



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FACULDADE DE OCEANOGRAFIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Modelagem computacional no movimento de partículas em
suspensão no estuário do Rio Pará**

Discente: LUCAS OLIVEIRA DE ALMEIDA

Orientador: Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário (UFPA)

BELÉM-PARÁ

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FACULDADE DE OCEANOGRAFIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Modelagem computacional no movimento de partículas em
suspensão no estuário do Rio Pará**

Discente: LUCAS OLIVEIRA DE ALMEIDA

Orientador: Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário (UFPA)

BELÉM-PARÁ

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A447m Almeida, Lucas Oliveira de

Modelagem computacional no movimento de partículas em suspensão no estuário do rio Pará / Lucas Oliveira de Almeida. — 2019.
ix, 33 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - 3, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Estuário. 2. Modelagem computacional. 3. rio Pará. 4. Drogues.
I. Título.

CDD 551.4618098115



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA

Modelagem computacional no movimento de partículas em suspensão no estuário do Rio Pará

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:

LUCAS OLIVEIRA DE ALMEIDA

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em OCEANOGRAFIA

Data de Aprovação: 05/12/2019

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário – Orientador
(Doutor em Geofísica Marinha – UFPA)

MSc. Thais Angélica da Costa Borba – Membro
(Mestre em Geofísica Marinha – UFPA)

Prof. Dr. Estanislau Luczynski-Membro
(Doutor em Energia-UFPA)

AGRADECIMENTOS

A Deus pai todo poderoso pela oportunidade de aprender, lutar e evoluir. A todos os familiares pelo apoio e força para seguir em frente. Aos colegas e professores pela paciência e conselhos nesta caminhada. A UFPA pelas oportunidades de aprendizado oferecidas.

RESUMO

Esta pesquisa investigou a movimentação de partículas em suspensão no estuário Rio Pará, um dos maiores rios do norte do Brasil, através da modelagem computacional. Utilizando o estuário do rio Pará e uma parte da plataforma continental próxima como domínio, realizou-se a modelagem hidrodinâmica utilizando o programa Delft 3d flow para a criação de malha flexível e a função *drogues* para a simulação da movimentação das partículas em suspensão. Foram realizadas simulações para dois períodos de diferentes descargas fluviais, um de baixa descarga fluvial (2200 m³/s) e outro de alta descarga fluvial (12200 m³/s). Ambos cenários foram concluídos com 30 dias de simulação, utilizando um passo de tempo de 5 minutos gerando resultados de uma em uma hora. A calibração do modelo foi realizada através da comparação dos dados da modelagem computacional e dados *in situ*. Quatro derivadores virtuais foram lançados para simular o movimento de partículas em suspensão no fluido. Sendo o derivador 04 lançado às proximidades do fundeadouro de Mosqueiro à aproximadamente 85 Km da boca do estuário, o número 1 à aproximadamente 50 Km da boca, o segundo cerca de 13 Km do cabo Maguari (porção externa) e o número 3 na porção externa central a boca do estuário (à 20Km da ilha dos Guarás). Os resultados mostram que em períodos de baixa descarga fluvial há uma tendência de deslocamento de partículas para noroeste, com maior dificuldade das partículas localizadas na região mais interior do estuário de chegarem ao oceano. Já em períodos de alta descarga fluvial há maior facilidade das partículas na região interior chegarem ao oceano com uma ligeira tendência de movimento para leste (movimento em direção ao salgado paraense).

Palavras-chave: Estuário. Modelagem Computacional. *Drogues*. rioPará.

ABSTRACT

This research investigated the movement of suspended particles in the Pará River estuary, one of the largest rivers in northern Brazil, through computer modeling. Using the Pará River estuary and a portion of the continental shelf as a domain, the hydrodynamic modeling was made using the Delft 3d flow program for flexible mesh creation and the drogou functions for simulating suspended particles movements. Simulations were performed for two different river discharge periods, one low river discharge (2200 m³ / s) and another high river discharge (12200 m³ / s). Both scenarios were completed with 30 days of simulation, using a 5 minute time step, yielding one hour results. Model calibration was performed by comparing computational modeling data and in situ data. Four virtual derivators were launched for simulation or suspended particle motion in the fluid. With derivator number 04 being launched near fundeadouro de Mosqueiro approximately 85 km from the mouth of the estuary, number 1 approximately 50 km from the mouth, the second approximately 13 km from Cabo do Maguari (outside) and number 3 at the central outside a mouth of the estuary (20 km from the island of Guarás). The results show that, in periods of low river discharge, there is a tendency to move northwest, with greater difficulty of movement for those located in the innermost region of the estuary to reach the ocean. In high river discharge, it is easier for the particles on inner regions to reach the ocean with a slight eastward trend (movement towards the salgado paraense).

Keywords: Estuário. Modelagem Computacional. Drogues. Rio Pará.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Localização da área de estudo e dos pontos de controle sendo um próximo a cidade de Vigia e na região conhecida como Turé à leste da ilha do Marajó	11
Figura 2- ordem de atividades seguidas	13
Figura 3- Descarga fluvial total (Q_t) estimada atuante no estuário do Rio Pará. Q_t é o somatório das descargas fluviais provenientes dos rios Tocantins (Q_{tuc}), Guamá (Q_{gua}) e Capim (Q_{cap}). Fonte: Dados provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA 2018).....	13
Figura 4- Malha referente ao domínio criada utilizando o módulo RFGRID do software Deft 3D	16
Figura 5- Batimetria (a esquerda) e cartas náuticas (DHN) referentes ao estuário do rio Pará e parte da plataforma continental, compondo, portanto, o domínio utilizado nas simulações.	18
Figura 6- localização das fronteiras abertas(em vermelho) onde há o fluxo de fluido para dentro e fora do domínio.....	18
Figura 7- Condição inicial de salinidade utilizada como condição inicial das simulações.	19
Figura 8- Comparação da altura da coluna d'água real e modelada(a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de vigia em um período de alta descarga fluvial.	20
Figura 9- Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de Vigia.	21
Figura 10: Comparação da altura da coluna d'água real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé em um período de alta descarga fluvial.	22

- Figura 11- Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé em um período. de alta descarga fluvial. 22
- Figura 12- Comparação da altura da coluna d'água real e modelada(a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de vigia em um período de baixa descarga fluvial. 23
- Figura 13- Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de vigia em um período de baixa descarga fluvial..... 24
- Figura 14- Comparação da altura da coluna d'água real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé em um período de baixa descarga fluvial. 25
- Figura 15- Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé..... 25
- Figura 16- Drogues lançados no domínio com o início das simulações referentes a baixa descarga fluvial sendo simulando partículas em suspensão no fluido. Observar-se a tendência de movimento a oeste. 27
- Figura 17- Drogues lançados no domínio com o início das simulações referentes a alta descarga fluvial sendo simulando partículas em suspensão no fluido. Observar-se mudança na tendência de movimento de algumas das partículas. 28

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1 ESTUÁRIO	4
3.3 MARE:	7
4 OBJETIVOS	9
5 ÁREA DE ESTUDO	10
6 MATERIAIS E MÉTODOS	12
6.1 SETUP DO MODELO:	14
6.1.1 T_TIDE	14
6.1.2 DELFT DASHBOARD:	14
6.1.3 RGFGRID	14
6.1.4 QUICKIN	15
6.1.5 FLOW	15
6.1.6 QUICKPLOT	15
6.2 MODELAGEM	16
7 RESULTADOS E CALIBRAÇÃO	20
7.1 RESULTADOS DROGUES	26
8 DISCUSSÕES	29
8.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS:	31
REFERÊNCIAS:	32

1 INTRODUÇÃO

Os estuários fazem parte da história do Brasil e do mundo. Foi ao redor dos estuários que as grandes cidades do mundo se desenvolveram por razões como a facilidade das instalações portuárias comerciais e navais, capacidade natural de renovação periódica de suas águas em função da maré, abundante comunidade biológica e proximidade para atividades econômicas e de lazer (Miranda *et al.* 2002). No Brasil desde seu descobrimento os estuários são utilizados para locomoção, importação e exportação de produtos, parte da população ainda depende de sua fauna para alimentação e fonte de renda, diante deste tráfego historicamente conturbado é natural que a presença antrópica comece a causar alterações na região.

Dentro deste contexto, está o estuário do Rio Pará que se localiza na Zona Costeira Amazônica entre a região ocidental influenciada direta mente pelo Rio Amazonas e a oriental com a maior linha contínua de manguezais do mundo (Domingues 2008, Souza Filho *et al.* 2005). A descarga líquida que atinge a região estuarina do rio Pará pode ser dividida em dois períodos, um de alta descarga entre os meses de Janeiro e junho e um período de baixa descarga entre os meses de julho e dezembro (Rosário 2016). Este ambiente é extenso sendo um lugar apropriado para que ocorra amplificações significativas das componentes semi-diurnas da maré (M2, S2 e N2) sendo estas responsáveis por 85% da variação do nível d'água (Beardsley *et al.* 1995).

Diversos profissionais de diferentes áreas tentaram definir o ambiente estuarino, entre as diversas definições Dionne (1963) dividiu o estuário em três setores (estuário inferior, médio e superior) sendo que este representaria uma reentrância do mar que atinge o vale de um rio até o limite de influência da onda de maré. Assim como Fairbridge (1980) também dividiu o estuário em três setores (baixo, médio e alto estuário), já Elliot & McLusky (2002) sugerem que os cientistas deveriam se envolver no debate sobre a definição de estuários para fins legais e socioeconômicos. Esta diversidade de opiniões são a materialização da complexidade envolvendo este ambiente. Tais particularidades tornam pesquisas em campo extremamente custosas porem necessárias para o entendimento desta região de alta importância científica e econômica diante dos diversos interesses que norteiam esta região. Os esforços para o entendimento do estuário do Rio Pará iniciaram com o trabalho de Barthem & Schwassmann (1994) ao estudarem a intrusão salina no estuário. Atualmente, diversos trabalhos vêm sendo realizados mais voltados para a

questão hidrodinâmica, dentre eles pode-se destacar, Souza (2006), Borba (2014a), Borba (2014b), Prestes (2016) e Rosário *et al.* (2016).

Este trabalho se utiliza da modelagem computacional utilizando o programa *Delft 3D* para a criação de um modelo bidimensional utilizando dados batimétricos, hidrodinâmicos e a função *drogues* do módulo *Delft 3Dflow*. Dois cenários de diferente descarga fluvial foram criados para estudar o efeito da variação da descarga fluvial e maré no movimento de partículas em suspensão no estuário do Rio Pará, no intuito de contribuir para o entendimento e preservação desta importante região. Sendo o primeiro de baixa descarga fluvial(outubro a novembro 2014) e o segundo de alta descarga fluvial(junho a julho de 2015).

2 JUSTIFICATIVA

No estuário do Rio Pará há intenso tráfego de embarcações e atividade portuária onde destacam-se o porto de Vila do Condado município de Barcarena (onde ao seu redor se instalou um complexo industrial liderado pelas empresas Albras/Alunorte, processadoras de bauxita, alumina e alumínio), Porto de Belém na capital do Estado, o terminal petroquímico de Miramar também em Belém, Portos das empresas Imerys Rio Capim Caulim S/A (IRCC), Pará Pigmentos (PPAS) e Companhia Docas do Pará Vila do Conde, onde se realizam as importações e exportações de cargas e movimentação de óleo combustível (Rodrigues 2008). Sendo portanto uma área de alto interesse econômico para o Estado do Pará.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) a região de Barcarena (PA) possui bacias e barragens com categoria de risco e dano potencial associado considerados altos devido atividades associadas com óleo combustível e barragens de rejeito de minério caracterizando um fator de risco ao ambiente natural e as unidades de conservação presentes na área como: Área de Proteção Ambiental (APA) do arquipélago do Marajó; Reserva Extrativista (Resex) de Soure; Parque Ecológico (PEC) da ilha do Mosqueiro; APA da ilha do Cumbú; APA de Cotijuba (RCA 2001) e Resex Marinha Mocapajuba (Rodrigues 2018).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ESTUÁRIO

Muitos autores de diferentes áreas do conhecimento já tentaram definir este complexo ambiente, ainda há dificuldade em elaborar um conceito suficientemente amplo capaz de abranger todos os corpos definidos como estuários (Elliott & McLusky 2002), para Prichard (1955) o estuário é um corpo d'água costeiro semifechado com livre ligação com o oceano aberto e, em seu interior, a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce de origem continental. Já Kjerfve (1987) divide o estuário em Zona de Maré do Rio (ZR) com salinidade praticamente zero e movimentos unidirecionais no sentido estuário acima e abaixo durante as marés enchente e vazante respectivamente, Zona de Mistura (ZM) que possui uma acentuada variação longitudinal e vertical de salinidade (devido a diluição da maré pela descarga fluvial) e Zona Costeira (ZC) envolvendo todos os segmentos do sistema estuarino. A zona costeira é portanto uma parte do sistema estuarino e em situações de grande descarga fluvial pode apresentar estratificação de salinidade semelhante a ZM, a extensão horizontal da influência da descarga fluvial, denominada por Galvine & Monk(1974) de pluma estuarina depende da intensidade do fluxo de água doce e da circulação da região costeira, a ZC portanto não pode ser tratada separadamente no estudo oceanográfico e ecológico(Miranda, et al . 2002), neste estudo foi utilizada a definição de Kjerve.

A bacia de drenagem é a origem do sistema de rios que suprirá o estuário de água fluvial, sedimentos, substâncias orgânicas e inorgânicas e eventualmente poluentes. A quantidade de água recebida pela bacia de drenagem depende das condições climáticas, da cobertura vegetal, da ocupação urbana, agrícola e industrial e da evapotranspiração da região de captação e da interação com outros fatores (Coleman & Wright 1971). O vento é uma forçante que promove a aeração e mistura das massas de água estuarina e costeira gerando ondas e correntes nos estuários com grande área superficial, intensificando a mistura vertical. A descarga fluvial e os gradientes longitudinais de salinidade (densidade) gerados pela diluição da água do mar são fundamentais para a dinâmica do estuário e para os processos de transporte e mistura que ocorrem em seu interior. A forçante produzida pela maré astronômica é dominante para gerar movimentos e mistura nos estuários, envolvendo intensos processos advectivo e difusivo espacialmente e

condicionados pela geometria sendo necessária a distinção entre maré e oscilação da maré. O fenômeno da maré é gerada pela atração gravitacional da lua e do sol, associadas a aceleração centrípeta, agindo diretamente sobre as grandes massas d'água das bacias oceânicas. A ação desse fenômeno sobre sistemas com dimensão de um estuário é praticamente desprezível, entretanto a maré gerada globalmente pelas forças astronômicas em regiões oceânicas e que se propaga pela plataforma continental na forma de onda de diversos tipos, é uma das principais forças geradoras dos movimentos e dos processos de mistura nos estuários (Miranda *et al.* 2002.). A ação da maré no estuário, com o mesmo período da maré oceânica é denominada de cooscilação da maré (Defante 1960).

A modelagem computacional já é utilizada neste ambiente (Borba 2014, Molinas *et al.* 2014) sendo uma importante ferramenta devido diminuição de custos de trabalhos de campo. Do ponto de vista da oceanografia física, podem-se caracterizar no estuário do Rio Pará duas principais forças: a descarga fluvial e a propagação de marés. A descarga fluvial do Rio Pará mostrada na figura 3 é predominantemente governada por períodos chuvosos e de seca na região amazônica e a água doce é proveniente de diversos tributários, sendo no Estreito de Breves, transportados cerca de 5% da descarga média da desembocadura do Rio Amazonas para o Rio Pará (Callede *et al.* 2010).

A circulação estuarina é induzida pela descarga fluvial (água doce) adicionada à bacia e cria um gradiente de salinidade horizontal onde normalmente, a salinidade diminui do oceano em direção à cabeça do estuário devido à entrada de água doce, sendo este gradiente de salinidade a principal variável dinâmica que torna os estuários diferentes qualquer outro ambiente marinho ou lacustre, o gradiente de salinidade horizontal é o principal força motriz da circulação estuarina, que por sua vez desempenha um papel fundamental manutenção da estratificação da salinidade nos estuários com variações ocorrendo com a descarga fluvial de modo que a variação quinzenal da amplitude das marés, mudanças no fluxo do rio e o vento são as principais contribuintes para a variabilidade temporal na dinâmica dos estuários, com a mesma ressalva de que podem ocorrer no momento escala mais rápida ou mais lenta que o tempo de resposta do estuário, e sua influência sobre o regime estuarino dependerá das escalas de tempo relativas (Levinson 2010).

A intensa descarga fluvial dos estuários tropicais da zona costeira amazônica, a propagação da onda de maré, o fluxo da corrente norte do Brasil sobre a plataforma central

amazônica e a quebra de plataforma, são influenciadas pela ação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e as variações sazonais dos ventos alísios de nordeste e sudeste (Prestes, 2016).

A elevada descarga fluvial do Rio Pará flui em superfície em direção ao Oceano Atlântico e o aporte marinho de água salina flui em camadas profundas estuário acima. Este movimento é conhecido como circulação estuarina clássica (Cameron & Pritchard 1963, Hansen & Rattray 1966, Pritchard 1955, 1956).

3.2 Hidrodinâmica MÓDULO *Delft 3D flow*:

Este módulo pode ser aplicado a qualquer tipo de condições de mar aberto, como rios, oceanos, prateleiras costeiras e lagos (Breemen, M. T. J. 2008). O *Delft3D FLOW* resolve as equações de continuidade, as equações de Navier Stokes para um fluido incompressível, conjunto de equações parciais diferenciais em combinação com um conjunto de valores de condições iniciais e condições de contorno em uma grade de diferenças finitas com equações formuladas em coordenadas horizontais curvilíneas ortogonais garantindo maior precisão (Deltares 2011).

Equações do Momentum na direção horizontal

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\omega}{(d + \zeta)} \frac{\delta u}{\delta \sigma} - f v = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\delta}{\delta \sigma} \left(v v \frac{\delta u}{\delta \sigma} \right)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\omega}{(d + \zeta)} \frac{\delta v}{\delta \sigma} - f u = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\delta}{\delta \sigma} \left(v v \frac{\delta v}{\delta \sigma} \right)$$

Equações da continuidade:

$$\frac{\delta \zeta}{\delta t} + \frac{\delta[(d + \zeta)U]}{\delta x} + \frac{\delta[(d + \zeta)V]}{\delta y} = 0$$

$$\frac{\delta \omega}{\delta t} = -\frac{\delta \zeta}{\delta t} - \frac{\delta[(d + \zeta)u]}{\delta x} - \frac{\delta[(d + \zeta)v]}{\delta y}$$

Termo de pressão

$$\frac{1}{\rho_0} p_x = g \frac{\delta \zeta}{\delta x} + g \frac{\delta + \zeta}{\rho_0} \int_a^0 \left(\frac{\delta \rho}{\delta x} + \frac{\delta \sigma'}{\delta x} \frac{\delta \rho}{\delta \sigma'} \right) \delta \sigma'$$

$$\frac{1}{\rho_0} p_y = g \frac{\delta \zeta}{\delta y} + g \frac{\delta + \zeta}{\rho_0} \int_a^0 \left(\frac{\delta \rho}{\delta y} + \frac{\delta \sigma'}{\delta y} \frac{\delta \rho}{\delta \sigma'} \right) \delta \sigma'$$

3.3 MARE:

A maré é o resultado das forças de tração do sol e da lua em combinação com a rotação da terra. Isso gera ondas longas que se propagam através de todos os oceanos e águas costeiras rasas. Essas ondas causam a subida e queda rítmica do nível do mar ao longo de um período de meio dia ou um dia (Wright 1999). Uma série temporal de níveis de água oscilante podem ser analisados e convertidos em componentes harmônicas. Essas frequências associadas a componentes de movimento do sistema sol, lua e terra, cerca de 390 constituintes harmônicas foram identificadas, embora na maioria dos casos apenas algumas constituintes dominem a oscilação do nível da água. Os quatro constituintes principais são M2, S2, K1 e O1 (Breemen 2008). Sendo a principal lunar semidiurna (M2), principal solar semidiurna (S2) e lunar eclíptica semidiurna (N2) as principais componentes harmônicas na região em relação a maré (Beardsley et al. 1995). Entretanto, a propagação da componente lunar de águas rasas (M4) associada à M2 causa um considerável impacto na simetria da maré no estuário (Prestes et al. 2016). A força produzida pela maré astronômica no ambiente estuarino é dominante para gerar movimentos e mistura nos estuários, envolvendo intensos processos advectivo e difusivo espacialmente e condicionados pela geometria sendo necessária a distinção entre maré e oscilação da maré. O fenômeno da maré é gerada pela atração gravitacional da lua e do sol, associadas a aceleração centrípeta, agindo diretamente sobre as grandes massas d'água das bacias oceânicas (LEVINSON, 2010). A ação desse fenômeno sobre sistemas com dimensão de um estuário é praticamente desprezível, entretanto a maré gerada globalmente pelas forças astronômicas em regiões oceânicas e que se propaga pela plataforma continental na forma de onda de diversos tipos, é uma das principais forças geradoras dos movimentos e dos processos de mistura nos estuários (MIRANDA, et al 2002). A ação da maré no estuário, com o mesmo período da maré oceânica é denominada de cooscilação da maré (Defante, 1960).

No estuário do Rio Pará a componente semidiurna lunar (M2) é a mais significativa e

prevalente na plataforma central amazônica , representando mais que 40% de toda a energia da onda de maré também no estuário do rio Pará, a M2 também é a principal forçante, porém com influências de não-linearidades no alto estuário, gerando componentes de maré de águas rasas importantes na hidrodinâmica local e juntamente com distorção da onda de maré verificadas no estuário bem como a geração de assimetrias positivas a cooscilação da maré dinâmica produz fluxos bidirecionais nos estágios de enchente e vazante em toda a extensão do Rio Pará(Prestes, 2016). A força gerada pela maré é a principal fonte de mistura turbulenta em estuários (Dyer,1997; Miranda et al., 2002).

5 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo encontra-se na Costa Norte Brasileira no estado do Pará e contempla parte da plataforma continental e o estuário do Rio Pará, o Rio Pará se inicia na Baía das Bocas e segue até o Oceano Atlântico bordejando o sul e o leste da ilha do Marajó (Figura 1). Na sua porção intermediária encontra com o Rio Tocantins e mais adiante com sistemas menores como os Rios Guamá e Capim, formando assim o estuário do Rio Pará (Rosário et al., 2016) portanto fazendo parte da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia (Porto & Porto 2008) que cobre cerca de 10,8% do território brasileiro, possuem uma área de mais de 960.000 quilômetros quadrados e abrange os territórios dos estados de Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal, considerada como a principal fonte de água doce para o estuário do Rio Pará. (ANTAQ, UFSC, LabTrans, 2013), Há conexão entre as bacias do Rio Amazonas e Tocantins através do Estreito de Breves porém a contribuição entre ambas continua uma incógnita. O estuário do Rio Pará tem vazão média de $13000\text{m}^3/\text{s}$ (Souza, 2006) é uma zona de macro maré semi-diurna possui uma descarga líquida uma ordem de grandeza menor que o estuário do rio Amazonas, ou seja, $104\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ aproximadamente com mais de 300 km de extensão longitudinal e com cerca de 50-40 km de distância entre suas margens na desembocadura (Prestes et al., 2014).

O estuário do rio Pará encontra-se em uma área de alto interesse econômico com a presença de atividades como a extração de minérios e intensa atividade portuária como parte de sua herança histórica, tendo sido transportadas cerca de 18 milhões de toneladas de mercadoria nos portos situados no estuário do Rio Pará (CDP 2018).

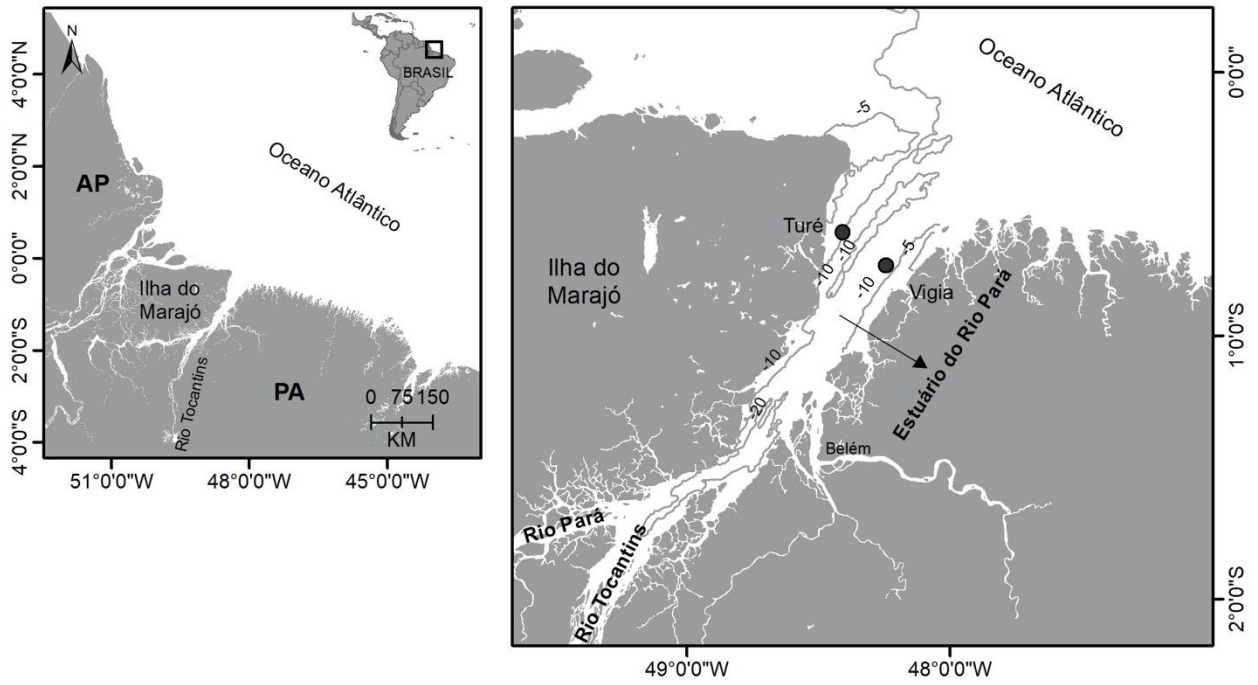


Figura 1- Localização da área de estudo e dos pontos de controle sendo um próximo a cidade de Vigia e na região conhecida como Turé à leste da ilha do Marajó.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado o software *Delft 3D*(open source) para a simulação hidrodinâmica no Rio Pará devido o seu sistema de livre licença para estudantes, sendo realizadas duas simulações. A primeira em 1 período de baixa descarga fluvial ($2200 \text{ m}^3/\text{s}$; 01 de outubro a 01 novembro de 2014) e a segunda para um período de alta descarga conhecida ($12200 \text{ m}^3/\text{s}$; 01 de junho a 01 de julho de 2015) de acordo com os dados da agência nacional da águas (ANA, figura 3).

A calibração do modelo foi realizada através da comparação dos resultados obtidos através da modelagem com os dados in situ de Rosário, R.P. (2016) de onde foram retirados seus pontos de amostragem utilizando o software Qgis sendo o primeiro próximo à cidade de Vigia no estado do Pará e o segundo na região conhecida como Turé próxima a ilha do Marajó e usados como pontos de controle. A raiz do erro quadrático médio (RMSE), o coeficiente de correlação de Pearson e o coeficiente de determinação foram aplicados para determinar o desempenho do modelo ao ser comparado com dados reais.

Quatro derivadores virtuais foram lançados no domínio utilizando a função *drogues* do módulo *Delft 3D Flow* para simular o movimento de partículas em suspensão no fluido. O derivador 04 lançado às proximidades do fundeadouro de Mosqueiro à aproximadamente 85 Km da boca do estuário, o número 1(azul) à aproximadamente 50 Km da boca do estuário, o número 3(vermelho) à cerca de 13 Km do cabo Maguari (porção externa) e o número 2(verde) na porção externa central a boca do estuário(à 20Km da ilha dos Guarás). Após verificadas as incoerências a correção das componentes harmônicas modeladas foi realizada de acordo com R. Pawlowicz(2002) Utilizando o programa T_Tide Harmonic Analysis Toolbox.

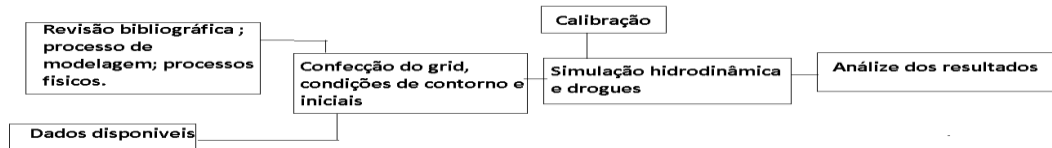


Figura 2- ordem de atividades seguidas

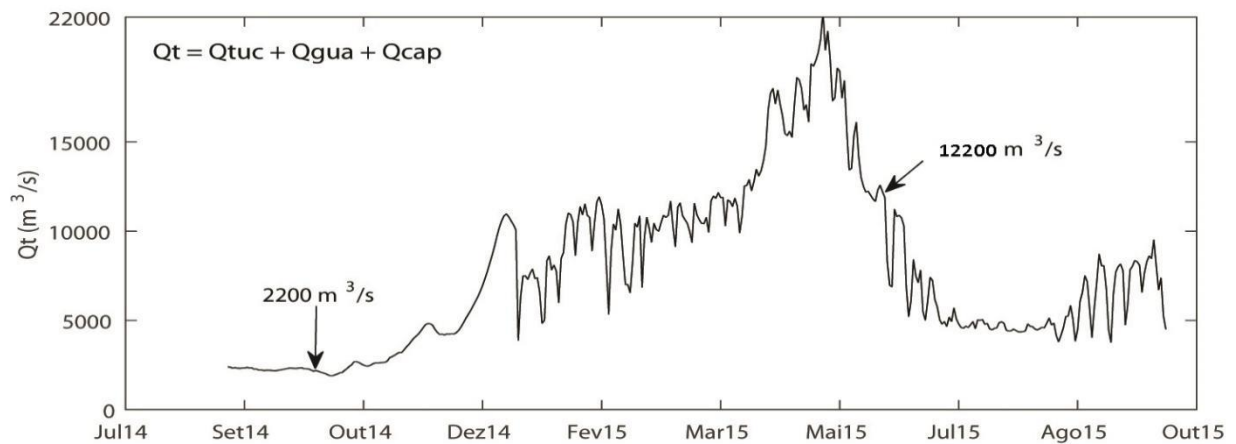


Figura 3- Descarga fluvial total (Q_t) estimada atuante no estuário do Rio Pará. Q_t é o somatório das descargas fluviais provenientes dos rios Tocantins (Q_{tuc}), Guamá (Q_{gua}) e Capim (Q_{cap}). Fonte: Dados provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA2018).

6.1 SETUP DO MODELO:

Toda a modelagem neste estudo foi feita utilizando o software Delft3D, através de vários módulos que são desenvolvidos para fins específicos. Neste estudo, as seguintes condições e módulos são usados.

6.1.1 T_TIDE

Um programa capaz de analisar uma série temporal de níveis de água e convertê-los em constituintes harmônicos. Para esta análise, o programa possui 234 constituintes disponível internamente. O programa também é capaz de prever os níveis de água quando as marés constituintes são conhecidas.

6.1.2 DELFT DASHBOARD:

Um programa também gratuito que permite utilizar o programa open earth tools de forma mais intuitiva sem a necessidade do programa MATLAB. Pertence a empresa DELTARES responsável pelo *Delft 3D* sendo ambos utilizados em conjunto.

6.1.3RGFGRID

Modulo do programa *Delft 3D* utilizado para criar, modificar e visualizar a malha referente ao domínio (figura 4) para o módulo FLOW. o programa oferece ferramentas que podem otimizar as propriedades da grade. Para uma malha curvilíneaas propriedades mais importantes são a ortogonalidade e suavidade. Este foi o módulo utilizado em conjunto com o programa Delft dashboard para criar a malha referente a área de estudo.

6.1.4 QUICKIN

Módulo do programa *Delft 3D* utilizado para criar, modificar e visualizar uma batimetria para o módulo FLOW. quando uma grade é finalizada com RGFGRID, o próximo passo é implementar as profundidades no modelo, a batimetria confeccionada neste trabalho é mostrada na figura 5. O QUICKIN também pode ser usado para criar arquivos de variáveis importantes como salinidade e temperatura. Este foi o módulo utilizado para criar a batimetria e condições iniciais utilizadas nas simulações, sendo a batimetria obtida por meio das cartas 302, 303 e 304 da Marinha do Brasil, disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e dados da base de livre acesso General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO).

6.1.5 FLOW

O módulo Delft3D Flow é o componente principal do pacote de software Delft3D. Este módulo pode simular fluxos em 2 ou 3 dimensões utilizando as equações do momento e da continuidade. Este módulo é utilizado para condensar os arquivos gerados nos outros módulos em um único arquivo principal (.MDF), também possui a função *drogue* que lança uma partícula na área de simulação e nos permite observar seu comportamento terminadas as simulações, sendo nomeados da seguinte forma *drogue1*(azul), *drogue 2*(verde), *drogue 3*(vermelho),*drogue4* (marrom). Todos os arquivos e simulações feitas foram organizados de acordo com o manual (Deltares 2011).

6.1.6 QUICKPLOT

Um programa para visualizar e animar os resultados produzidos pelos módulos do Delft3D. O *quickplot* é uma ferramenta fácil de usar e flexível para visualizar rapidamente os resultados de uma simulação de fluxo.

6.2 MODELAGEM

Neste estudo foi criado um modelo bidimensional, ou seja, sem múltiplas massas de água com diferentes características de acordo com a profundidade, a malha utilizada possui 46222 elementos e abrange latitudinalmente uma região desde Barcarena até aproximadamente 50 Km de distância da costa e longitudinalmente, uma região entre Salinópolis e o Canal das Tartarugas, medidas mostradas na figura 4 baixo. Foram utilizadas 4 fronteiras abertas (figura 6) sendo 3 oceânicas e uma referente ao Rio Pará sendo esta ultima atribuída a variação na descarga fluvial . A condição inicial de diferença de salinidade mostrada na figura 7 foi utilizada para estimular a diferença de densidade e aproximar a simulação do ambiente estuarino.

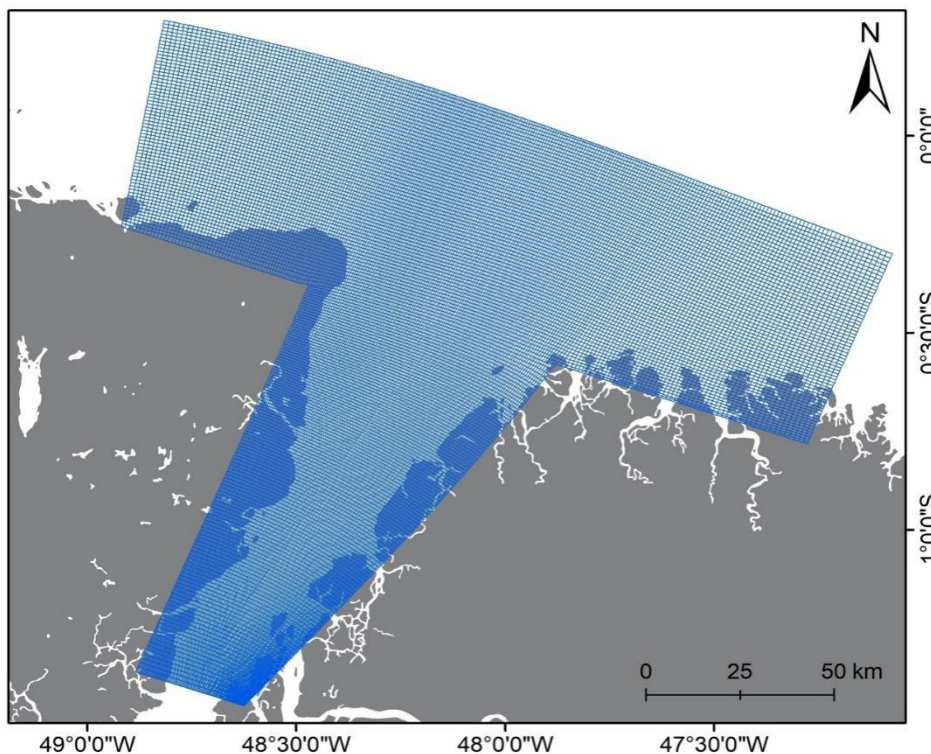


Figura 4- Malha referente ao domínio criada utilizando o módulo RFGRID do software Deft 3D.

Tabela 1-Propriedades da malha utilizada.

Propriedade	Valor
Comprimento mínimo	183 Km
Comprimento máximo	29,4 Km
Área oceânica	9939.43 Km ²
Área estuarina	4588.46 Km ²
Área continental	3607.47 Km ²
Área total	18135.36 Km ²
Ortogonalidade máxima	0.285

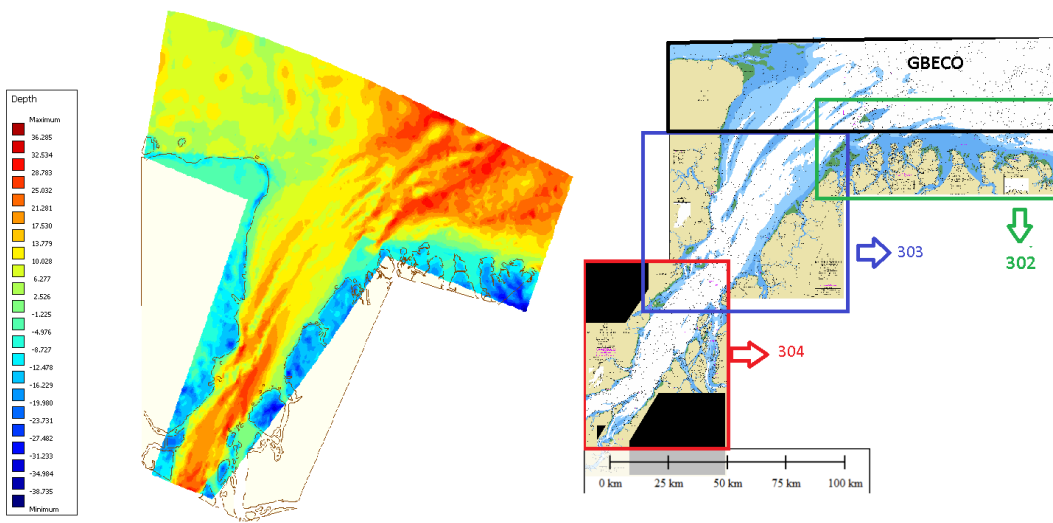


Figura 5-Batimetria (a esquerda) e cartas náuticas (DHN) referentes ao estuário do rio Pará e parte da plataforma continental, compondo, portanto, o domínio utilizado nas simulações.

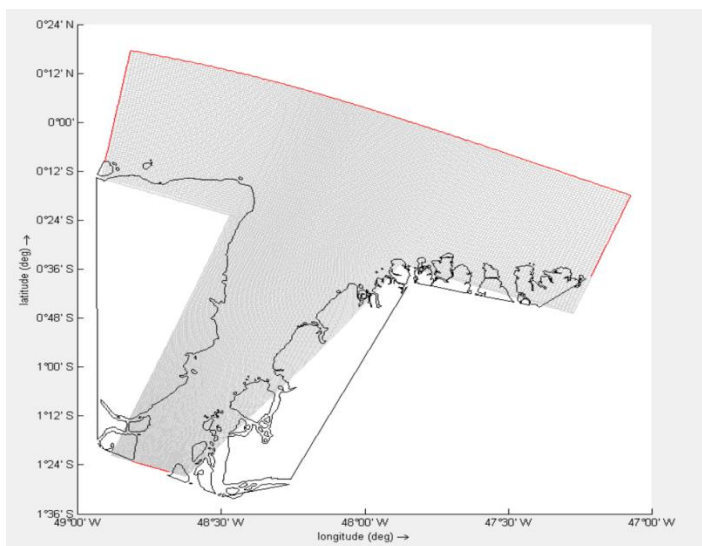


Figura 6- localização das fronteiras abertas(em vermelho) onde há o fluxo de fluido para dentro e fora do domínio.

Não foi considerado a influência do vento, altura da coluna d'água inicial foi 0. A salinidade foi utilizada para criação da condição inicial com características estuarinas com o encontro da massa de água oceânica com a massa de água fluvial de acordo com a figura abaixo.

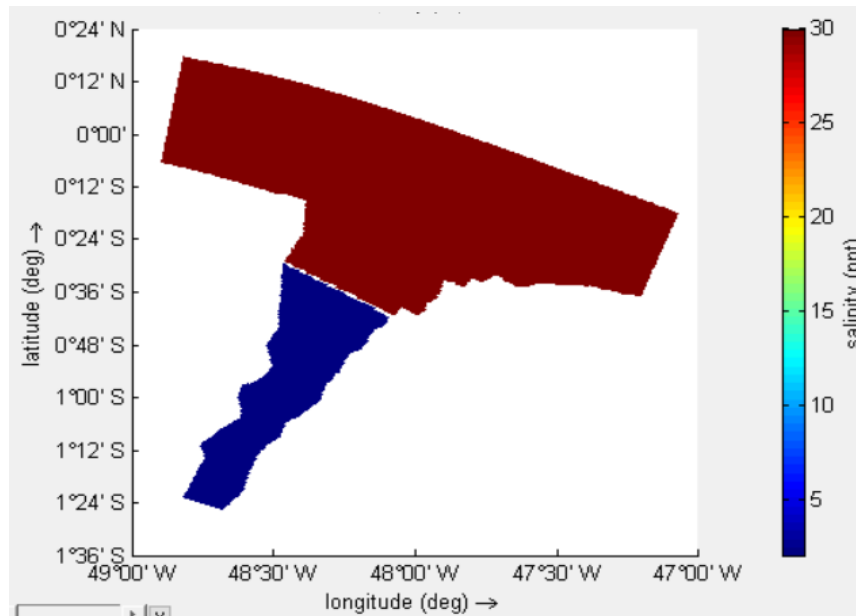


Figura 7-Condição inicial de salinidade utilizada como condição inicial das simulações.

Tabela 2- Parâmetros base das condições iniciais. O parâmetro nível(m) é o único a variar após o início das simulações.

Parâmetro	Valor
Nível(m)	0
Gravidade	9.82(m/s ²)
Densidade da água	1025(kg/m ³)
Temperatura	28°C

7 RESULTADOS E CALIBRAÇÃO

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o coeficiente de correlação de Pearson e o coeficiente de determinação foram aplicados para determinar o desempenho do modelo ao ser comparado com dados reais em ambos os períodos simulados. As figuras abaixo mostram as comparações entre dados reais e modelados a esquerda e gráfico de dispersão com linha de regressão linear a direita para as variáveis nível e componente U de velocidade para ambos períodos de diferente descarga fluvial nos pontos de controle.

Alta descarga fluvial:

Da comparação entre os dados de altura da coluna d'água e componente U de velocidade reais e modelados referentes ao ponto próximo a cidade de vigia(figura abaixo no) período de alta descarga fluvial (01junho a 01julho de 2015) foram obtidos respectivamente os seguintes resultados para altura de coluna d'água $\rho=0,5637$ $R^2=0,5032$ $RMSE=0,904$ já para componente U de velocidades $\rho=0,9584$ $R^2= 0,9462$ $RMSE=0,1441$.

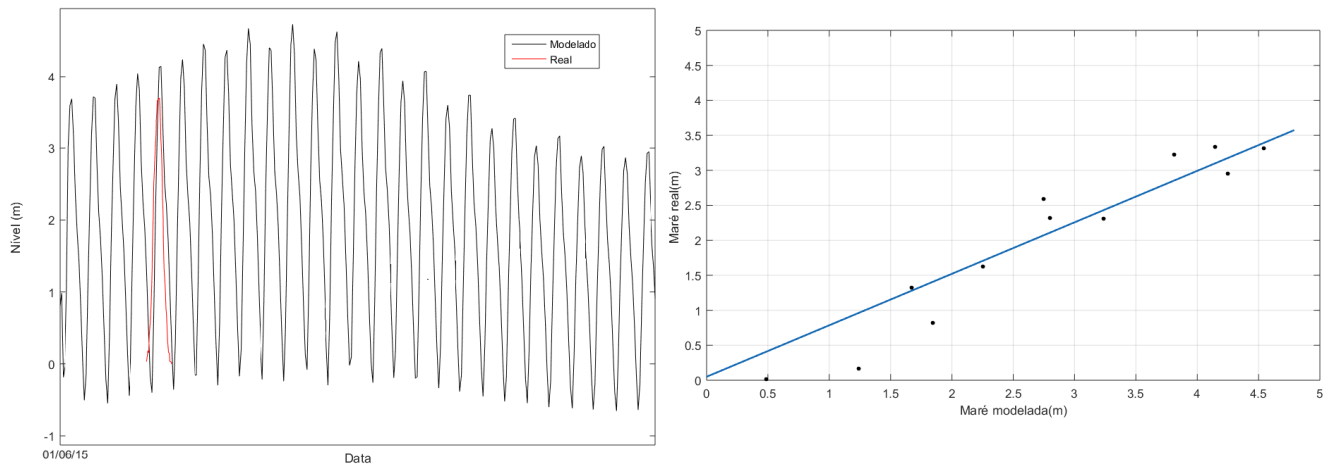


Figura 8-Comparação da altura da coluna d'água real e modelada(a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de vigia em um período de alta descarga fluvial.

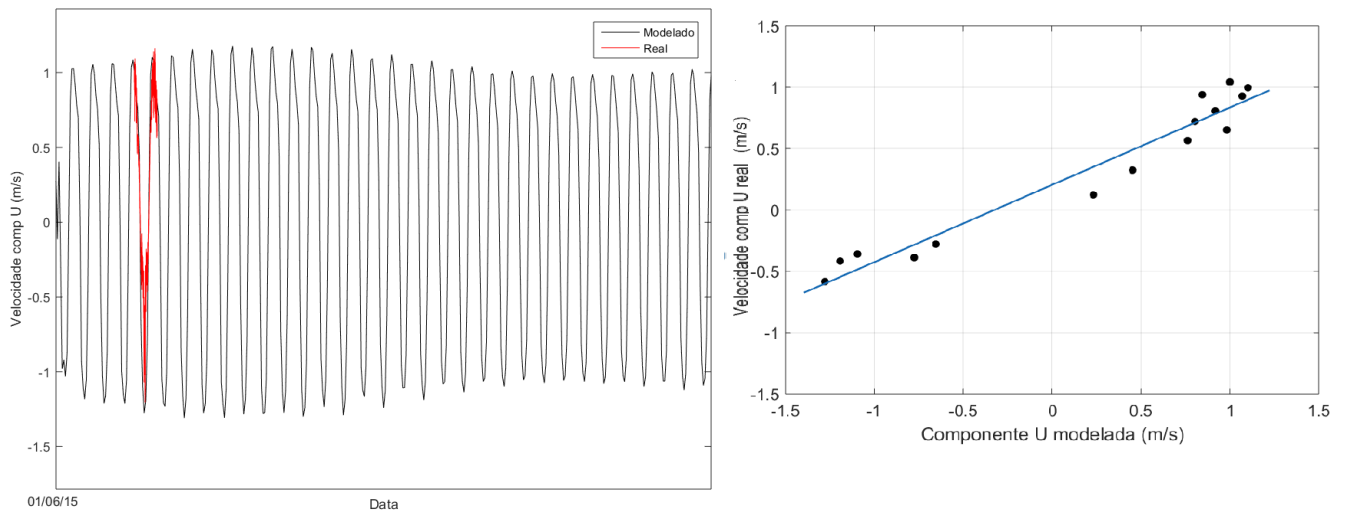


Figura 9-Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de Vigia.

Turé:

Ja comparação entre os dados de altura da coluna d’água e componente U de velocidade reais e modelados referentes ao ponto próximo a região conhecida como Turé(Abaixo) no período de alta descarga fluvial (01junho a 01julho de 2015) foram obtidos os seguintes resultados para altura de coluna d’água $\rho=0,873$ $R^2=0,8123$ $RMSE= 0,4411$ já para componente U de velocidade $\rho=0,4869$ $R^2=0,4737$ $RMSE=0,8612$.

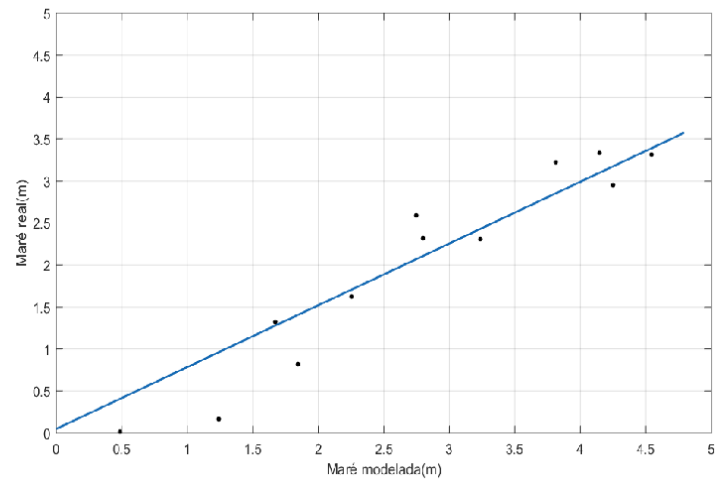
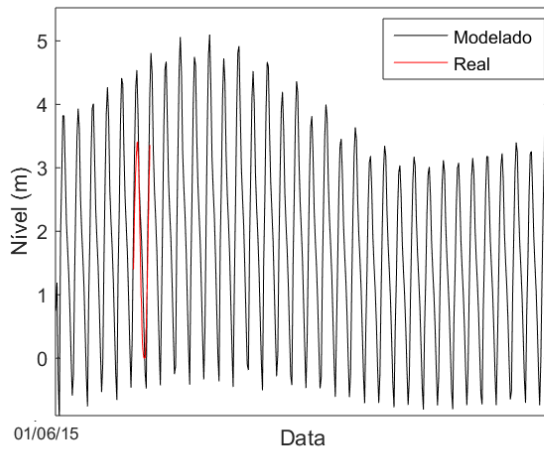


Figura 10-Comparação da altura da coluna d'água real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé em um período de alta descarga fluvial.

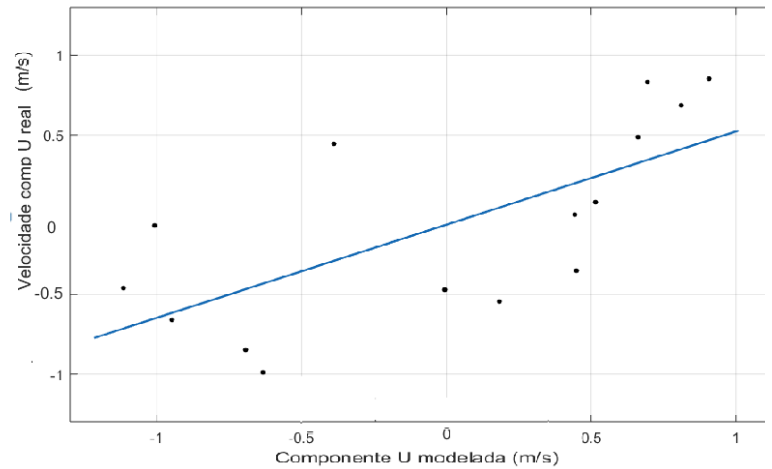
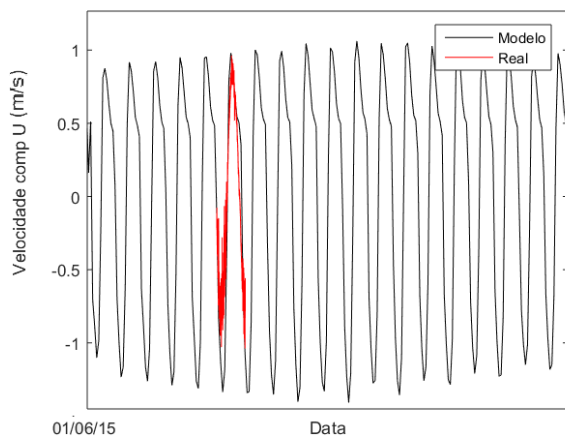


Figura 11-Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé em um período de alta descarga fluvial.

Baixa descarga fluvial:

Da comparação entre os dados de altura da coluna d'água e componente U de velocidade reais e modelados referentes ao ponto próximo a cidade de vigia (figuras abaixo) no período de baixa descarga fluvial (01 de outubro a 01 de novembro de 2014) foram obtidos respectivamente os seguintes resultados para altura de coluna d'água $\rho = 0,9765$ $r^2 = 0,9553$ $rmse = 0,252$ já para já para componente U de velocidade $\rho = 0,5365$ $R^2 = 0,6031$ $rmse = 0,852$.

Vigia:

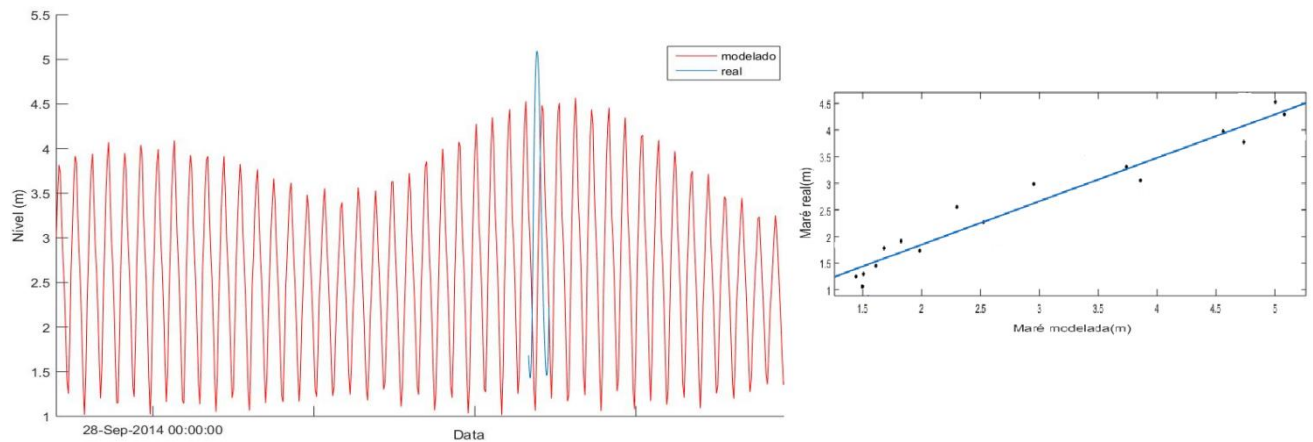


Figura 12-Comparação da altura da coluna d'água real e modelada(a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de vigia em um período de baixa descarga fluvial.

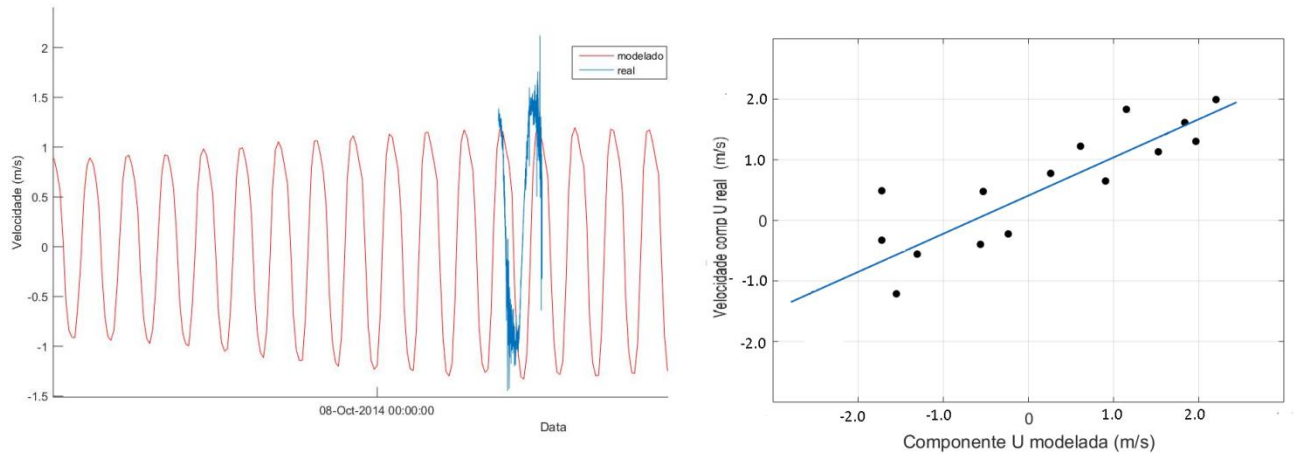


Figura 13- Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a cidade de vigia em um período de baixa descarga fluvial.

Turé:

Da comparação entre os dados de altura da coluna d’água e componente U de velocidade reais e modelados referentes ao ponto próximo a região conhecida como Turé no período de baixa descarga fluvial (01 de outubro a 01 de novembro de 2014) foram obtidos respectivamente os seguintes resultados para altura de coluna d’água $\rho = 0,8647$ $r^2 = 0,8106$ $RMSE = 0,4435$ em relação a componente U de velocidade $\rho = 0,6973$ $r^2 = 0,7386$ $RMSE = 0,6435$.

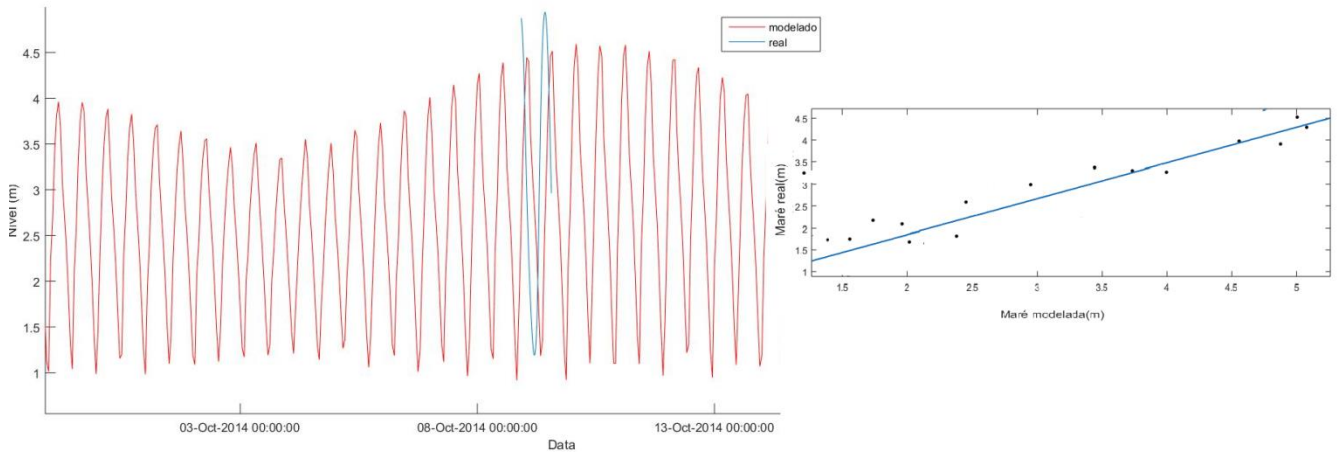


Figura 14- Comparação da altura da coluna d'água real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com maré modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé em um período de baixa descarga fluvial.

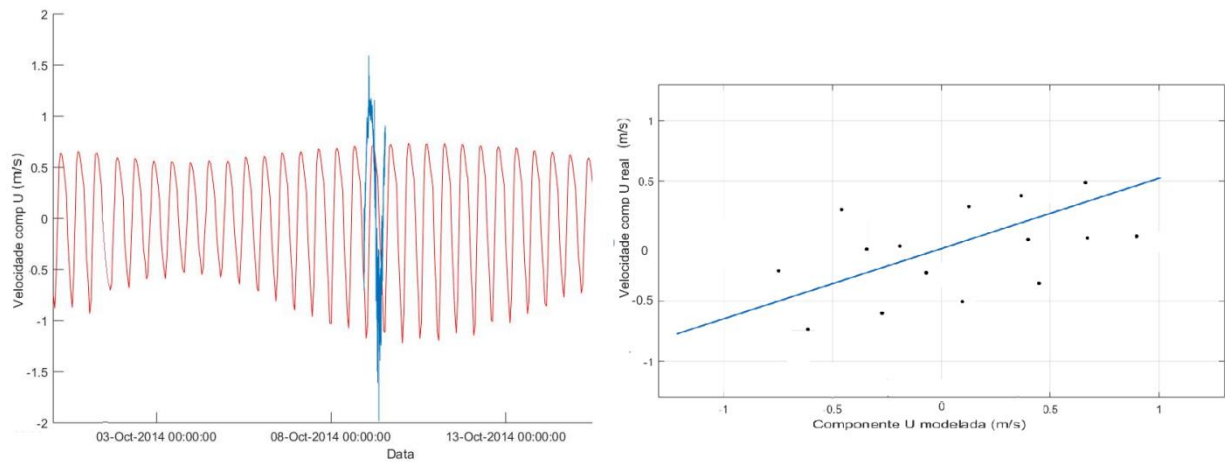


Figura 15-Comparação entre componente U de Velocidade (m/s) real e modelada (a esquerda) e gráfico de correlação com linha de regressão linear com Componente U de velocidade modelada no eixo x “e” real no eixo” y”(a direita) no ponto próximo a região conhecida como Turé.

7.1 RESULTADOS DROGUES

As figuras abaixo demonstram o comportamento dos drogues em ambos períodos simulados.

Baixa descarga Fluvial:

O drogue 1(azul) teve como ponto inicial latitude (lat)= $-0,75236040^\circ$ e longitude (long) = $-48,369972^\circ$ e como ponto final lat = $-0,11216024^\circ$ long = $-48,893337^\circ$, teve movimento inicial a norte chegando a aproximadamente 4 km da reserva extrativista Marinha de Soure, após atravessar a boca do estuário se deslocou à oeste paralelamente à costa norte do estado do Amazonas (aproximadamente 13 Km de distância) totalizando aproximadamente 129000 Km deslocamento.

O drogue 2(verde) teve como ponto inicial lat = $-0,35858649^\circ$ long = $-47,884716^\circ$ deixando o domínio das simulações pelo ponto lat = $0,12664461^\circ$ long = $-48,171803^\circ$ total viajado 62.451Km antes de deixa-lo.

O drogue 3 (vermelho) Teve como ponto inicial lat = $-0,23410311^\circ$ long = $-48,255480^\circ$ e final lat= $-0,11216024^\circ$ long= $48,893337^\circ$ seguindo à oeste paralelamente a costa do estado do Amazonas viajando cerca de 82 Km.

O drogue 4(Marrom) teve como ponto inicial lat = $-1,0521367^\circ$ long = $-48,497002^\circ$ e final lat = $-0,78284609^\circ$ long = $48,425865^\circ$ e totalizando aproximadamente 31Km de deslocamento mantendo-se na região interior do estuário.

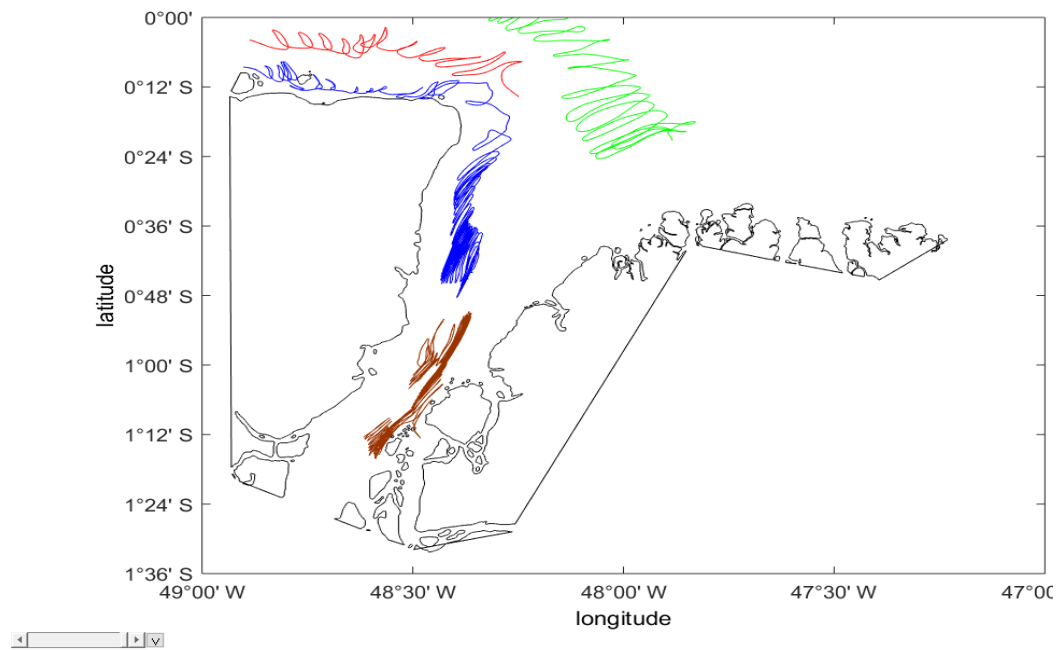


Figura 16: Drogas lançados no domínio com o início das simulações referentes a baixa descarga fluvial sendo simulando partículas em suspensão no fluido. Observar-se a tendência de movimento a oeste.

Alta descarga fluvial:

Sob a nova condição de descarga fluvial O drogue número 1(azul) e 3 (vermelho) manteve-se com a mesma trajetória que a primeira simulação.

O drogue 2 (verde) teve como novo ponto final e lat= $-0,58722943^\circ$ e long= $-47,198753^\circ$ à cerca de 18 Km a nordeste da cidade de Salinópolis no estado do Pará, portanto manifestando uma tendência de deslocamento a oeste Viajado aproximadamente 80 Km.

O drogue 4(Marrom) teve como novo ponto final lat= $-0,46528652^\circ$ long = $-47,991421^\circ$ a cerca de 30 Km da reserva extrativista de Mãe Grande de Curuçá viajando aproximadamente 86 Km.

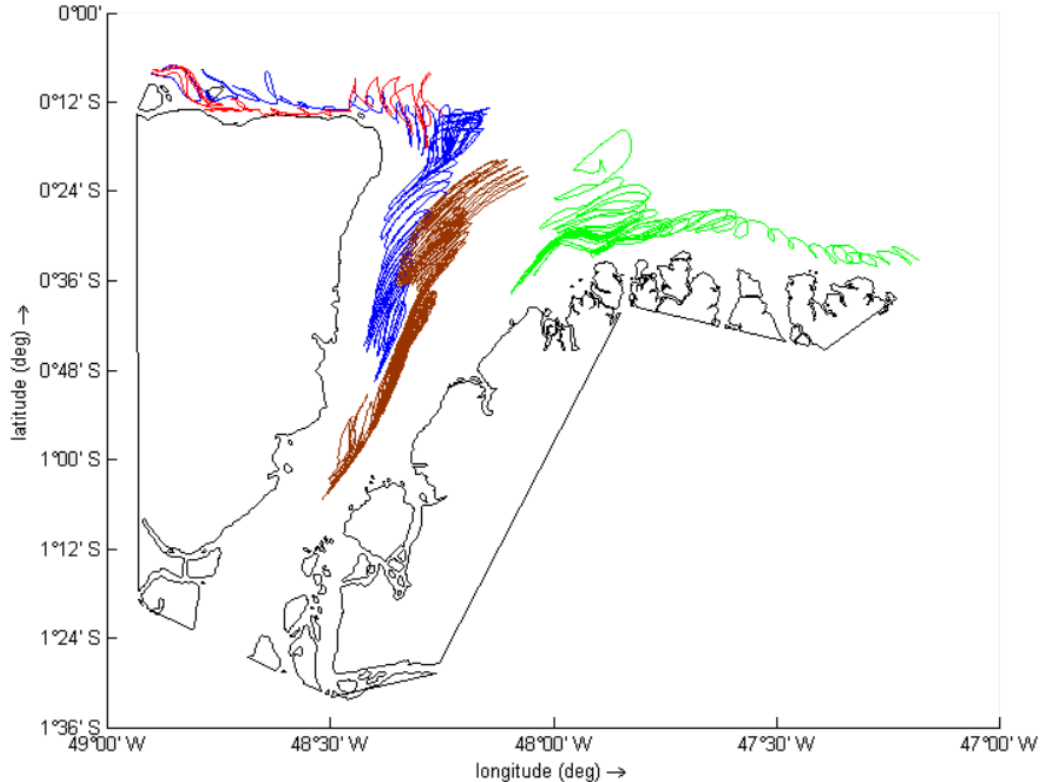


Figura 17 Drogues lançados no domínio com o início das simulações referentes a alta descarga fluvial sendo simulando partículas em suspensão no fluido. Observar-se mudança na tendência de movimento de algumas das partículas.

8 DISCUSSÕES

Em todas comparações observa-se uma defasagem de cerca de 40 minutos entre os dados reais e modelado uma provável consequência deu de variáveis desconsideradas como o vento e tributários secundários.

Em relação aos resultados das simulações de alta descarga fluvial os dados de nível modelados são super estimados em cerca de 1 metro na preamar e em 0,5 metros na baixa mar em ambos os pontos de controle já os dados nível referentes a baixa descarga fluvial mostram resultados subestimados em cerca de 0,5 metros na preamar já na baixa mar apenas o ponto de controle próximo a cidade de vigia apresenta resultados super estimados em cerca de meio metro. A correlação a de Pearson para esta variável mostra variações de aproximadamente 0,5 a 0,8 para alta descarga fluvial e 0,8 a 0,9 para baixa descarga fluvial.

Os dados referentes a componente U de velocidade no período de alta descarga fluvial apresentaram resultados super estimados em aproximadamente 0,5 metros por segundo, já na simulação referente a baixa descarga fluvial com relação ao ponto de controle próximo a cidade de vigia há uma super estimação de 1 metro por segundo durante a vazante, já no ponto de controle da região de Turé dados reais foram subestimados em 1 metro por segundo tanto na enchente quanto na vazante. A correlação de Pearson para esta variável mostra uma variação de aproximadamente 0,4 a 0,9 em período de alta descarga fluvial e de 0,5 a 0,7 para o período de baixa descarga fluvial. Os resultados da simulação de baixa descarga fluvial mostram menor variação e maior confiabilidade quando comparados aos de alta descarga fluvial, uma provável consequência do aumento de cerca de 6 vezes na descarga pode ter tido grande influência neste resultado.

As partículas(drogues) no período de baixa descarga fluvial apresentaram uma tendência de deslocamento para o noroeste o que indica a predominância da forçante oceânica em detrimento da fluvial. No caso de possíveis poluentes em suspensão neste cenário possuem maior tendência a se movimentar e possivelmente depositar ao longo da costa do estado do Amapá.

Sob influência da baixa descarga fluvial o drogue 2 (verde) localizado inicialmente na porção externa central a boca do estuário(à 20Km da ilha dos Guarás), tendeu a noroeste

deixando o domínio, já no período de alta descarga fluvial foi levado em direção da costa do estado do Pará à margem direita do estuário do rio Pará com movimentos circulares por algum período. A margem esquerda do estuário tem maior extensão latitudinal que a margem direita, o que faz com que o fluido perca o “Afunilamento” causado pelo interior do margens do ambiente estuarino após o início das simulações primeiramente nesta região, concentrando movimentos nessa região levando aos movimentos apresentados, esta tendência a direita em período de alta descarga fluvial está de acordo com Mascarenhas A.C.C(2019) onde é mostrado uma tendência a direita da dispersão da pluma do rio Pará em período de alta descarga fluvial.

O drogue 1(azul) localizado inicialmente à 50 Km da boca do estuário e 3 (vermelho) à cerca de 13 Km do cabo Maguari (porção externa) se mantiveram com movimento a esquerda do estuário uma provável consequência de suas respectivas posições iniciais levando a uma maior facilidade de deixar Rio Pará. O drogue 4(marrom) foi levado mais próximo do ambiente marinho na durante o período de alta descarga fluvial demonstrando a influência desta forçante na movimentação das partículas em suspensão neste período.

Em períodos de alta descarga fluvial os movimentos circulares dos derivadores virtuais, uma provável consequência da interação entre maré, batimetria e movimentos advecção causados pela diferença de densidade entre as massas d’água, abrangem uma área maior em comparação com os períodos de baixa descarga fluvial possivelmente devido ao aumento de quase 6 vezes na descarga fluvial causando ligeiras mudanças na distância percorrido durante as oscilações de maré.

8.1 LIMITAÇÕES DO MODELO

As diferenças entre dados modelados e reais podem ser prováveis consequenciais de variáveis não consideradas como o vento, de outras consideradas uniformes para todo o domínio como a rugosidade ou também uma consequência de a ortogonalidade máxima da malha utilizada ser 0.1 maiores do que o recomendado.

Este modelo simulou apenas 4 partículas isoladas umas das outras inviabilizando a análise de

grandes massas de partículas como a dispersão de pluma do Rio Pará sendo, portanto, limitado a análise de elementos que se comportem como partículas isoladas quando em suspensão no ambiente estuarino como por exemplo, poluentes.

8.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS:

Diante da complexidade do estuário do Rio Pará a modelagem computacional é uma ferramenta de baixo custo para a análise deste tipo de ambiente, obtendo sucesso na simulação do movimento de partículas em suspensão com resultados condizentes com outros estudos e fornecendo resultados hidrodinâmicos aceitáveis mesmo com as diversas ressalvas feitas. Para resultados mais confiáveis faz-se necessária a implementação de séries temporais de dados de vento e series temporais de vazão mais longas e novas análises das componentes harmônicas de maré.

Simulando apenas variação na descarga fluvial e analisando somente variação de nível, velocidade de corrente e apenas 4 derivadores virtuais em uma simulação sem a influencia do vento foi possível observar diferença visível no comportamento do ambiente estuarino.

Em ambos períodos simulados as partículas em suspensão estiveram nas proximidades de ilhas como a Ilha dos Guarás, áreas urbanas como a cidade de Salinópolis e áreas de reservas como a de Mãe Grande de Curuçá. Este comportamento levanta a possibilidade de materiais poluentes não produzidos nestas áreas atingirem as mesmas devido a dinâmica do ambiente.

REFERÊNCIAS:

- Agência Nacional de Águas (ANA). 2018. *Rede hidrometeorológica nacional*. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/mapa_hidroweb.jsf. Acesso em: 10/10/2019
- Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ; Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. LabTrans. 2013. *Relatório técnico Bacia do TocantinsAraguaia. Plano Nacional de Integração Hidroviária*. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH/RTBaciaTocantinsAraguaia.pdf>. Acesso em: 12/10/2019
- Beardsley R. C., Candela J., Limeburner R., Geyer W. R., Lentz S. J., Castro B. M., Cacchione D., Carneiro N. 1995. The M2 tide on the Amazon shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **100**(C2): 2283-2319.
- Borba T. A. 2014. *Modelagem hidrodinâmica aplicada ao estuário amazônico: uma abordagem em malha flexível*. MScThesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 46p.
- Coleman J.M. & Wright L. D. 1971. *Analisis of major river sistems and theier deltas: XEMPLES. procedures and rationale, with two exemples*. Baton Rouge, Louisiana State University Press. 125p.
- Cameron W. M. & Pritchard D. W. 1963. Estuaries. In: Hill M. N. (ed.). *The sea*. New York, John Wiley & Sons, v. 2, p. 306–324.
- Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN. 2018. *Tábuas de maré*. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 04/09/2019
- Dominguez J.M.L. 2008. The Coastal Zone of Brazil. In: Dillenburg S. R. & Hesp P. A. (eds.). *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Berlin, Springer. (Lecture notes in Earth Sciences, 107).
- Elliott M. & McLusky D. S. 2002. The need for definitions in understanding estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **55**(6):815-827.
- General Bathymetric Chart of The Oceans. 2018. *Base de dados*. Disponível em: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/. Acesso: 06/06/2019
- Gabioux M.; Vinzon S., Paiva A. M. 2005. Tidal propagation over fluid mud layerson Amazon shelf. *Cont. Shelf Res.*, **25**:113–125.doi:10.1016/j.csr.2004.09.00.
- Hansen D.V. & Rattray JR. M. 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.*, (11): 319–326.

- Kjerfve B. 1987. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: Day Jr.; Hall, C.H.A.S.; Kemp, W.M.; Yáñez-Arancibia, A. (eds.). Estuarine Ecology. New York, Wiley, p. 47-78.
- Mascarenhas, A. C. C. 2019. *Influência do estuário do rio Pará sobre o setor leste da plataforma continental interna, norte do Brasil*. MS Dissertation, Universidade Federal do Pará, Belém, 70 p.
- Miranda A, L. B., Castro, B. M.; Kjerfve, B. Princípios de oceanografia física em estuários. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2002. 432 p.
- Prichard D. W. 1955. Estuarine circulation patterns. Proc. Amer. Sco. Civil Eng., 81:1-11.
- Porto M. F. & Porto R. L. L. 2008. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avançados*, 22(63):43-60.
- Prestes Y. O. 2013. *Transporte de volume na zona de maré do rio Pará, Brasil*. Monograph, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 77p.
- PRESTES, Y. O. (2016). *Interações Físicas entre o Estuário do rio Pará e a Plataforma Continental no Norte do Brasil* (Master'sthesis, Universidade Federal de Pernambuco).
- Pawlowicz R. , Beardsley B., Lentz S. 2002. "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE", *Computers and Geosciences*, 28 (8): 929-937.
- Rodrigues J. E. C. *Risco tecnológico: uma análise do porto de Vila do Conde como área potencial de ameaça ao vazamento de óleo para comunidades em situação de vulnerabilidade*. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Pará, Belém. 2008.
- Rosário R.P. *Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará*. PhD Thesis, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2016. 139 p.
- Souza R. R. D. *Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA)*. PhD Thesis, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 180p.
- Valle-Levinson A. (ed.).2010. *Contemporary issues in estuarine physics*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Wright J., Colling A., Park D. 1999. *Waves, tides and shallow-water pocesses*. Open University Course Team, Butterworth-Heinemann.