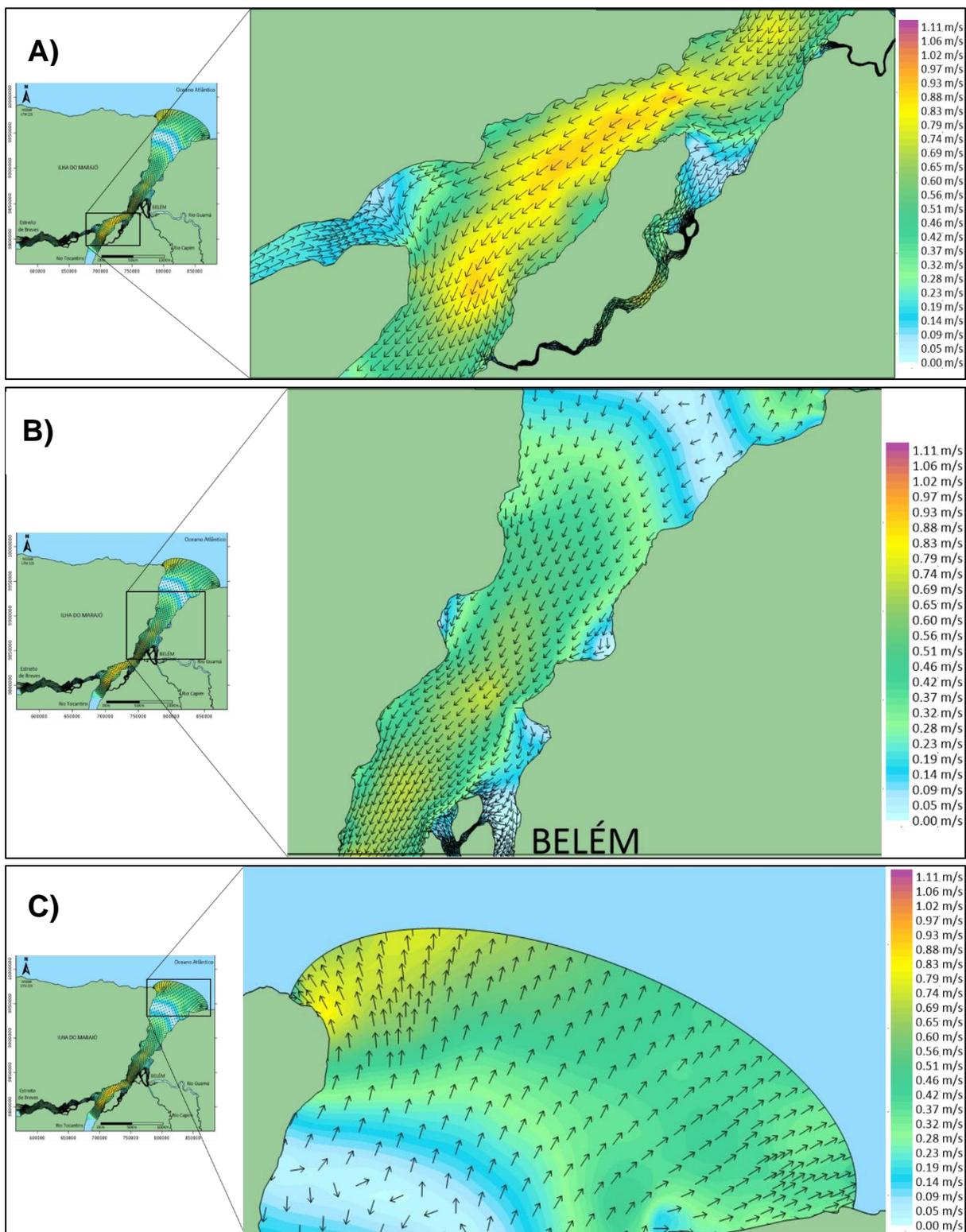
Na zona de maré do rio as velocidades oscilam entre 0,00 m/s e 0,93 m/s. As correntes ainda seguem o sentido da estufa da preamar, o que pode ser explicado pelo fato de que a influência da maré vazante nessa região ainda não é predominante (Figura 41A). Na zona de mistura é possível observar uma área com velocidades nulas e com as direções de correntes em sentidos opostos, o que indica que a influência da maré enchente acabou e está sendo substituída pela influência da maré vazante nesta área. Ao sul da ZM, as velocidades variam entre 0,28 m/s e 0,69 m/s dentro do canal de maré, e ao norte chegam a 0,39 m/s (Figura 41B). Na zona costeira as correntes já demonstram total predominância da maré vazante entrando no estuário do rio Pará, as velocidades oscilam entre 0,00 m/s e 0,83 m/s (Figura 41C).

Figura 39. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 3, referente a meia maré vazante durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

Figura 40. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na meia maré vazante durante a maré de sizígia: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira.



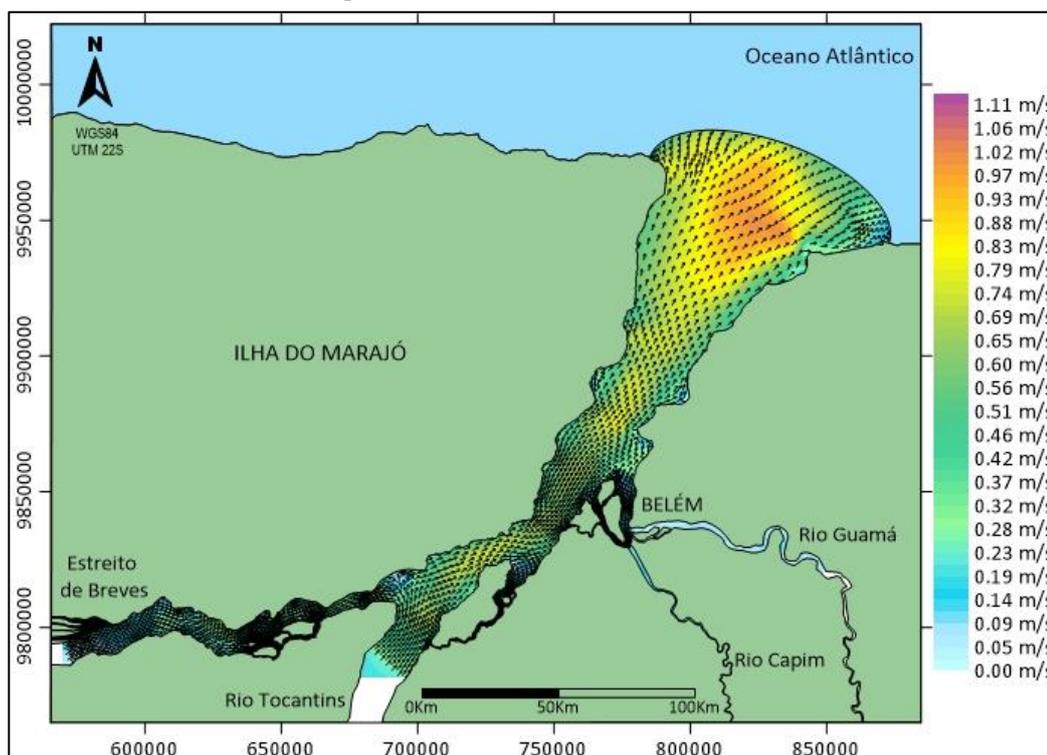
Fonte: Autora.

#### 5.3.1.4 Cenário 4 (Estofa de baixamar)

A simulação 4 ocorre na estofa de baixa mar na maré de sizígia sendo representado pelo quarto quadrado vermelho (Figura 33), no instante 1933200 s. Os valores de velocidade, estão no intervalo entre 0 m/s e 1,00 m/s, e o comportamento das correntes e das velocidades na estofa de preamar é apresentado na Figura 41.

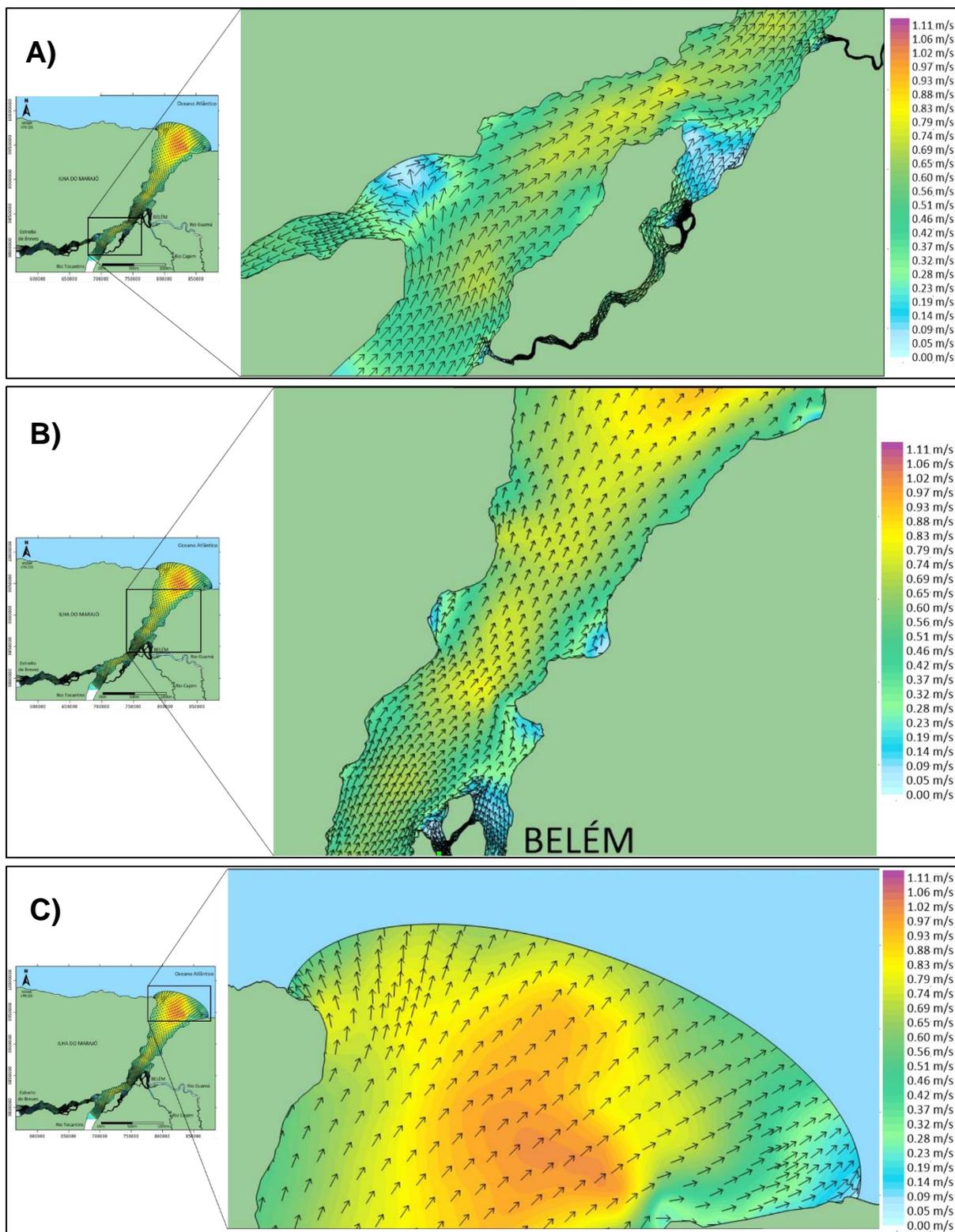
Nesta simulação, todo o corpo d'água apresenta o comportamento de vazante, indicado pelo sentido das correntes. Na zona de maré do rio a velocidade chega a 0,74 m/s e já é possível a influência fluvial dos contribuintes do estuário (Figura 42A). Na zona de mistura a velocidade atinge 0,88 m/s (Figura 42B). Na zona costeira observam-se as maiores velocidades chegando a 1,00 m/s (Figura 42C).

Figura 41. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 4, referente ao estofa de baixamar durante a maré de sizígia. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

Figura 42. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na estufa de baixamar durante a maré de sizígia A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira.



Fonte: Autora.

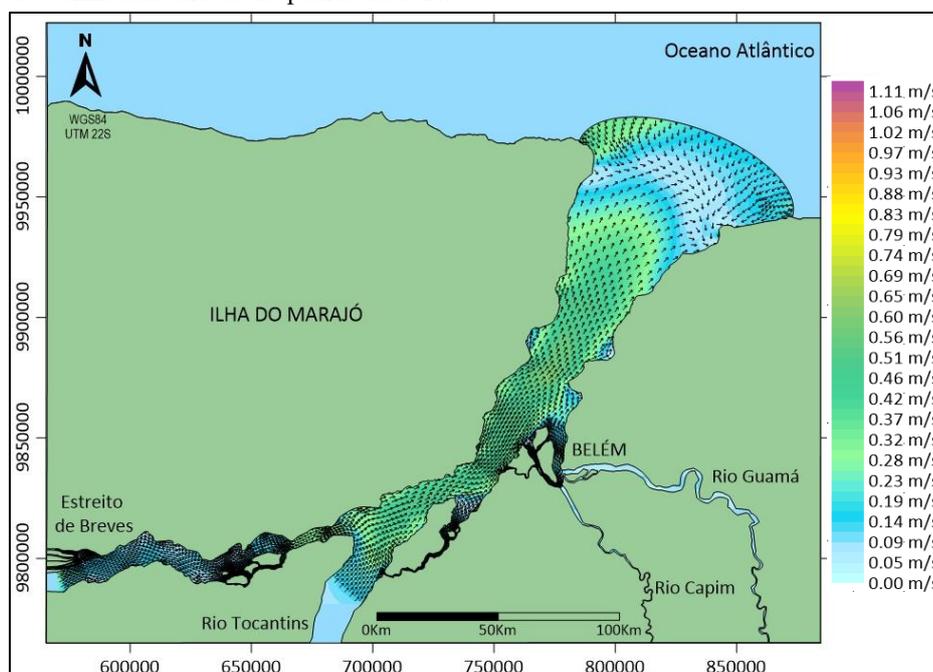
### 5.3.2 Maré de quadratura

#### 5.3.2.1 Cenário 5 (Meia Maré Enchente)

Esta simulação hidrodinâmica é indicada pelo primeiro quadrado verde (Figura 33), ocorre no instante 1176300s durante a maré de quadratura em uma meia maré enchente. As velocidades representadas na área de estudo foram geradas pelo modulo das velocidades em U e V, onde as velocidades dentro do estuário variam de 0,00 m/s a 0,58 m/s. O comportamento das correntes e das velocidades na meia maré enchente é apresentado na Figura 43.

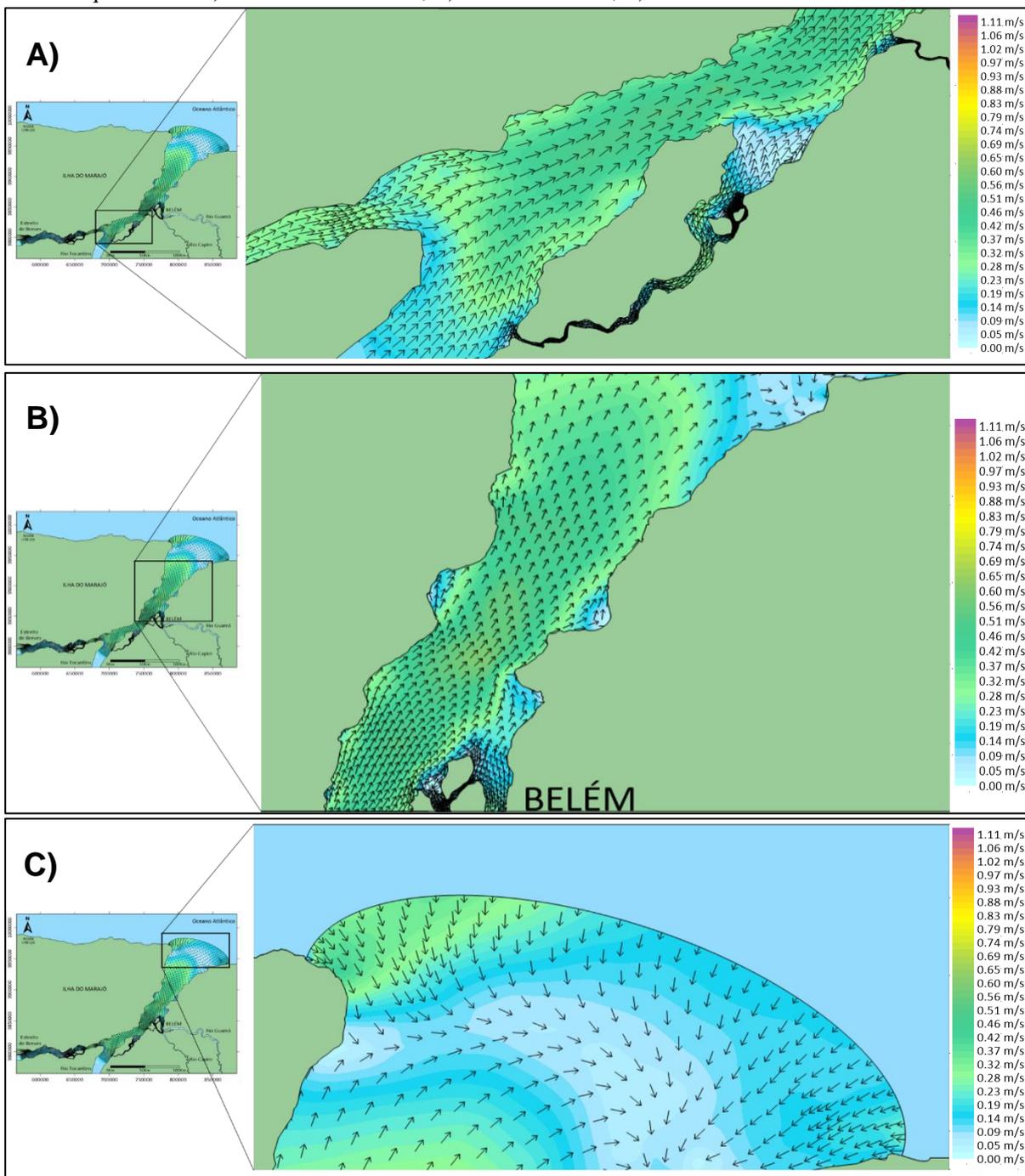
Na zona de maré do rio as velocidades oscilam entre 0,00 m/s e 0,52 m/s (Figura 44A). A zona de mistura, apresenta os maiores valores de velocidades variando entre 0,00 m/s e 0,57 m/s (Figura 44B). Na zona costeira ocorrem os menores valores de velocidades, que oscilam entre 0,00 m/s e 0,44m/s. No meio desta área observa-se velocidades próximo a zero, com o encontro de correntes em sentidos opostos, indicando o início da predominância da enchente a foz do estuário, que pode reforçado com o aumento da velocidade das correntes vindo de fora do estuário (Figura 44C).

Figura 43. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 5 referente a meia maré enchente durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

Figura 44. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na meia maré enchente durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira.



Fonte: Autora.

### 5.3.2.2 Cenário 6 (Estofa de preamar)

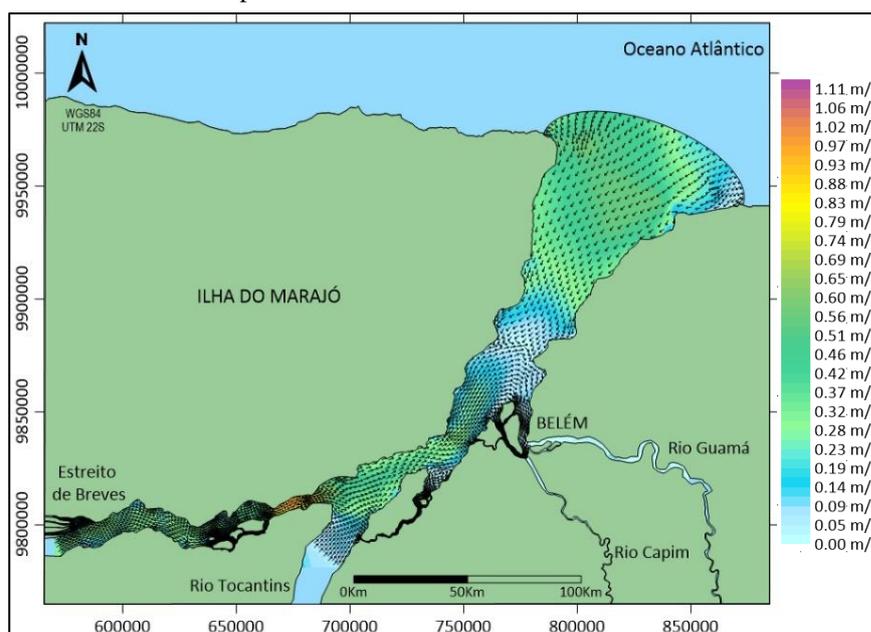
A simulação ocorre numa maré de quadratura, durante o estofa de preamar, representada pelo segundo quadrado verde (Figura 33), no instante 1184400 s. Os valores de velocidade, em sua maioria, estão no intervalo entre 0 m/s e 0.95 m/s, sendo que esse valor máximo ocorre a

partir da descarga do rio Pará no estuário e o comportamento das correntes e das velocidades na estufa de preamar é apresentado na Figura 45.

Na zona de maré do rio as velocidades diminuem entre 0 m/s e 0.41 m/s e sua distribuição é mais uniforme (Figura 46A). As maiores velocidades para essa simulação na ZR chegam a 0,95 m/s, e elas ocorrem próximo do início do estuário podendo estar relacionadas a influência da maré enchente entrando no estuário do rio Amazonas que passam pelo estreito de breves até chegar no rio Pará, além disso, essa é uma área de afunilamento do rio.

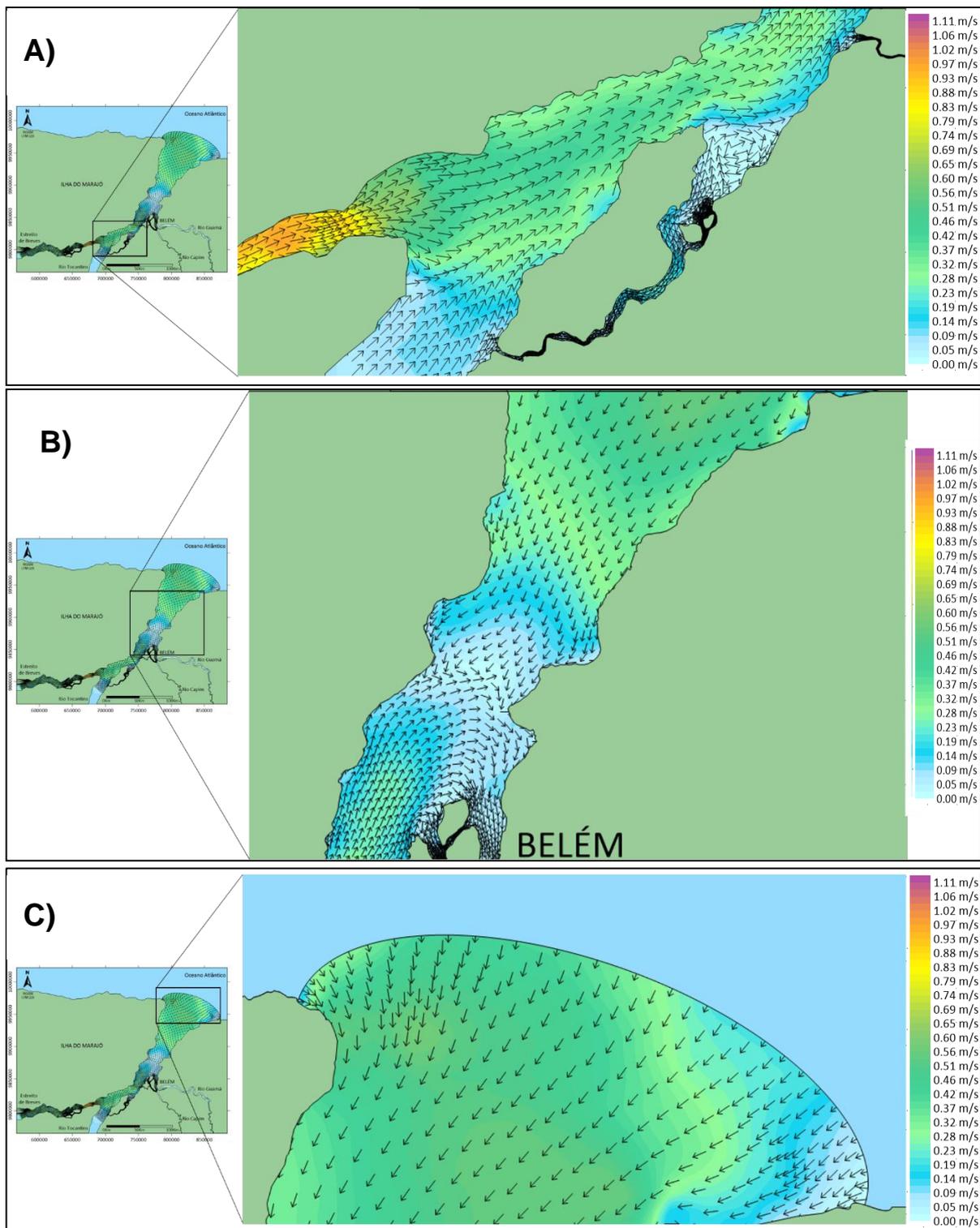
Na zona de mistura, devido a uma menor influência dos rios contribuintes e o domínio da maré enchente no estuário, é possível observar uma área com velocidades nulas e com as direções de correntes indo para sentidos iguais. Nessa simulação, a ZM mostra que grande parte do estuário já apresenta um comportamento de maré enchente, demonstrado pelo sentido das correntes, porém devido ao tamanho do estuário, a influência dessa maré demora um pouco mais para mudar as correntes em toda sua extensão. As velocidades na ZM chegam a 0.44 m/s ao norte, e a 0,22 m/s ao sul (Figura 46B). Na zona costeira, as velocidades chegam a 0,55 m/s e ao norte na margem direita ocorre velocidades nulas (Figura 46C), isso é devido ao fato de que a estufa da preamar é o máximo da enchente, com isso, ocorre um momento de estagnação para dar início a transição da enchente para vazante.

Figura 45. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 6 referente ao estofo de preamar durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

Figura 46. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades no estófo de preamar durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira.



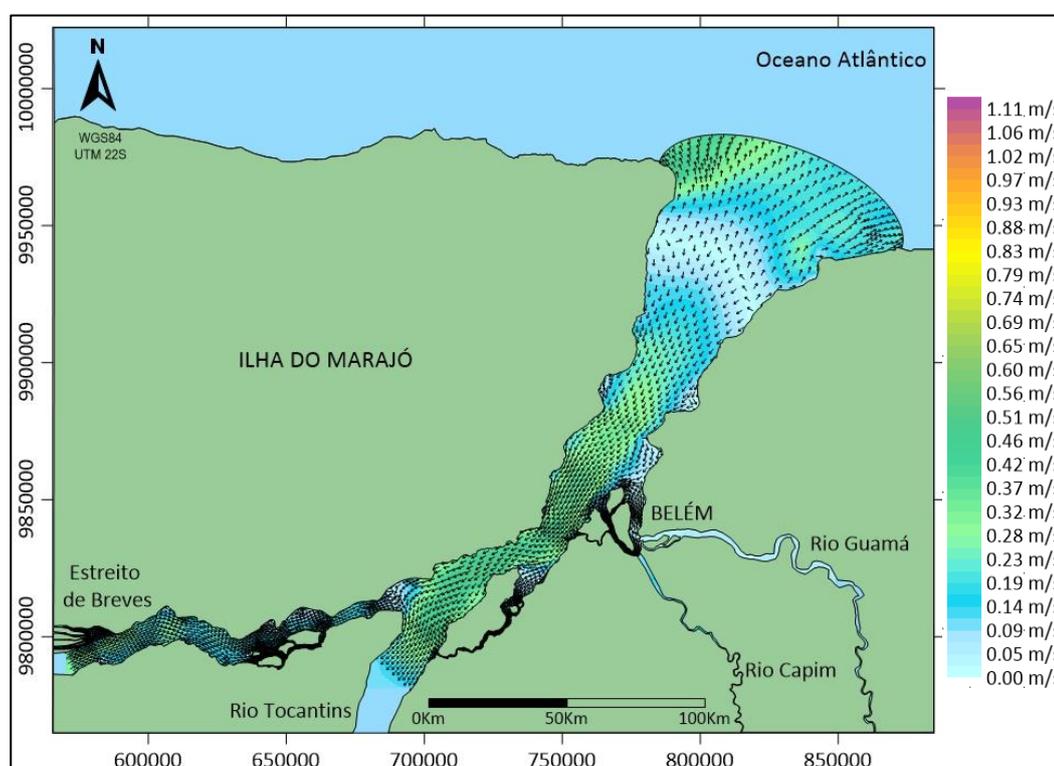
Fonte: Autora.

### 5.3.2.3 Cenário 7 (Meia Maré Vazante)

Essa simulação ocorre na meia maré vazante durante uma maré de quadratura e está representada pelo terceiro quadrado verde (Figura 33) no instante 1198800 s. Os valores de velocidade, em sua maioria, estão no intervalo entre 0 m/s e 0,55 m/s, e o comportamento das correntes e das velocidades na estofa de preamar é apresentado na Figura 47.

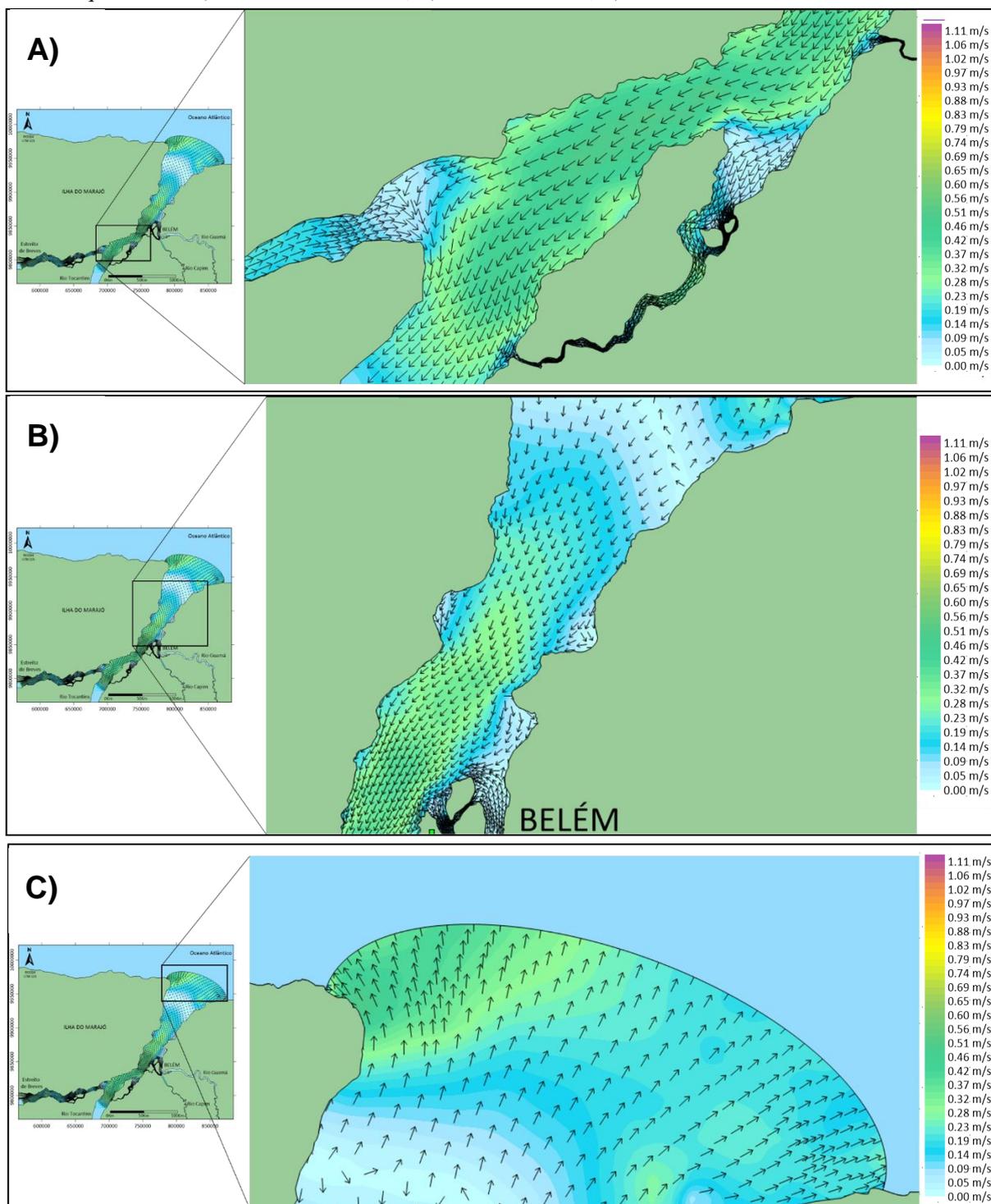
Na zona de maré do rio as velocidades oscilam entre 0,00 m/s e 0,55 m/s. As correntes ainda seguem os sentidos da estofa da preamar, o que pode ser explicado pelo fato de que a influência da maré vazante nessa região ainda não é predominante (Figura 48A). Ao sul da zona de mistura, as velocidades variam entre 0,00 m/s e 0,47 m/s, ao norte as velocidades vão diminuindo chegando próximo a zero (Figura 48B). Na zona costeira as velocidades dominantes são próximas de zero, porém ao norte na margem esquerda as velocidades chegam a 0,51 m/s com as correntes com sentido para fora do estuário indicando o início da vazante (Figura 48C).

Figura 47. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 7 referente a meia maré vazante durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

Figura 48. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades na meia maré vazante durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira.



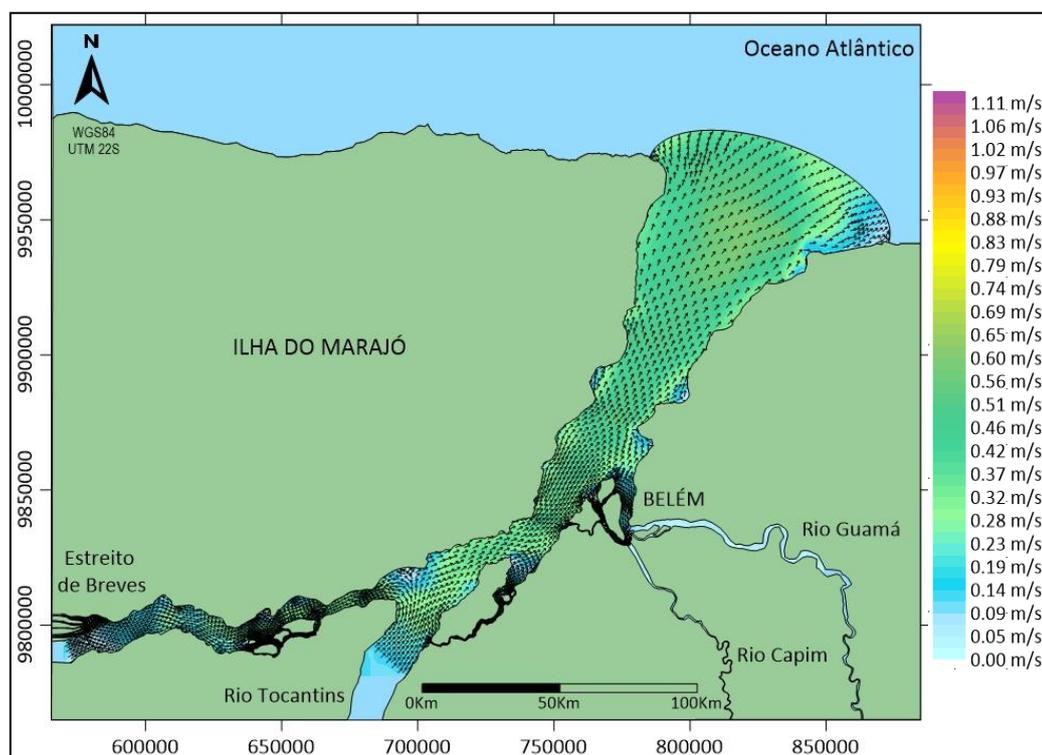
Fonte: Autora.

#### 5.3.2.4 Cenário 8 (Estofa de baixamar)

A simulação 4 ocorre na estofa de baixa mar na maré de quadratura sendo representado pelo quarto quadrado verde (Figura 33), no instante 1212300 s. Os valores de velocidade estão no intervalo entre 0 m/s e 0,60 m/s, e o comportamento das correntes e das velocidades na estofa de preamar em todo o estuário reflete o evento de vazante e é apresentado na Figura 49.

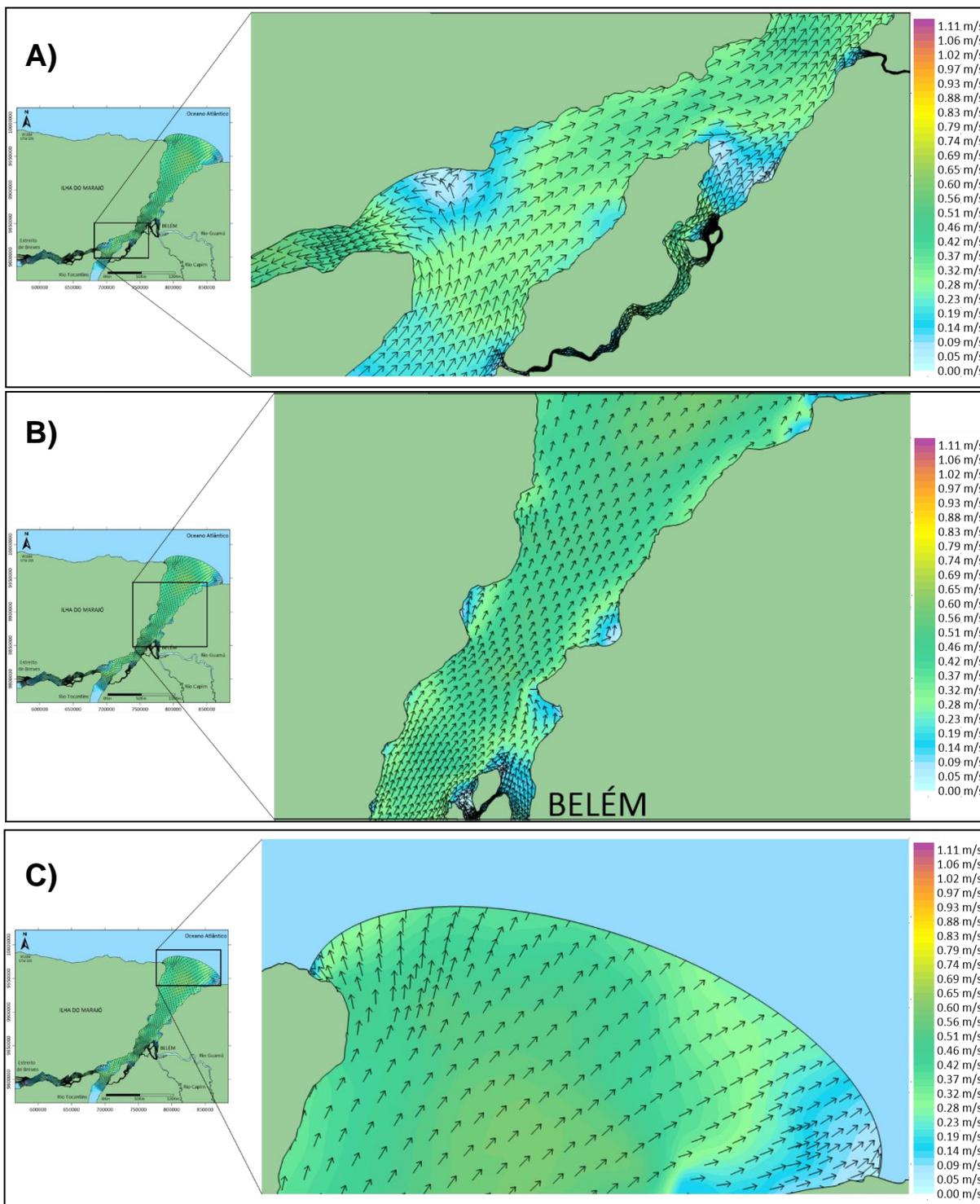
Na zona de maré do rio a velocidade chega a 0,42 m/s e já é possível o observar as correntes no sentido da vazante e com influência fluvial (Figura 50A). Na zona de mistura a velocidade atinge 0,52 m/s (Figura 50B). Na zona costeira observa-se a velocidade máxima de 0,60 m/s (Figura 50C).

Figura 49. Padrão das correntes e suas velocidades no estuário do rio Pará gerado na simulação do cenário 8 referente ao estofa de baixamar durante a maré de quadratura. Os vetores correspondem às correntes e suas magnitudes são verificadas através do padrão de cores.



Fonte: Autora.

Figura 50. Detalhamento do comportamento das correntes e das velocidades no estófo de baixamar durante a maré de quadratura: A) Zona de Maré do Rio, B) Zona de Mistura, C) Zona Costeira.

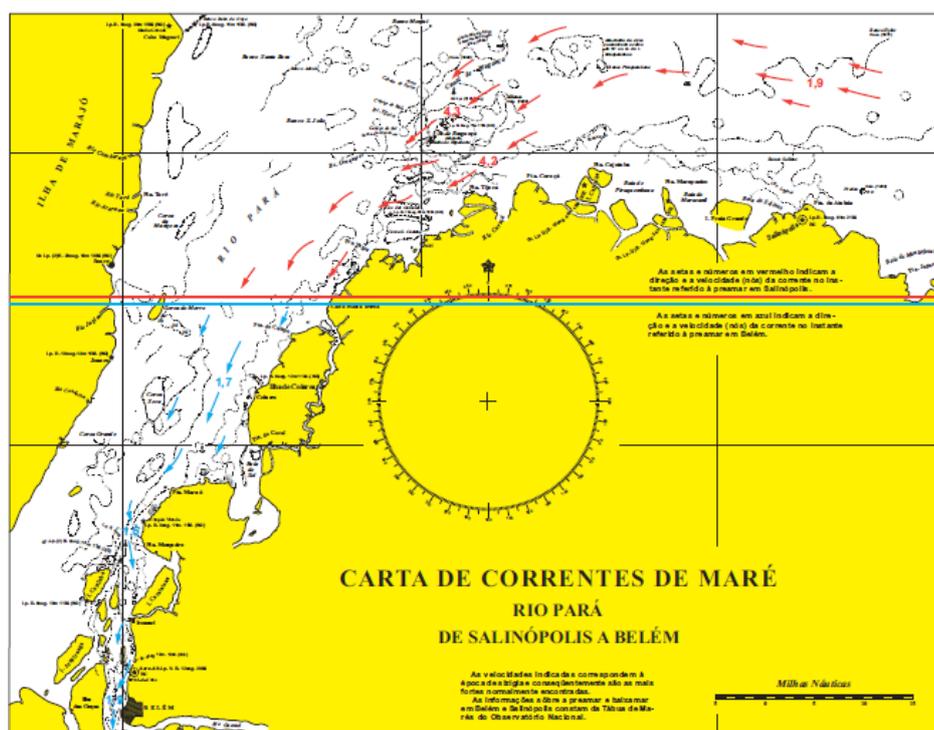


Fonte: Autora.

A Carta de Correntes de Maré referente ao Rio Pará, publicada pela DHN em 1962 foi utilizada para comparar os dados gráficos mostrados na carta e os obtidos pelo modelo. As correntes de maré são apresentadas em relação às cidades de Belém e de Salinópolis, com dados gráficos de intensidade e direção, a intervalos regulares antes e depois da preamar em cada cidade.

Na figura 51 é apresentada a digitalização da carta de correntes, no caso o estofa de preamar. As setas indicam as direções e os números, os valores das velocidades das correntes, expressos em nós e décimos de nós, e referem-se à situação de sizígia média. Em Belém a amplitude da sizígia média é de 3,08 m e a máxima é de 3,78 m. A corrente representada exprime a média em uma camada de aproximadamente 5 m de espessura a partir da superfície, não considerando marés, fluxo do rio e ventos extremos. O estudo da maré e das correntes mostra que os meses de março e abril ocorrem as maiores correntes de vazante e as menores valores de correntes de enchente e os meses de junho e julho apresentam os maiores valores de correntes de enchente e os menores valores decorrentes de vazante. Todo o restante do ano a situação se apresenta praticamente a mesma. Uma vez que a área do modelo não contempla a área do município de Salinópolis, a análise restringiu-se aos dados de Belém.

Figura 51. Carta de Correntes de Maré referente ao Rio Pará, de Salinópolis a Belém durante o estofa de preamar.



Fonte: DHN, 1962.

Os resultados obtidos foram comparados com dados de correntes de maré da DHN (1962) e do trabalho de Souza (2006), que utilizou o modelo computacional MIKE 21 (DHI), para gerar um modelo hidrodinâmico para o estuário do Rio Pará. A tabela 9 apresenta essas comparações.

Tabela 9. Dados das velocidades de correntes da carta da DHN (1992), Souza (2006) e os dados gerados pelo Sisbahia na meia maré enchente, estofa de preamar, meia maré vazante e estofa da baixar durante a maré de sizígia.

HORÁRIO	Cartas de Corrente (DHM, 1962)	Dados Modelados de Souza, (2006)	Dados Modelados no Sisbahia
	Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)
Meia Maré Enchente	1,59	1,40	0,87
Preamar	0,87	0,99	1,06
Meia Maré Vazante	1,39	1,13	0,95
Baixamar	1,34	1,32	1,00

Fonte: Autora.

As velocidades extraídas no modelo não apresentaram tão boa similaridade com as observadas na Carta de Correntes de Maré e com isso vale ressaltar que as medições de velocidade das correntes apresentadas na Carta são correspondentes ao ano de 1962 e os dados apresentados são uma média anual, não tendo uma atualização mais recente. O trabalho de Souza (2006) gerou uma simulação para o ano de 1991. Sendo assim esses dados de comparação, mesmo sendo os únicos disponíveis, podem não corresponder com a hidrodinâmica atual.

#### 5.4 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 determinadas regiões onde ocorre a diminuição da seção por onde o fluxo passa, como a diminuição da largura de um determinado canal. Em regiões de grandes variações na 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.

Por se tratar de corrente 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 (estofa da maré vazante) até um máximo e depois começa a desacelerar até voltar a zero (na estofa de preamar). Durante a vazante, o sentido das correntes muda para o oceano e começa a acelerar novamente, seguindo o mesmo padrão de variação de velocidade da enchente, já que as marés são cíclicas.

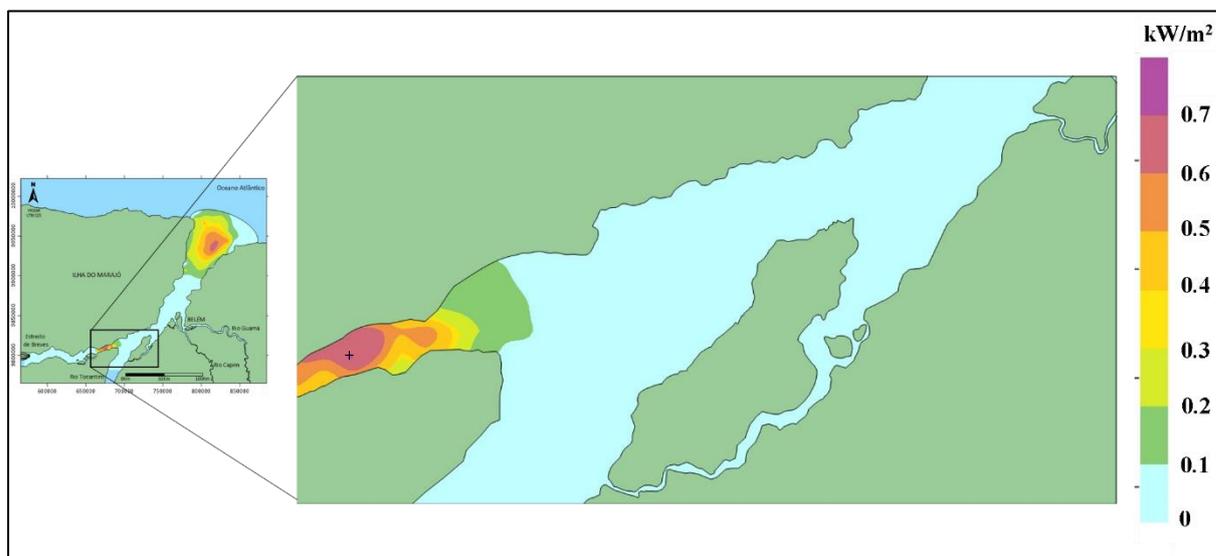
Analisando as simulações foram selecionados 6 locais que apresentaram as maiores velocidades na área de estudo, sendo 5 durante a maré de sizígia e 1 na maré de quadratura.

A densidade energética é calculada a partir da equação 4, e a tabela 10 e 11 mostram a densidade em cada uma das áreas detectadas abaixo, considerando a densidade da água ( $\rho$ ) igual a  $1025 \text{ kg/m}^3$  (água salgada):

- Maré de Sizígia
  - a) Estofa de preamar- zona de maré do rio (Figura 52)
  - b) Estofa de preamar - zona de mistura (Figura 53)
  - c) Estofa de preamar- zona costeira (Figura 54)
  - d) Meia maré vazante- zona maré do rio (Figura 55)
  - e) Estofa de baixamar- zona costeira (Figura 56)
- Maré de quadratura
  - f) Estofa de preamar- zona de maré do rio (Figura 57)

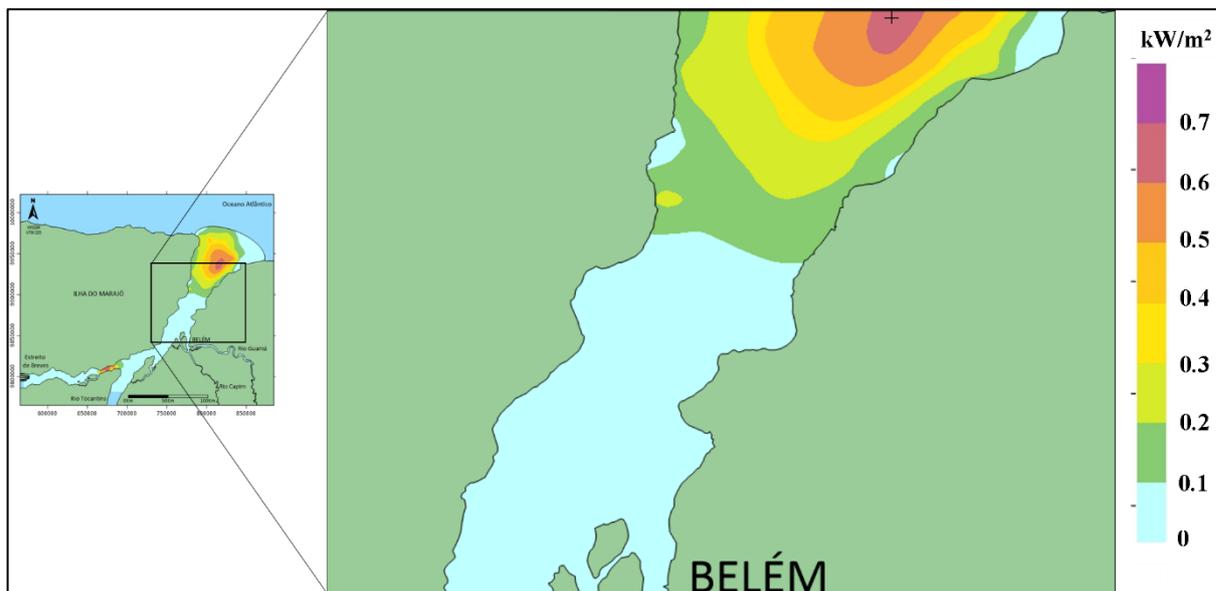
As figuras abaixo mostram com detalhes os locais com maiores velocidades durante a maré de sizígia.

Figura 52. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estofa de preamar na zona maré do rio com as maiores velocidades chegando a  $1,11 \text{ m/s}$  com densidade energética de  $700,91 \text{ W/m}^2$ . (Localização UTM:  $674672,1 \text{ m E}$ ;  $9805969 \text{ m S}$ ).



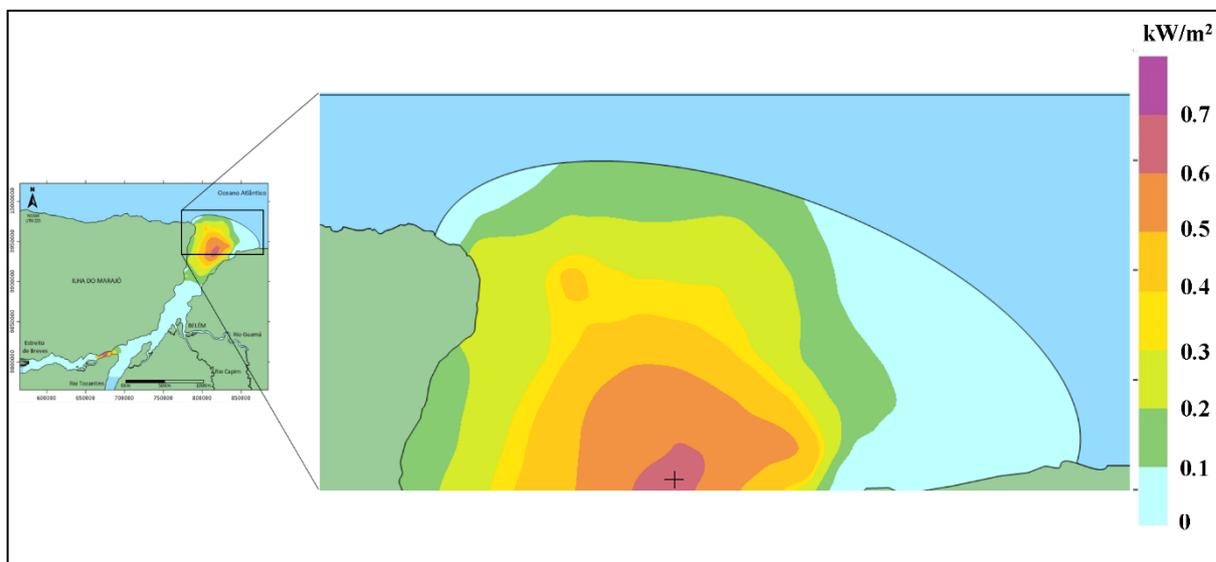
Fonte: Autora.

Figura 53. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estufa de preamar na zona de mistura com as maiores velocidades chegando a 1,06 m/s com densidade energética de 610,19 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 814690,7m E; 9934061m S)



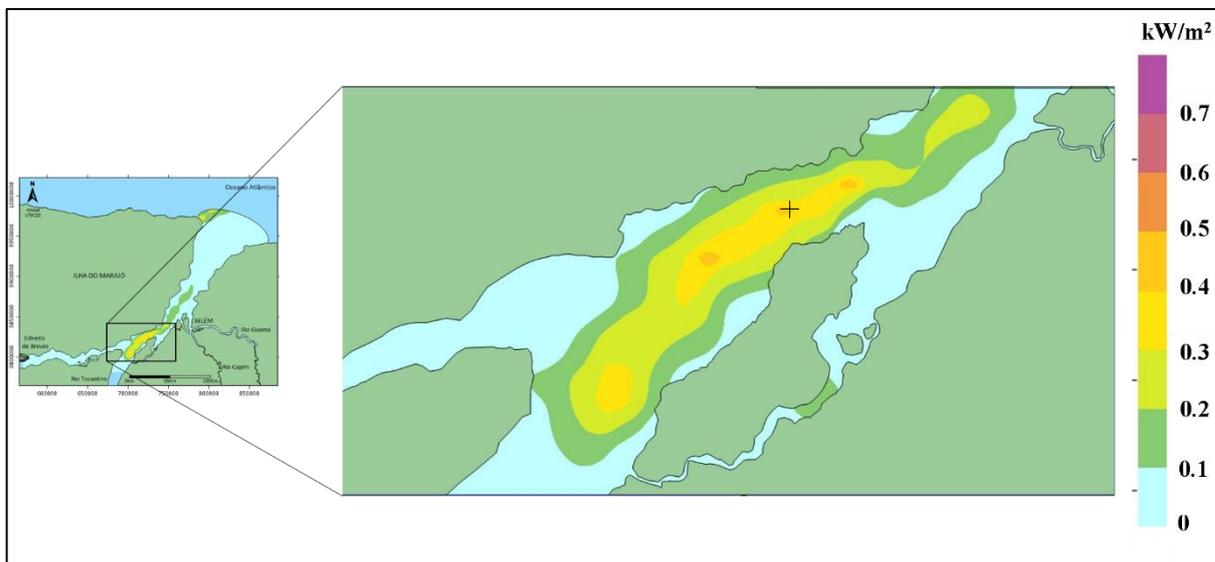
Fonte: Autora.

Figura 54. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estufa de preamar na zona costeira com as maiores velocidades chegando a 1,06 m/s com densidade energética de 610,19 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 817745,9m E; 9939973m S)



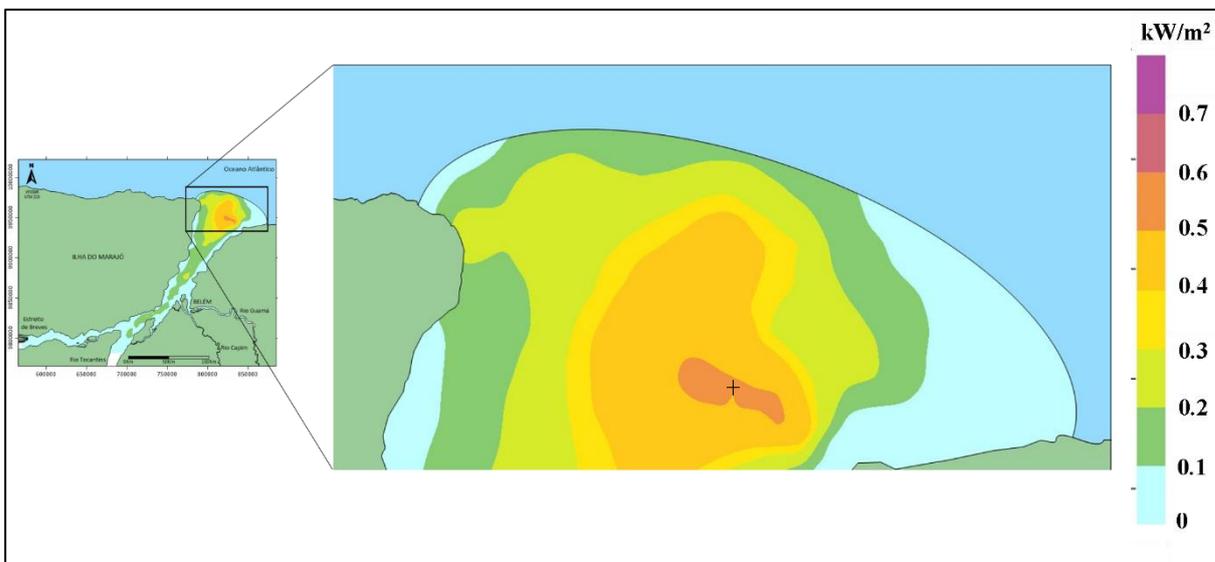
Fonte: Autora.

Figura 55. Locais na maré de sizígia dentro da simulação da meia maré vazante na zona maré do rio com as maiores velocidades chegando a 0,93 m/s com densidade energética de 412,23 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 724272,3m E; 9826917m S)



Fonte: Autora.

Figura 56. Locais na maré de sizígia dentro da simulação de estufa de baixamar na zona costeira com as maiores velocidades chegando a 1,00 m/s com densidade energética de 512,5 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 826535,5m E; 9948618m S)



Fonte: Autora.

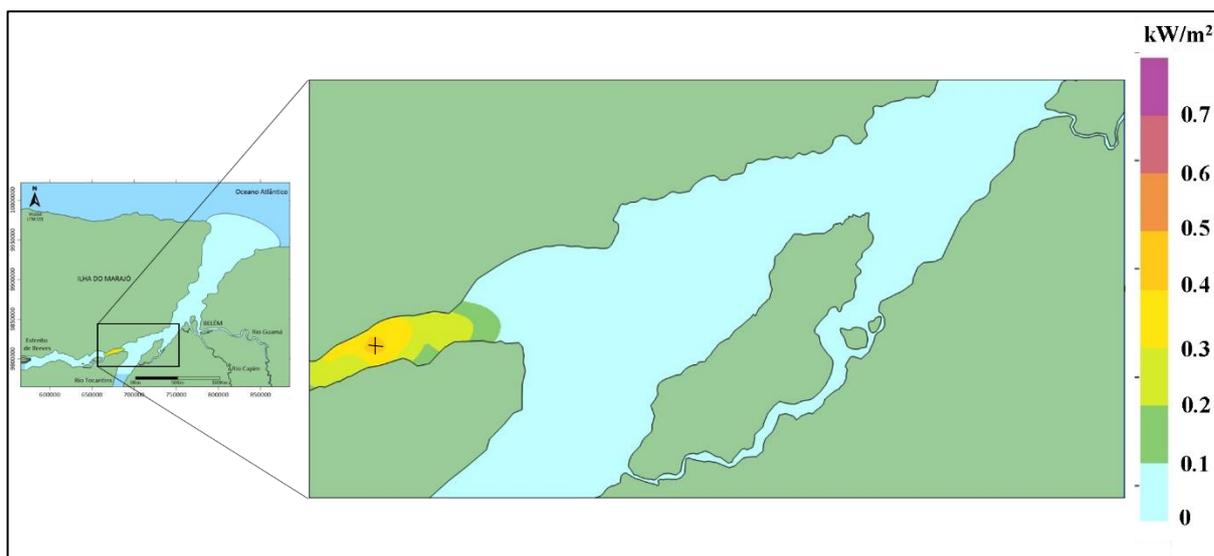
Tabela 10. Velocidade e densidade energética das simulações na maré de sizígia nas áreas com potenciais energéticos

MARÉ DE SIZÍGIA				
	SIMULAÇÃO	ZONA	VELOCIDADE(m/s)	DENSIDADE ENERGÉTICA (W/m <sup>2</sup> )
a)	Estofa de preamar	Zona de maré do rio	1,11	700.91
b)	Estofa de preamar	Zona de mistura	1,06	610.39
c)	Estofa de preamar	Zona costeira	1,06	610.39
d)	Meia maré vazante	Zona de maré do rio	0,93	412.23
e)	Estofa de baixamar	Zona costeira	1,00	512.5

Fonte: Autora.

Durante a maré de quadratura apenas a simulação do estofa de preamar apresentou uma velocidade significativa, sendo assim um momento de interesse para o cálculo de densidade energética a partir da equação 4. A figura 57 detalha o local essa velocidade.

Figura 57. Locais na maré de quadratura dentro da simulação de estofa de preamar na zona de maré do rio com as maiores velocidades chegando a 0,95 m/s com densidade energética de 439.4 W/m<sup>2</sup>. (Localização UTM: 674120,9m E; 9809132m S)



Fonte: Autora.

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

MARÉ DE QUADRATURA				
	SIMULAÇÃO	ZONA	VELOCIDADE (m/s)	DENSIDADE ENERGÉTICA (W/m <sup>2</sup> )
f)	Estofa de preamar	Zona maré do rio	0,95	439.4

#### 5.4.1 Tecnologias para geração de energia de maré.

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. 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. Entretanto, devido aos impactos ambientais causados pelas barragens, não se visa mais a utilização dessa tecnologia.

Com isso a utilização das turbinas para geração de energia a partir das correntes de maré se torna uma opção mais viável. Em relação à tecnologia de exploração de correntes de marés, a SIMEC ATLANTIS ENERGY 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. O sistema SeaGen S projetado para fundações flutuantes ou de perfuração de superfície é uma turbina de eixo horizontal de até 1,0 MW, completa com passo ativo (Figura 59). A turbina cheia pesa aproximadamente 100 toneladas de ar e tem uma vida útil de 25 anos. O diâmetro do rotor pode ser fornecido para se adequar à implantação e à redundância do sistema, além da combinação de acessibilidade para maximizar a confiabilidade no exterior (SIMEC, 2020).

A SeaGen U difere por ser um dispositivo desenvolvido para águas profundas (Figura 60). Este dispositivo não possui uma viga que leva até a superfície da água e é fixado no fundo submarino acoplado a um mecanismo articulado que permitirá a sua manutenção na superfície. Sua turbina é de eixo horizontal de 1,5 MW. A turbina cheia pesa 150 toneladas de ar e tem uma vida útil de 25 anos. O diâmetro do rotor é de 20 m e todos os principais sistemas operacionais possuem redundância incorporada para maximizar a confiabilidade no exterior (SIMEC, 2020).

As turbinas utilizadas para a captação de energia cinética a partir das correntes de maré tem se desenvolvido bastante durante os últimos anos. Esses dispositivos são baseados em diferentes conceitos referentes ao método de fixação da turbina em posição, o número de lâminas e como o tom das lâminas é controlado. Vários tipos de turbinas são desenvolvidos mundialmente. Para esse trabalho focou-se na tecnologia SeaGen.

As áreas com potencial energético encontram-se em canais de maré, que são utilizados para a navegação dentro da região amazônica. Nesse caso a turbina Seagen S não é indicada, já que apresenta em sua estrutura uma viga para a elevação e manutenção das turbinas. Isso implicaria em uma análise de logística para não atrapalhar as navegações que são

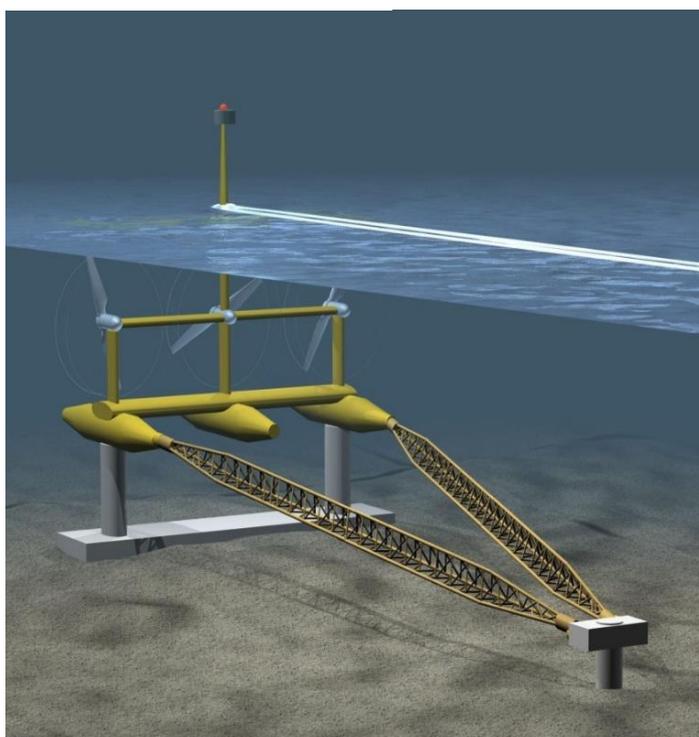
predominantes na região. A partir disso a turbina mais indicada para essas áreas são as do tipo Seagen U, que é uma turbina de eixo horizontal submersa, que apenas necessitaria de sinalização.

Figura 58. .SeaGen S com turbinas submersas e emersas.



Fonte: DONG et al., 2019

Figura 59. Esquema de SeaGen U



Fonte: SIMEC, 2020

## 6 CONCLUSÕES

O estuário do rio Pará apresenta profundidade média de 11,507 m. Na desembocadura, a profundidade varia entre 5 a 20 m e as maiores profundidades ocorrem na região do Porto Vila do Conde, em Barcarena, variando entre 30 a 69 m.

A modelagem computacional utilizada como ferramenta para compreensão dos fenômenos ocorrentes no estuário do rio Pará foi satisfatória. O modelo utilizado nas simulações hidrodinâmicas foi o 2DH que utiliza como as dimensões (x, y, t) e foi considerado o mais adequado para o estuário do rio Pará. A observação dos modelos gerados nas simulações auxilia o entendimento sobre as forças atuantes no sistema.

A validação do modelo perpassa pela comparação entre dados reais e modelados, a fim de verificar se o modelo está respondendo satisfatoriamente ao ambiente natural. Quando os parâmetros se apresentam similares significa que o modelo está correspondendo ao padrão real, logo pode gerar cenários confiáveis para aquele ambiente. As comparações dos dados de elevação de maré (medidos e simulados) mostraram que o modelo se comportou de forma compatível a realidade. O resultado dos valores de EQM para a primeira maré de sizígia e a segunda maré de quadratura foram de 1,729% e 1,296% respectivamente, indicaram um erro mínimo, comprovando a eficácia do modelo aplicado.

O parâmetro utilizado para a validação do modelo foi os valores de amplitude de maré, a partir de uma comparação das séries temporais e a relação estatística dos dados de campo e dos gerados nas simulações. Os dados utilizados para calibrar o modelo constam de uma série de altura da maré no período de 01/03/2016 à 30/03/2016, dados obtidos do marégrafo localizado no porto de Vila do Conde.

O objetivo primordial do trabalho foi alcançado, uma vez que o software SisBaHia rodou de forma satisfatória no estuário do rio Pará e que os resultados obtidos possibilitam o melhor entendimento a respeito do funcionamento das correntes de maré nesse local..

A modelagem hidrodinâmica no estuário do Rio Pará mostrou resultados esperados onde, observou-se que durante as marés de sizígia, as velocidades são maiores (meia maré enchente: 0 a 0,86 m/s, estofa de preamar: 0 a 1,11 m/s, e meia maré vazante: 0 a 0,93 m/s e estofa de baixamar: 0 a 1,00 m/s) se comparadas com as marés de quadratura (meia maré enchente: 0 a 0,58 m/s, estofa de preamar: 0 a 0,95 m/s, e meia maré vazante: 0 a 0,55 m/s e estofa de baixamar: 0 a 0,60 m/s).

As correntes mais fortes ocorrem durante a maré de sizígia quando comparadas com as correntes que ocorrem na maré de quadratura, e estão predominantemente localizadas

no início do estuário do rio Pará e estão ligadas as contribuições do rio Tocantins e do rio Amazonas.

A partir das simulações foram identificadas 6 áreas com potencial energético em diferentes momentos da maré: sendo as maiores  $700,91 \text{ W/m}^2$  e  $610,39 \text{ W/m}^2$  (na maré de Sízígia) e  $439,4 \text{ W/m}^2$  (na maré de quadratura).

Acompanhando as tendências mundiais, em termos de produção energética, sugere-se utilização de turbinas submersas no canal de maré, a exemplo de Seagen U.

## REFERÊNCIAS

ABBOTT, M. B., AND BASCO, D. R. Computational fluid dynamics: an introduction for engineers, Longman Scientific & Technical.1989.

ABREU, C. H. M. ; BARROS, M. L. C. ; BRITO, D. C. ; TEIXEIRA, M. R. ; CUNHA, A. C. Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River. **Water** , v. 12, p. 660, 2020.

ABREU, M. W. M. de. **Aplicação do modelo hidrodinâmico no estuário do rio Caeté (NE do Pará)**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

ALAMIAN, R.; SHAFAGHAT, R.; BAYANI, R.; AMOUEI, A.H. An experimental evaluation of the effects of sea depth, wave energy converter's draft and position of centre of gravity on the performance of a point absorber wave energy converter. **J. Mar. Eng. Technol.**v 16, p. 70–83. 2017

ALAMIAN, R.; SHAFAGHAT, R.; MIRI, S.J.; Yazdanshenas, N.; Shakeri, M. Evaluation of technologies for harvesting wave energy in Caspian Sea. **Renew. Sustain. Energy Rev.** v. 32, p.468–476. 2014.

ALTAEE, A.; ZHOU, J.; ALANEZI, A.A.; ZARAGOZA, G. Pressure retarded osmosis process for power generation: Feasibility, energy balance and controlling parameters. **Appl. Energy**, v. 206, p. 303–311, 2017.

ARRAUT, J.M.; NOBRE, C.; BARBOSA, H.M.J.; OBREGON, G., AND MARENGO, J., Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. **J. Climate**, v. 25, p. 543–556. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI4189.1>.

ASTARIZ, S.; IGLESIAS, G. The economics of wave energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 397-408, 2015.

AVCI, A.H.; TUFA, R.A.; FONTANANOVA, E.; DI, G.; CURCIO, E. Reverse Electrodialysis for energy production from natural river water and seawater. **Energy**, v. 165, p. 512–521. 2018

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event Simulation**. 5. ed., New Jersey: Pearson Prentice-Hall, 2010.

BASTOS L, BIO A, IGLESIAS I. The importance of marine observatories and of RAIA in particular. **Frontiers in Marine Science**. v. 3, p. 1-11,2016.

BARBOSA, G. V.; PINTO, M. N. Geomorfologia da Folha SA-23 (São Luís) e parte da Folha SA- 24 (Fortaleza). In: BRASIL. Projeto Radam Brasil. Rio de Janeiro: [S.N], cap.2, 1973. p. 3-26.

BARBOSA, L. P. F. **Aplicação da modelagem hidrodinâmica na circulação do estuário do rio Maracaná (NE do Pará)**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BARTHEM, R. B.; SCHWASSMANN, H. O. Amazon river influence on the seasonal displacement of the salt wedge in the Tocantins river estuary, Brazil, 1983-1985. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Zoologia**, 10(1). 1994.

BATISTA, A. G. **Construção de um modelo de dispersão de poluentes na Baía do Guajará**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Belém, 2005. Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica

BEARDSLEY, R.C.; CANDELA, J.; LIMEBURNER, R.; GEYER, W.R.; Lentz, S.J.; Belmiro, M.C.; Cacchione, D.; Carneiro, N., The M2 tide on the amazon shelf. **Journal of Geophysical Research**, v. 100(2), p.2283-2319. 1995.

BÉRGAMO, A. L. **Características da hidrografia, circulação e transporte de sal: Barra de Cananéia, Sul do mar de Cananéia e Baía do Trapandé**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia). Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 2000.

BEZERRA, P. NETO, L. SAAVEDRA, O. R. CAMELO, N. J. DE SOUZA RIBEIRO L. A., and Ferreira R. M., “Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências,” **Rev. Chil. Ing.**, v. 19, n. 2, p. 219–232, 2011.

BÖCK, C. S. **Influência da Morfologia do Fundo na Hidrodinâmica da Baía de Guajará (Pará)/ 2010. XV, 100 p.: il.; 29,7 cm.** Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

BOEM (2017). Ocean Wave Energy. <https://www.boem.gov/OceanWave-Energy/>

BONETTI FILHO J. & MIRANDA L.B. Estimativa da Descarga de Água Doce no Sistema Estuarino-lagunar de Cananeia-Iguape. *Rev. Bras. Ocean.*, 45(1/2):89-94. 1997.

BORBA, T. A. C. **Modelagem hidrodinâmica aplicada ao estuário Amazônico:** uma abordagem em malha flexível. 2014. 46f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Marinha) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2014

CALLEDE, J.; COCHONNEAU, G.; RONCHAIL, J.; ALVEZ, FV.; GUYOT, J. L.; GUIMARES, V. S.; DE OLIVEIRA, E. Les apports en eau de l'Amazone a l'océan Atlantique. *J. Water Sci.*, Revue des sciences de l'eau, Lavoisier (Hermes Science Publications), v. 23, n. 2, p. 247-273, 2010.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para projetos ambientais.** 2<sup>a</sup>. ed. revisada e ampliada. São José dos Campos, SP: INPE, Maio. 1998.

CAMERON WM AND PRITCHARD DW. Estuaries. In: Hill MN (Ed), **The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas.** Interscience, New York, p. 306-324. 1963.

CARDOSO DA SILVA, M.. *Estuários-Critérios para uma Classificação Ambiental.* **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Jan/Mar, Volume 5 n.1. p. 25-35, 2000

CHEN, H. AIT-AHMED, N. ZAIM, E. H. AND MACHMOUM, M. "Marine tidal current systems: State of the art," in *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics.* p. 1431–1437. 2012

COELHO C, SILVA R, VELOSO-GOMES F, TAVEIRA-PINTO F. Potential effects of climate change on northwest Portuguese coastal zones. *ICES Journal of Marine Science.*; v66. p. 1497-1507. 2009

CORDEIRO, I. M. C. C.;RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.;SCHWARTZ, G.;OLIVEIRA, F. de A. (Org.).Nordeste Paraense: panorama geral e uso sustentável das florestas secundárias.Belém, PA: EDUFRA, p. 323. E-book. 2017

CORRÊA, I. C. S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA. *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre-RS, v. 32 (2). p. 109 – 118. 2005.

COSTA, M. S. **Aporte hídrico e do material particulado em suspensão para a baía do Marajó: influência dos rios Amazonas e Tocantins**. Dissertação (Mestrado em Geologia) do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Universidade Federal do Pará, Belém. 2014.

COSTA JOÃO B. S., HASUI YOCITERU, BEMERGUY RUTH L., SOARES-JÚNIOR ADILSON V., VILLEGAS JAVIER M. C. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, Rio de Janeiro, v. 74, n. 3p. 519-531. 2002.

CUNHA, A. C. DA, MUSTIN, K., DOS SANTOS, E. S., DOS SANTOS, E.W.G, GUEDES, M.C, CUNHA, H.F.A, STERNBERG, L.D.L Hydrodynamics and seed dispersal in the lower Amazon Freshwater Biology, v. 62, p. 1721-1729. 2017.

CUNHA, J. R. C. **Modelagem (Bidimensional - 2dh) Hidrodinâmica Aplicada no Estuário do Rio Guamá (Estado do Pará/Brasil)** Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Naval, Belém, 2017.

CZIZEWESKI, A., PIMENTA, F.M. & SAAVEDRA, O.R. Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution. *Ocean Dynamics* v.70, p.667–682 2020.

DALRYMPLE, R.W., ZAITLIN, B. A., BOYD, R. Estuarine Facies Models: Conceptual Basis and Stratigraphic Implications. *Journal. Sedim. Petrol.*, v.62 (6): p.1130-1146. 1992.

DANGENDORF S, WAHL T, HEIN H, JENSEN J, MAI S, MUDERSBACH C. Mean sea level variability and influence of the North Atlantic oscillation on long-term trends in the German bight. *Water*.;v.(4):p.170-195, 2012

DAVIES, J. L. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeit. f. Geomorph.*, 8:27-142. 1964.

DAY, J. W., CRUMP, B. C., KEMP, W. M., YANEZ-ARANCIBIA. *Estuarine Ecology*. Second Edition, Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey, p.554, 2012.

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DO ESTADOS UNIDOS - US-DOT, 2017. A Primer on Modeling in the Coastal Environment. A MANUAL FOR EDC/CHANGE. PUBLICATION No.FHWA-HIF-18-002. DECEMBER 2017

DIONNE, J.C. **Towards a more adequate definition of the St. Z. Geomorphogy**, p.36-44, 1963.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). Cartas Náuticas. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>>. Acesso em 26/01/2020.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). Cartas de Correntes de Maré Rio Pará- De Salinópolis a Belém- DG10-I-1, 1 ed, Belém, Pa.1962.

DONG VH . NGUYEN POP. VIET PV. Ocean Energy - A Clean Renewable Energy Source. EJERS, **European Journal of Engineering Research and Science** Vol. 4, No. 1, January 2019

DYER K.R. *Coastal and Estuarine Sediment Transport*. A Wiley – **Interscience Publication. Institute of Oceanographic Sciences**. Bidston, UK. 342p. 1988.

DYER, K. **Estuaries: A physical itroduction**. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: John Wiley & Sons, 195 p., 1997.

ELLIOTT M. & MCLUSKY D. S. The Need for Definitions in Understanding Estuaries. *Estuarine Coast. Shelf Sci.*, v.55: p.815-827. 2002.

ETEMADI, A., EMAMI, Y., ASEFAFSHAR, O., EMDADI, A. **Electricity Generation by the Tidal Barrages**, Energy Procedia, v. 12, , p.928-935. 2011

ESTEFEN, S. F. Energia Renovável dos Oceanos Relatório IPCC & Atividades no Brasil. 2012.

FERREIRA, C. S. Notas estratigráficas sobre o Cenozóico do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1. 1982. Anais. Belém: SBG. 1, p. 84-88. 1982.

FRANÇA, C. F. ; PIMENTEL, M. A. S. . Diversidade paisagística das margens oeste e leste da baía de Marajó, Pará, Norte do Brasil. **Revista GeoNorte** , v. 1, p. 900-910, 2012.

FREITAS, P.T.A.; SILVEIRA, O.F., AND ASP, N.E., 2012. Tide distortion and attenuation in an Amazonian tidal river. *Brazilian Journal of Oceanography* São Paulo , v. 60, n. 4, p. 429-446.

GENZ F., LESSA G.C., CIRANO M., LIMA G.M.P. 2003. As Tendências de Longo Prazo das Vazões Fluviais no Litoral do Estado da Bahia. In: *IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Anais*.

GEYER, W. R.; MACCREADY, P. (2014) . The estuarine circulation. *Annual review of fluid mechanics*, 46(1): 175.

GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. Caracterização faciológica e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região bragantina, nordeste do estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. 1980, Camboriú. Anais. Camboriú: SBG, 1980. v. 2. p. 766-771.

GÓES, A.M. **Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru no NE do Pará e NW do Maranhão**. Universidade Federal do Pará: Centro de Geociências. 1981. 55 p. Dissertação de Mestrado.

HAN, G.; ZHANG, S.; LI, X.; CHUNG, T.S.. Progress in pressure retarded osmosis (PRO) membranes for osmotic power generation. **Prog. Polym. Sci.**, 51, 1–27. 2015

HANSEN, D.V., AND M. RATTRAY JR. (1965). Gravitational circulation in straits and estuaries. *Journal of Marine Research*, n. 23, 104–122.

HOLANDA, P. DA S.. **Modelagem hidrodinâmica e estudo morfológico do Lago Água Preta: um dos mananciais da Grande Belém**. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2010. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

HUCKERBY, J.A.; MORAN, B.; SEDGWICK, J.: An International Vision for Ocean Energy. Version II. Ocean Energy Systems Implementing Agreement. 2012.

IGLESIAS I, AVILEZ-VALENTE P, PINHO JL, BIO A, VIEIRA JMP, BASTOS, L AND VELOSO-GOMES, F. (March 21st 2019). Numerical Modeling Tools Applied to Estuarine and Coastal Hydrodynamics: A User Perspective, Coastal and Marine Environments - Physical Processes and Numerical Modelling, José Simão Antunes Do Carmo, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.85521. Disponível em : <https://www.intechopen.com/books/coastal-and-marine-environments-physical-processes-and-numerical-modelling/numerical-modeling-tools-applied-to-estuarine-and-coastal-hydrodynamics-a-user-perspective>

IGLESIAS I, VENÂNCIO S, PINHO JL, AVILEZ-VALENTE P, VIEIRA JMP. Two models solutions for the Douro estuary: Flood risk assessment and breakwater effects. **Estuaries and Coasts**.;42(2):348-364. 2018

IGLESIAS I, VENANCIO S, PEIXOTO R, PINHO J, AVILEZ-VALENTE P, VIEIRA J. The Douro estuary: Modelling comparison for floods prevention. In: Actas das 4.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisbon: Instituto Hidrográfico; 2016. pp. 159-162

INTERGORVERNAMENTAL PAINEL OF CLIMATE CHANGE IPCC. 2012a **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Summary for Policymakers**. Field C, Barros V, Stocker T, Qin D, Dokken D, Ebi K, et al., editors. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2012. 3-21 p

INTERGORVERNAMENTAL PAINEL OF CLIMATE CHANGE IPCC. 2012b. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Edenhofer, O., PichsMadruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 1075 p. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN\\_FD\\_SPM\\_final-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_FD_SPM_final-1.pdf) . Acesso em: 10 maio 2019.

INTERGORVERNAMENTAL PAINEL OF CLIMATE CHANGE IPCC -2001: **Impacts, Adaptation, and Vulnerability** – Contribution of Working Group II to the IPCC Third Assessment Report.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2019a), **Global Energy & CO2 Status Report 2019**, IEA, Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>>. Acesso em: Jun. de 2020

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2019b. **International Energy Outlook 2019**. Reference case. Disponível em: <<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>>. Acesso em: Jun. de 2020

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA, 2014a. **Ocean Energy: Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook**. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA\\_Ocean\\_Energy\\_report\\_2014.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_Ocean_Energy_report_2014.pdf)

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY IRENA, 2014b **Wave Energy Technology** Brief. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2014/Jun/Wave-energy>

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET- 2020. Disponível em:<[www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)>. Acesso em 24/04/2020

JOVANOVIC, D.; GELSINARI, S.; BRUCE, L.; HIPSEY, M.; TEAKLE, I.; BARNES, M.; COLEMAN, R.; DELETIC, A.; MCCARTHY, D.T. Modelling shallow and narrow urban salt-wedge estuaries: Evaluation of model performance and sensitivity to optimise input data collection. **Estuar. Coast. Shelf Sci.** v. 217,p. 9–27. 2019

KASAI, A.; HILL, A. E.; FUJIWARA, T.; SIMPSON, J. H. Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions of freshwater influence. **J. Geophys. Res.** v. 105, n. C7, 16.961–16.969, 2000.

KJERFVE, B. 1987. Estuarine Geomorfology and Physical Oceanography. In: DAY JR., J.W., C.H.A.S. HALL, KEMP W.M. & YÁÑEZ-ARANCIBA, A. (eds.) **Estuarine Ecology**. New York, Wiley, pp. 47–78.

KJERFVE B., SCHETTINI C.A.F., BASTIAAN K., LESSA G.C., FERREIRA H.O. 1996. Hydrology and Salt Balance in a Large, Hypersaline Coastal Lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. **Est. Coast. Shelf Sci.**, 42: 701-725.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2ª. ed. São Paulo : Editora da UNESP, 2003. 253 p.

LEITE NETO, P. B, 2017. **Contribuições para a operação energética e econômica de microrredes isoladas com fontes renováveis**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Maranhão, UFMA, São Luís,

LEWIS, M.; NEILL, S.P.; ROBINS, P.; HASHEMI, M.R.; WARD, S. Characteristics of the velocity profile at tidal-stream energy sites, **Renewable Energy**, Volume 114, Part A, Pages 258-272, 2017, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.096>.

LIMA, G. M. P.; LESSA, G. C. The Fresh-Water Discharge in Todos os Santos Bay (Ba) and its Significance to the General Water Circulation. **Revista Pesquisas em Geociencias**, 28(2):85-96. 2001.

LIU, C. A tunable resonant oscillating water column wave energy converter. **Ocean Eng.** v.116, p.82–89. 2016.

LOPES, M. S. **Modelagem hidrodinâmica 2DH no Furo da Laura Nordeste Paraense.** Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Pós-graduação em Geofísica, Instituto de Geociências Universidade Federal do Pará, Belém. 2016.

LOPES, M.N.G.; SOUZA, E.B.; FERREIRA, D.B.S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, p.84-102, 2013.

MARENGO, J. A., TOMASELLA J. Trends in Streamflow and Rainfall in Tropical South America: Amazonia, Eastern Brazil and Northwestern Peru. **Journ. Geophy. Res.**, 103:1775-1783. 1998.

MENEZES, F.P.; FERNANDES, L.L.; ROCHA, E.J.P. O Uso da Estatística para Regionalização da Precipitação no Estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, p. 64-71, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Panorama da Erosão Costeira no Brasil./Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental**, Departamento de Gestão Ambiental Territorial: Organização Dieter Muehe- Brasília, DF: MMA, 2018.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários.** 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2017.

MOLION L., MORAES, J. Oscilacao Sul e Descarga de Rios na America do Sul tropical. **Rev. Bras. Eng., Caderno de Hidrologia**, 5(1): 53-63. 1987.

MOTYKA, M., SLAUGHTER, A. AMON, C. “Global renewable energy trends: Solar and wind move from mainstream to preferred”, Deloitte Insights, 13 September 2018, <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/industry/power-and-utilities/global-renewable-energy-trends.html>;

MUSTAPA, M.A.; YAAKOB, O.B.; AHMED, Y.M.; RHEEM, C.K.; KOH, K.K.; ADNAN, F.A. WAVE energy device and breakwater integration: A review. **Renew. Sustain. Energy Rev**, 77, 43–58. 2017.

NASCIMENTO, I. de B. A. **Aplicação de modelo hidrodinâmico 2dh em Canais de Maré da Costa Leste da ilha do Marajó – Pará.** 2013. Dissertação (Mestre em Biologia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Ambiental (Ecologia de Ecossistemas Costeiros e Estuarinos), da Universidade Federal do Pará, Campus de Bragança, 2013.

NEILL, S.P.; ANGELOUDIS, A.; ROBINS, P.E.; WALKINGTON, I.; WARD, S.L.; MASTERS, I.; LEWIS, M.J.; PIANO, M.; AVDIS, A.; PIGGOTT, M.D. Tidal range energy resource and optimization Past perspectives and future challenges. **Renew. Energy**, 127, 763–778. 2018.

OCTAVIANI, F.; MUSLIM, M.; BUWONO, A.; FATURACHMAN, D. 2016. Study of ocean thermal energy conversion (OTEC) generation as project of power plant in West Sumatera-Indonesia. **Recent Adv. Renew. Energy Sources**, 10, 64–68.

OCEAN ENERGY SYSTEMS - OES, 2020. Ocean Energy Systems Annual Report 2019. Disponível em: <https://www.etipocean.eu/assets/Uploads/oes-annual-report-2019.pdf>

OFFICER, C. B. Longitudinal Circulation and Mixing Relations in Estuaries. *Estuaries, Geophysics, and the Environmental*. Washington, D. C., **National Academy of Science**, p. 13–21. 1977.

OWEN, A., TREVOR, M.L. **Tidal current energy: origins and challenges.** In: Future energy. Oxford: Elsevier; 2008. Pp. 111-128.

O'ROURKE, F., BOYLE, F., AND REYNOLDS, A.: Tidal Energy Update 2009. *Applied Energy*. Volume 87, Issue 2, Pages 398-409. February 2010. doi:10.1016/j.apenergy.2009.08.014 perspectives and future challenges. *Renew. Energy* 2018, 127, 763–778.

PAIVA, R., COLLISCHONN, W., BONNET, M., BUARQUE, D., FRAPPART, F., CALMANT, S., MENDES, C. Large scale hydrologic and hydrodynamic modelling of the Amazon River Basin. **Water Resources Research** v. 49, p. 1226-1243, 2013

PEKAROVA P., MIKLANEK P., PEKAR J. 2003. Spatial and Temporal Runoff Oscillation Analysis of the Main Rivers of the World During the 19th–20th Centuries. **Journ. Hydrol.**, 274: 62-79.

PEREIRA H. **Coupled modelling of the Minho and Lima estuaries: Hydrological response to climate changes** [Thesis]. Universidade de Aveiro; 2016

PERILLO, G. M. E. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology*. n. 53, **Elsevier Science**, 471p. 1995.

PRESTES, Y. O.; BORBA, T. A. da C.; SILVA, A. C.; ROLLNIC, M. A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system, **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Volume 28, 2020

PRESTES, Y. O.; SILVA, A. C.; ROLLNIC, M.; ROSÁRIO, R. P. The M2 and M4 tides in the Pará River estuary. **Tropical Oceanography**, Recife, v. 45, n. 1, p. 26-37, 2017.

PRESTES, Y. O. **Interações físicas entre o estuário do Rio Pará e a Plataforma Continental no norte do Brasil**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2016.

PRESTES, Y.O.; ROSÁRIO, R.P.; ROLLNIC, M., AND SOUZA, M. Volume transport in the tidal limit of the Pará River, Brazil. Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) conference, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil, 19-24 October 2014.

PRITCHARD, D. W . **What is an Estuary: Physical View Point**. In: ESTUARIES. Washington D.C.: American Association for the Advance of Science, 1967. n. 83, p. 3-5

\_\_\_\_\_. The dynamic structure of a coastal plain estuary. *Journal of Marine Research*. v. 15, p. 33–42, 1956.

\_\_\_\_\_. Estuarine circulation patterns. *Proc. Am. Soc. Civil Eng.*, v. 81, n. 717, p. 1–11, 1955.

\_\_\_\_\_. Salinity Distribution and circulation in the Chesapeake Bay Estuarine System”. *J. Mar. Res.*, 11 (1): 106-123;. 1952.

Rosário R. P., Borba T. A. C., Santos A. S., Rollnic M. 2016. Variability of salinity in Pará River Estuary: 2D analysis with flexible mesh model. **Journal of Coastal Research** . SI (75): 128 -132.

ROSMAN, P. C. C. - **REFERÊNCIA TÉCNICA DO SISBAHIA - SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL**. www.sisbahia.coppe.ufrj.br. COPPE/UFRJ, 2020.

ROSMAN, P.C.C. Subsídios Para Modelagem de Sistemas Estuarinos. In: Rosman, P.C.C., Almeida, A.B., Eiger, S., Eds., **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**, 3rd Edition, ABRH, Porto Alegre, 238-348. 1997

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. E GÓES, A. M. Estudo Paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, Nordeste do Pará. Boletim do Museum Paraense Emílio Goeldi (Ser. Bot.), [S.l.], v. 4, p.133-154. 1989.

SA, B. G. OLIVEIRA, D. Q. DE AND GOMES, T. L. C. “Index for allocation of tidal current power plant for reactive margin improvement,” in *2017 IEEE URUCON*, 2017, pp. 1–4.

SANTOS, A. S. dos, **Modelagem matemática do sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba (Pará-BR)** 2016.Dissertação (Mestrado em Geofísica) do Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Universidade Federal do Pará, Belém. 2016.

SANTOS, E. S. dos. **Modelagem Hidrodinâmica e Qualidade da Água na Foz do Rio Araguari, Amapá – Amazônia Oriental - Brasil** Dissertação (Mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical.2012.

SANTOS, H. S.; CUNHA, G. N.; CASTRO, J. R. Avaliação qualitativa das técnicas de interpolação de Mínima Curvatura, Krigagem e Bidirecional na formação de imagens. *Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana* , n. 4, p. 2-16, 2016.

SARGENT, R.G., GOLDSMAN, D.M., YAACOUB, T. (2016), A tutorial on the operational validation of simulation models. Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, pp. 163-177

SHADMAN, M., SILVA, C., FALLER, D., WU, Z., DE FREITAS ASSAD, L.P, LANDAU L, LEVI C, ESTEFEN SF (2019) Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: a case study of Brazil. **Energies** 12(19):3658

SHEPARD, F. P.,1973. **Submarine Geology**. Harper and Row, New York, 517p.

SIMEC ATLANTIS ENERGY 2020. Disponível em : <https://simecatlantis.com/services/turbines/>. Acesso em 24 de julho de 2020.

SLINGER, J.H. Hydro-morphological modelling of small, wave-dominated estuaries. **Estuar. Coast. Shelf Sci.** 2017, 198, 583–596.

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.

STOMMEL, H., 1951. Recent Development in the Study of Tidal Estuaries. Tech. Rept., Massachusetts, **Woods Hole Oceanographic Institution**, n. 51-33.18p.

TENG J, JAKEMAN AJ, VAZE J, CROKE BFW, DUTTA D, KIM S. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**. 2017 ;90:201-216

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). – EPE: Rio de Janeiro, 2016

TUCCI C.E.M. 1997. **Hidrologia** - Porto Alegre - RS: Editora Universidade / UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 943p.

TUFA, R.A.; PAWLOWSKI, S.; VEERMAN, J.; BOUZEK, K.; FONTANANOVA, E.; VELIZAROV, S.; GOULÃO, J.; NIJMEIJER, K.; CURCIO, E. 2018. Progress and prospects in reverse electrodialysis for salinity gradient energy conversion and storage. **Appl. Energy** 2018, 225, 290–331.

VALLE-LEVINSON, A. Classification of estuarine circulation. In: WOLANSKI, E.; MCLUSKY, D. (Ed.) **Treatise on estuarine and coastal science**. 2011a. p.75 – 86.

\_\_\_\_\_. Definition and classification of estuaries. In: VALLE-LEVINSON, A. (Ed.). **Contemporary Issues in Estuarine Physics**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010. v. 1, p.1-11.

VALLE-LEVINSON, A.; BOSLEY, K.T. Reversing circulation patterns in a tropical estuary. **Journal of Geophysical Research**. v. 108, n. C10, 2003.

VALLE-LEVINSON, A.; DELGADO, J. A.; ATKINSON, L. P. Reversing water exchange patterns at the entrance to a Semiarid Coastal Lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. v. 53, p. 825–838, 2001.

WAHYUDIE, A., JAMA, M.A., SUSILO, T.B., SAEED, O., NANDAR, C.S.A., HARIB, K., 2017. Simple bottom-up hierarchical control strategy for heaving wave energy converters. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 87, 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.10.010>.

WILLEMSSEN, DIEDERIK. (2019). Spring and Neap Tides - Astronomical Origin of Tides. Disponível em: <http://www.sailingissues.com/navcourse6.html>,

WONG, K. C. On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary. *Journal of Geophysical Research*. v. 99, n. C7, p. 14.209 – 14.222, 1994.

YANG, C. S.; KAO, S. P.; LEE, F. B.; HUNG, P. S. Twelve different interpolation methods: a case study of surfer 8.0. *In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, 35., Congress. 2012. Disponível em: <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm2/papers/231.pdf>. Acesso em: 14 de Janeiro de 2021.