



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE OCEANOGRRAFIA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**YURI ONÇA PRESTES**

**TRANSPORTE DE VOLUME NA ZONA DE MARÉ DO RIO  
PARÁ, BRASIL.**

**BELÉM**

**2013**

**YURI ONÇA PRESTES**

**TRANSPORTE DE VOLUME NA ZONA DE MARÉ DO RIO  
PARÁ, BRASIL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Oceanografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Msc. Renan Peixoto

Coorientador: Dr. Marcelo Rollnic

**BELÉM**

**2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

P936t Prestes, Yuri Onça

Transporte de volume na zona de maré do rio Pará, Brasil /  
Yuri Onça Prestes – 2014

77 f. : il.

Orientador: Renan Peixoto Rosário

Coorientador: Marcelo Rollnic

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em  
Oceanografia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Geociências, Faculdade de Oceanografia, Belém, 2013.

1. Estuários – Rio Pará (PA). 2. Hidrodinâmica. 3. Transporte  
de volume. 4. ADCP. I. Rosário, Renan Peixoto, *orient.* II. Rollnic,  
Marcelo, *coorient.* III. Universidade Federal do Pará. IV. Título.

CDD 20ª ed.: 551.4618098115

---

## YURI ONÇA PRESTES

### TRANSPORTE DE VOLUME NA ZONA DE MARÉ DO RIO PARÁ, BRASIL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Oceanografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Msc. Renan Peixoto

Coorientador: Dr. Marcelo Rollnic

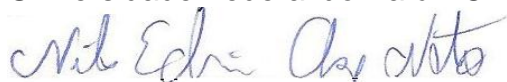
Data de defesa: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:



Msc. Renan Peixoto Rosário - Orientador  
Mestre em Oceanografia Física, Química e Geológica, IO-FURG  
Universidade Federal do Pará - CPGf/UFPA



Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto  
Doutor em Geologia Costeira, Universidade de Kiel, Alemanha  
Universidade Federal do Pará - UFPA – Campus Bragança



Msc. Inae de Brito Albuquerque Nascimento  
Mestre em Biologia Ambiental, UFPA – Campus Bragança  
Universidade Federal do Pará - UFPA

*“A mente que se abre a uma nova idéia,  
jamais voltará ao seu tamanho original”*

(Albert Einstein)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo o que sou e por todas as minhas conquistas. Pelas pessoas que me rodeiam e pela vida a cada dia.

Aos meus familiares, em especial meus pais, Inácio e Silvana, por todo o amor, educação, oportunidade e conselhos; aos meus irmãos Bernardo, Vinícius e Maricília; aos meus avós José, Raimunda, Antônio e Maria. Sei que posso contar com o apoio, torcida e carinho de todos vocês. Muito obrigado por tudo.

A minha companheira e melhor amiga por todo o amor, paciência, estímulo, conversas, apoio e carinho. Você faz parte de cada página do presente trabalho.

Ao Prof. Marcelo Rollnic por todas as oportunidades, conselhos e incentivo. A experiência como membro do Laboratório de Oceanografia Física da UFPA foi de fato um diferencial em minha formação. O LOF continuará crescendo sob o seu comando e dedicação.

Ao Geólogo Márcio Souza pelos dados fornecidos.

Aos meus colegas da turma de 2010 do curso de Graduação em Oceanografia, pela ótima companhia ao longo desses quatro anos. Muitos aprendizados, vivências, trabalhos de campo e risadas! Em especial meu grande amigo de curso e da vida Arthur Santos. Que consigas trilhar um caminho de muito sucesso e realizações, pois não mereces menos que isso. Obrigado, pessoal.

Ao Prof. Alessandro Bérghamo pelas conversas descontraídas, pela amizade, por toda a ajuda durante o curso (não foram poucas) e pelos conhecimentos compartilhados em Oceanografia Física, linguagem computacional e processamento de dados. Obrigado por tudo, professor.

Ao meu orientador e amigo Renan Rosário me ter me aturado em incansáveis dois anos de convivência em laboratório. Obrigado pela paciência e dedicação. Além de um ótimo pesquisador, conheci uma excelente pessoa. Se oriente, meu amigo.

A família LOF por esses quatro anos, Obrigado ao grande Maurício (valeu mesmo), Inaê, Gabi, Fabíola, Malandro, Thais, Carol, Lorena, Kevin, Leandro. Obrigado por tudo, pessoal.

## RESUMO

O estuário amazônico é composto basicamente pelos rios Tocantins e Amazonas, que apresentam uma rede de drenagem complexa e extensa, com intensos regimes de descargas fluviais. Parte da descarga do rio Amazonas por meio dos Estreitos de Breves, somada à descarga dos rios Tocantins, Acará, Moju, Capim e Guamá, formam o estuário do rio Pará, que possui seu curso terminal conhecido como baía do Marajó, em direção ao oceano adjacente. A área de estudo abrange os paralelos  $1,50^{\circ}$  S –  $1,60^{\circ}$  S e meridianos  $48,95^{\circ}$  W –  $48,85^{\circ}$ . O presente trabalho teve como objetivo relacionar os parâmetros hidrodinâmicos com o regime de transporte local, no que diz respeito à ação das correntes de maré e descarga fluvial. Para a aquisição de dados de corrente foi utilizado um perfilador ADCP, operando a 600 kHz e acoplado à embarcação, sendo realizadas seções transversais ao canal do rio, durante um ciclo de maré semidiurno, em três campanhas oceanográficas: Maio e Setembro de 2011 (período chuvoso e seco, respectivamente) e Junho de 2013 (transição entre os períodos). Todos os resultados para o transporte de volume resultante foram relacionados à exportação de água do sistema estuarino em direção à baía do Marajó. O valor do transporte resultante foi maior na primeira campanha ( $74.391 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e menor na terceira campanha ( $10.828 \text{ m}^3/\text{s}$ ); a segunda campanha apresentou um valor intermediário igual a  $45.387 \text{ m}^3/\text{s}$ . O canal principal do rio Pará para a área de estudo, situado na margem esquerda e apresentando isóbatas de 70 m, demonstrou ser a principal feição morfológica no transporte de volume resultante. Nessa morfologia foram observados os maiores valores para a velocidade de corrente longitudinal e predominância absoluta de exportação de água do sistema ao longo do tempo de medição.

**Palavras chave:** Estuário do Rio Pará. Hidrodinâmica Transporte de Volume. ADCP.

## ABSTRACT

The Amazon estuary is mainly composed by Amazon and Tocantins rivers, which present a complex and extensive network of drainage, with intense regimes of fluvial discharges. Part of the discharge of the Amazon River through the little channels next of Breves city, added to the discharge of Tocantins , Acará , Moju, Capim and Guamá rivers, form the estuary of the Pará River, which has its terminal course known as Marajó Bay, toward the ocean adjacent . The study area covers the parallels  $1.50^{\circ} \text{ S} - 1.60^{\circ} \text{ S}$  and  $48.95^{\circ} \text{ W} - 48.85^{\circ}$  meridian. This study aimed to relate the hydrodynamic parameters with the system of local transport, with regard to the action of tidal and river discharge. For the data acquisition of the currents an ADCP profiler were used, operating at 600 kHz and coupled to the vessel, performing transversal sections in the river channel during a cycle of semidiurnal tide in three oceanographic campaigns: May and September 2011 (wet and dry periods, respectively) and June 2013 ( transition between periods) . All results for the resulting volume transport were related to export water from estuarine system toward the bay Marajó . The value of the resulting transport was higher in the first campaign ( $74,391 \text{ m}^3 / \text{s}$ ) and lowest in the third one ( $10,828 \text{ m}^3 / \text{s}$ ), the second campaign presented an intermediate value of  $45,387 \text{ m}^3 / \text{s}$ . The main channel of Pará river to the study area, situated on the left margin with 70 m isobaths, proved to be the main morphological feature resulting in transport volume. For this morphology were observed the highest values for the longitudinal current speed and absolute predominance of water export from the system along the measurement time.

**Keywords:** Pará River Estuary. Hydrodynamic. Volume Transport. ADCP.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Divisões estuarinas ao longo de uma seção longitudinal de um dado sistema, evidenciando estruturas verticais de salinidade e circulações médias.....	22
Figura 2 - Bacia do Tocantins-Araguaia.....	23
Figura 3 - Regime hidrológico (vazão média mensal) de Tucuruí-Pa, período de 1931 a 2011.....	24
Figura 4 - Série temporal da precipitação média mensal ao longo dos anos de 2011 a 2013; estações meteorológicas de Belém, Breves, Cametá e Soure.....	26
Figura 5 - Climatologia da precipitação média mensal ao longo dos anos de 1970 a agosto de 2013; estações meteorológicas de Belém, Breves, Cametá e Soure.....	27
Figura 6 - Série temporal do vento médio mensal ao longo dos anos de 2011 a 2013; estações meteorológicas de Belém, Breves, Cametá e Soure.....	28
Figura 7 - Mapa de velocidade do vento a 30 m de altura, evidenciando a localização da área de estudo.....	29
Figura 8 - Mapa com os regimes de maré na costa brasileira.....	30
Figura 9 - Principais estruturas do Quartenário da região norte e nordeste do Estado do Pará.....	33
Figura 1 – Área de estudo. A) Mapa de localização da área de estudo na América do Sul, ao norte do Brasil e suas fisiografias adjacentes; (B) Mapa evidenciando o local da seção transversal realizada no rio Pará e fisiografias adjacentes; (C) Mapa de isolinhas 2D e 3D para as isóbatas de 0 a 70 metros; (D) Vista lateral da seção transversal, destacando as margens e principais morfologias do canal.....	38
Figura 11 - Imagem do ADCP modelo Workhorse Rio Grande.....	40
Figura 12 - Método de medição com o uso do ADCP. (A) Princípio físico do efeito Doppler (Fonte: Adaptado de Simpson, 2001); (B) Imagem do ADCP acoplado à embarcação; (C) Ilustração do campo de velocidade que o equipamento fornece das seções transversais.....	41
Figura 13 - Imagem do software WinRiver© 1.06 evidenciando a intensidade do campo de velocidade, a trajetória do transect e informações como velocidade do barco, profundidades, distancia entre as margens, coordenadas geográficas e descarga total no canal.....	41
Figura 14 - Esquema ilustrativo do cálculo de decomposição vetorial, exibindo o ângulo com a direção do vetor, as componentes longitudinais e transversais do vetor velocidade.....	42

Figura 15 - Imagem da área de estudo com a decomposição do vetor velocidade $x$ , em relação aos norte magnético (NM) e verdadeiro ou geográfico (N), exibindo a fórmula para determinação do ângulo $\theta$ .....	44
Figura 16 - Ilustração da matriz 3D gerada no processamento dos dados de corrente, com os valores das colunas referentes à profundidade; das linhas, a largura do canal e; as páginas ao tempo. ....	45
Figura 17 - Curva dos transportes instantâneos calculados e dos retirados diretamente do ADCP, para a campanha do dia 14 de maio de 2011. ....	48
Figura 18 - Curva dos transportes instantâneos calculados e dos retirados diretamente do ADCP, para a campanha do dia 20 de setembro de 2011. ....	50
Figura 19 - Curva dos transportes instantâneos calculados e dos retirados diretamente do ADCP, para a campanha do dia 25 de junho de 2013. ....	51
Figura 20 - Curvas de transporte instantâneo e nível da água gerado pela análise harmônica ao longo do tempo de medição para a primeira campanha, período chuvoso.....	55
Figura 21 - Curvas de transporte instantâneo e nível da água gerado pela análise harmônica ao longo do tempo de medição para a segunda campanha, período seco. ....	56
Figura 22 - Curvas de transporte instantâneo e nível da água gerado pela análise harmônica ao longo do tempo de medição para a terceira campanha, período de transição entre seco e chuvoso.....	56
Figura 23 - Diagrama nível da água e transporte de volume ao longo do tempo de medição para a campanha de maio de 2011. ....	58
Figura 24 - Diagrama nível da água e transporte de volume ao longo do tempo de medição para a campanha de setembro de 2011. ....	60
Figura 25 - Diagrama nível da água e transporte de volume ao longo do tempo de medição para a campanha de junho de 2013. ....	60
Figura 26 - Campo resultante para o fluxo de volume ao longo da seção transversal para a primeira campanha, com os valores expressos em m/s.....	64
Figura 27 - Campo resultante para o fluxo de volume ao longo da seção transversal para a segunda campanha, com os valores expressos em m/s.....	65
Figura 28 - Campo resultante para o fluxo de volume ao longo da seção transversal para a terceira campanha, com os valores expressos em m/s.....	66

Figura 29 - Perfis verticais da componente longitudinal  $u$  para o canal principal em cada seção ao longo do tempo de medição. (A) primeira campanha - maio de 2011; (B) segunda campanha – setembro de 2011; (C) terceira campanha - junho de 2013.  
.....67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constantes harmônicas com seus respectivos período em segundos, amplitude em metros e fase em radianos. ....	30
Tabela 2 - Unidades morfológicas e ambientes costeiros da região Amazônica.....	33
Tabela 3 - Coordenadas geográfica inicial e final dos transects realizados nas três campanhas, abrangendo o número de seções e ciclos de maré e a fase lunar.....	38
Tabela 4 - Configurações do equipamento ADCP utilizado na aquisição dos dados. ....	40
Tabela 5 - Transportes instantâneos calculados em comparação com o proveniente do ADCP, em m <sup>3</sup> /s para as três campanhas. ....	52
Tabela 6 - Valores de $\bar{u}$ calculado em profundidades e larguras adimensionais, área de cada seção, transporte instantâneo e duração dos transects para a campanha do dia 14 de maio de 2011.....	52
Tabela 7 - Valores de $\bar{u}$ calculado em profundidades e larguras adimensionais, área de cada seção, transporte instantâneo e duração dos transects para a campanha do dia 20 de setembro de 2011.....	52
Tabela 8 - Valores de $\bar{u}$ calculado em profundidades e larguras adimensionais, área de cada seção, transporte instantâneo e duração dos transects para a campanha do dia 25 de junho de 2013.....	53
Tabela 9 - Valores de balanço de volume referentes aos transportes calculados e os provenientes diretamente do ADCP ao longo do tempo de medição.....	61
Tabela 10 - Valores de transporte de volume resultante ao longo do tempo de medição para as três campanhas. ....	62

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>19</b>
3.1	Objetivo geral	19
3.2	Objetivos específicos	19
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>20</b>
4.1	Classificação de estuários	20
4.2	Hidrologia	22
4.3	Condições meteorológicas e oceanográficas	24
4.4	Aspectos geológicos	31
<b>5</b>	<b>ANTECEDENTES DE ESTUDOS FÍSICOS</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
6.1	Área de estudo	37
6.2	Aquisição de dados	38
6.3	Processamento de dados	41
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>48</b>
7.1	Transportes de volume instantâneos	48
7.2	Transporte x maré	57
7.3	Balanço de volume	60
7.4	Transporte de volume resultante	62
7.5	Fluxo de volume ( $\phi$ ) resultante	63
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>70</b>
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>72</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$u$  – componente longitudinal da velocidade de corrente

$\bar{u}$  – média espacial da componente longitudinal

$\langle u \rangle$  – média temporal da componente longitudinal

$v$  – componente transversal da velocidade de corrente

$\vec{V}$  – vetor velocidade de corrente

$Tv$  – Transporte de volume instantâneo

$\langle Tv \rangle$  – Transporte de volume resultante, média temporal

$\phi$  – Fluxo de volume

$\langle \phi \rangle$  – Fluxo de volume resultante, média temporal

$A$  – Área da seção transversal

$h$  – Perfil vertical ao canal

$T$  – Período de maré

$Z$  – Profundidade adimensional

$z$  – Profundidade real

$Q_f$  – Descarga fluvial

ZR – Zona de Maré do Rio

ZM – Zona de Mistura

ZC – Zona Costeira

GPS – *Global Position System*

ADCP – *Acoustic Doppler Current Profile*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

## 1 INTRODUÇÃO

Os rios são importantes componentes de integração do ambiente continental ao oceânico, dentre os quais se destacam os grandes rios, visto que aproximadamente 40% da água doce que chega ao oceano são transportadas pelos 10 maiores rios do planeta. Os estudos destes grandes rios são importantes em escalas regional, continental e global (DAGG et al., 2004).

As zonas costeiras e os estuários representam ambientes altamente dinâmicos e instáveis, principalmente devido aos intensos regimes hidrodinâmicos aos quais estão sujeitos, gerando como produto processos de erosão e deposição sedimentar, o que define características geomorfológicas singulares aos estuários (EL-ROBRINI, 2006). São regiões que merecem atenção por parte da comunidade científica, tendo em vista que cerca de 60% das grandes cidades do mundo estão situadas em torno dos estuários (MIRANDA et al., 2002).

Basicamente, os dois principais estuários da região amazônica são os dos rios Amazonas e Tocantins. Trata-se de um ambiente altamente energético, onde a circulação hidrodinâmica é originada pela ação contínua de diversos fatores (GABIOUX, 2002). As redes de drenagem se apresentam como sistemas complexos e extensos, gerando regimes de intensas descargas fluviais. Entre as bacias dos dois rios ocorrem interações por meio de diversos canais situados a sudoeste da ilha do Marajó, denominados Estreitos de Breves (COSTA, 2014, no prelo; SILVA, 2009). Nessa região, encontra-se a baía das Bocas, onde a partir dela, se inicia o rio Pará, prosseguindo a leste até a foz do rio Tocantins. Parte da descarga do rio Amazonas por meio dos Estreitos de Breves, somada à descarga dos rios Tocantins, Acará, Moju, Capim e Guamá, formam o estuário do rio Pará (GREGORIO; MENDES, 2009).

O rio Pará pode ser interpretado como um conjunto hidrográfico sem uma nascente propriamente dita, formado pela contribuição hídrica de diversos corpos d'água e que dão origem a uma sucessão de baías e enseadas (MARTINS, 2010). O complexo terminal estuarino do rio Pará em direção ao oceano adjacente recebe o nome de baía do Marajó (AB'SÁBER, 2006). A intensa descarga de água doce reduz a salinidade no estuário, porém, a ocorrência de maré dinâmica na região resulta em

uma larga zona de transição fluviomarinha sujeitas ao regime semidiurno das marés (GREGÓRIO; MENDES, 2009).

## 2 JUSTIFICATIVA

O conhecimento das condições hidrodinâmicas locais e seus regimes de transporte são importantes para o meio em questão, uma vez que fornece embasamento científico a respeito da dinâmica do ambiente. A compreensão desses processos é fundamental tendo em vista diversos fatores, como o planejamento de atividades econômicas (como pesca ou do setor industrial) e o estabelecimento relacionado à moradia, com a devida segurança para comunidades que se situam ao longo das margens do rio.

A zona costeira amazônica é caracterizada pela presença de dois estuários principais: do rio Amazonas e do rio Pará, sendo este, um dos maiores do Brasil, situado em uma região altamente dinâmica. À jusante do *transect* realizado até a parte terminal do complexo estuarino na baía do Marajó, em direção ao oceano, ocorrem diversos municípios, incluindo principalmente a capital do Estado do Pará, Belém, situada em uma baía à altura do emboque dos rios Guamá, Moju, Acará e Capim (AB'SABER, 2006). Na área também há a presença de dois portos de grande importância, a saber: o porto de Vila do Conde, município de Barcarena e Porto de Belém.

Em funcionamento há mais de 30 anos, o Porto de Vila do Conde dá suporte ao escoamento de bauxita e alumínio do complexo Albras-Alunorte, com intensa movimentação de cargas como alumina, lingote de alumínio, bauxita, cobre, óleo combustível, madeira e piche (COSTA, 2006). Dessa forma, tendo em vista que a região suporta um tráfego de embarcações de vários gêneros, sendo que um possível cenário referente a algum tipo de acidente que envolva derramamento de óleo ou mesmo de resíduos químicos anteriormente citados, seria de grande preocupação socioeconômica e ambiental. O último grande incidente nesse local foi em 2007<sup>1</sup>, em que houve um derramamento de óleo diesel devido ao encalhe da embarcação Elísio Leão.

---

<sup>1</sup> Levantamento de Meteoceanografia: Uma Amostra do Comportamento Hidrometeorológico da Região da foz do rio Arari, ilha de Santana, ilha de Cotijuba (baía do Marajó, Pará), 10 de Outubro de 2007. Projeto Piatam-Mar (Rosário comunicação pessoal).

Apesar da grande importância atribuída à área de estudo, em virtude da dinâmica do aporte hídrico no estuário amazônico, da existência de vários municípios (incluindo a capital do estado) e das recorrentes atividades industriais, ainda há certa carência de estudos realizados, fato que não condiz com o interesse social e científico da região.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Relacionar os parâmetros hidrodinâmicos com o regime de transporte de volume local, no que diz respeito à ação das correntes de maré e descarga fluvial na zona de maré do rio Pará, da região que recebe o aporte hídrico do Amazonas e Tocantins em direção à baía do Marajó.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- ✓ Determinar as variações sazonais da descarga fluvial.
  
- ✓ Calcular o transporte de volume na zona de maré do rio Pará.
  
- ✓ Verificar as diferenças no fluxo ao longo do perfil transversal entre as margens e canal principal na zona de maré do rio Pará.
  
- ✓ Analisar as variações do campo de velocidade ao longo de um ciclo de maré e em diferentes períodos climáticos na zona de maré do rio Pará.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Classificação de estuários

A origem da palavra estuário é referente ao adjetivo latino *aestuarium*, que significa maré ou onda abrupta de grande altura, de modo que este ambiente está sujeito a constantes alterações em virtude das forças naturais, fato que confere aos estuários um carácter dinâmico elevado (MIRANDA et al., 2002).

Existem diversas definições de estuário de acordo com distintos pontos de vista, sendo que de um modo geral pode ser interpretado como uma região interior de um ambiente costeiro, no qual ocorre o encontro das águas fluviais com a do oceano adjacente, as quais são transportadas por meio das correntes de maré.

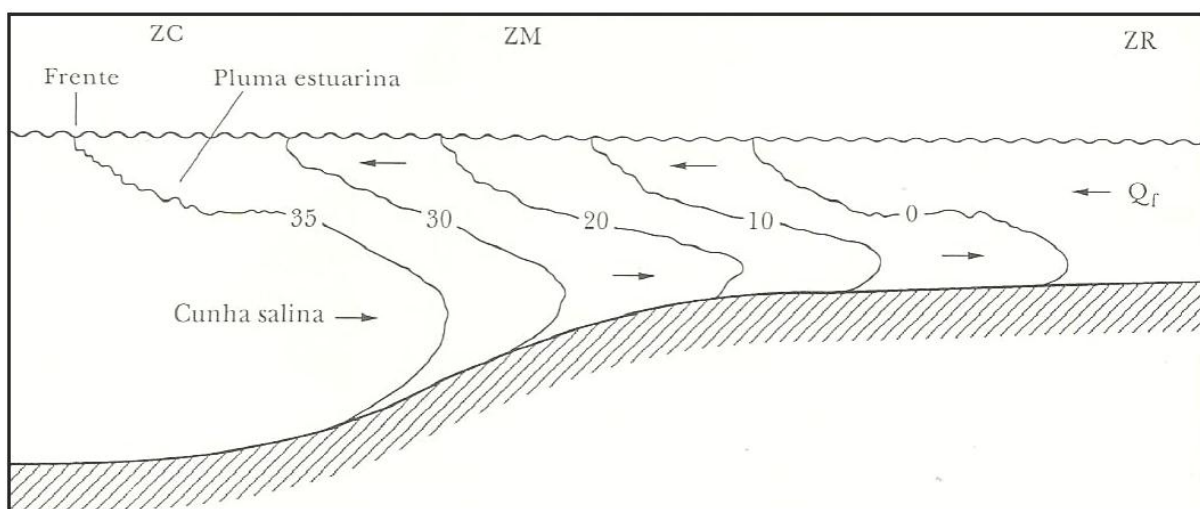
A abordagem física para os estuários é bastante complexa, tendo em vista que um exame detalhado a respeito da circulação, processos de mistura e estratificação salina, que são características físicas importantes, dependem de vários fatores como a geometria (o que limita a sua dimensão), descarga fluvial, maré, salinidade, circulação oceânica adjacente e o regime de ventos (PRITCHARD, 1967).

No âmbito da oceanografia física, a definição clássica de Pritchard (1955) e Cameron e Pritchard (1963) é comumente utilizada, de modo a aferir um estuário como um corpo d'água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. Entretanto, esta definição estipula que o limite do estuário abrange a região de influência da água do mar ou a zona de mistura. Por outro lado, Dionne (1963) sugeriu outra definição, em que o estuário é dividido em três setores (estuário inferior, médio e superior) e representa uma reentrância do mar que atinge o vale de um rio até o limite de influência da onda de maré, ampliando o conceito clássico de Pritchard (1955), pois passa a interpretar o estuário como um sistema que abrange da região onde ocorre mistura da água do mar até a parte do rio sujeita à oscilação da maré.

Outra definição apresentada por Kjerfve (1987) considera vários processos regionais (gênese geológica, clima, sedimentação) e também divide o estuário em

três setores: Zona de Maré do Rio (ZR), que representa a parte fluvial com salinidade igual a zero, mas sujeita a oscilação diária da maré; Zona de Mistura (ZM), que é a região onde ocorre a mistura da água doce da drenagem continental com a água do mar do oceano adjacente e; por fim, a Zona Costeira (ZC), que se estende até o limite externo da pluma estuarina. A Figura 1 exibe um modelo genérico meramente ilustrativo dos setores propostos por Kjerfve (1987).

Figura 2 - Divisões estuarinas ao longo de uma seção longitudinal de um dado sistema, evidenciando estruturas verticais de salinidade e circulações médias.



Fonte: Miranda et al (2002).

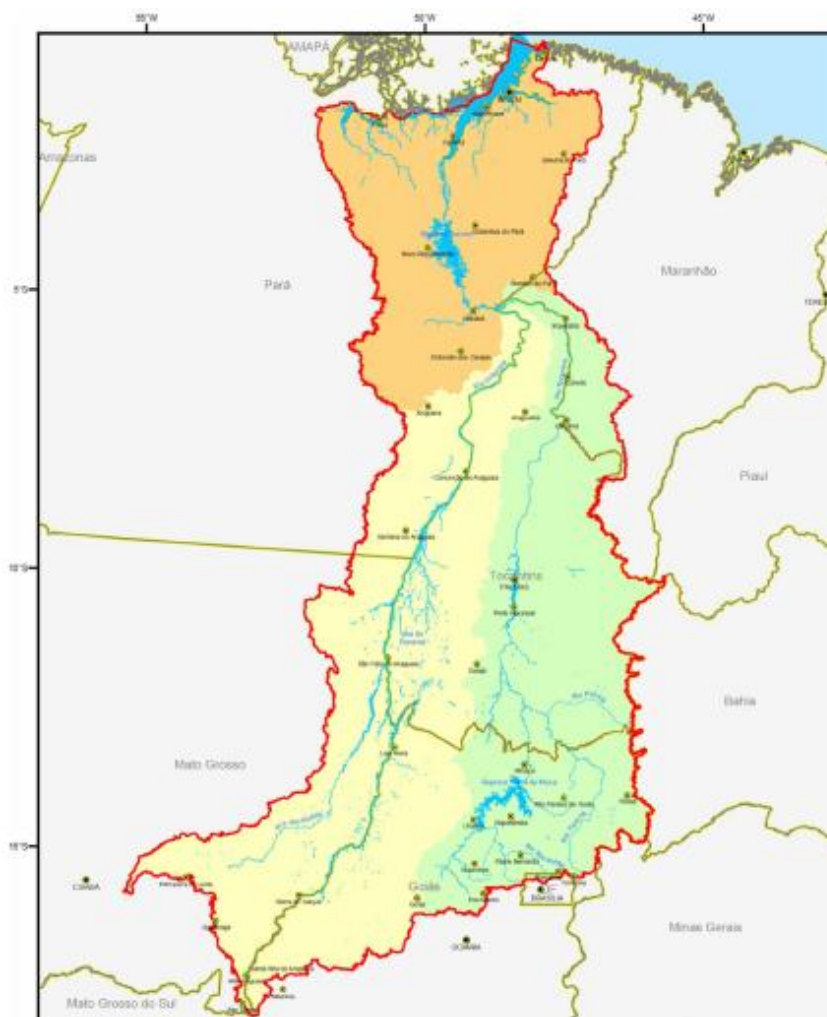
Para o presente trabalho, a definição que melhor se adequa à área de estudo é a de Kjerfve (1987) referente à Zona de Maré do Rio (ZR), classificação que corresponde ao estuário superior da definição de Dionne (1963). Na área de estudo, a salinidade é igual a zero, porém está sujeita a variação do nível de superfície durante os processos de enchente e vazante diário devido à oscilação da maré. Ressalta-se que o rio Pará é um conjunto hidrográfico que não possui uma nascente propriamente dita, de modo que este corpo d'água não possui uma *cabeceira*, o que representa a região do limite interior da ZR, pois a influência da maré é observada no estreito de Breves e na baía das Bocas, local em que se forma o rio Pará.

## 4.2 Hidrologia

A bacia dos rios Araguaia-Tocantins (Figura 2) abrange uma área de drenagem de 757.000 km<sup>2</sup>, possui uma descarga anual média de 12.000 m<sup>3</sup>/s e apresenta uma carga sedimentar de aproximadamente 18.000.000 ton/ano (LATRUBESSE; STEVAUX, 2002).

É considerada a quarta maior bacia hidrográfica da América do Sul, sendo que a maior parte de sua extensão ocupa a região Centro-Oeste do Brasil, local de sua nascente, seguindo em direção ao norte até a sua jusante, em um subsistema hidrográfico denominado de Baixo Tocantins (área em laranja da figura 2), que engloba a área de estudo e segue até a sua foz no Oceano Atlântico (AQUINO; STEVAUX; LATRUBESSE, 2005).

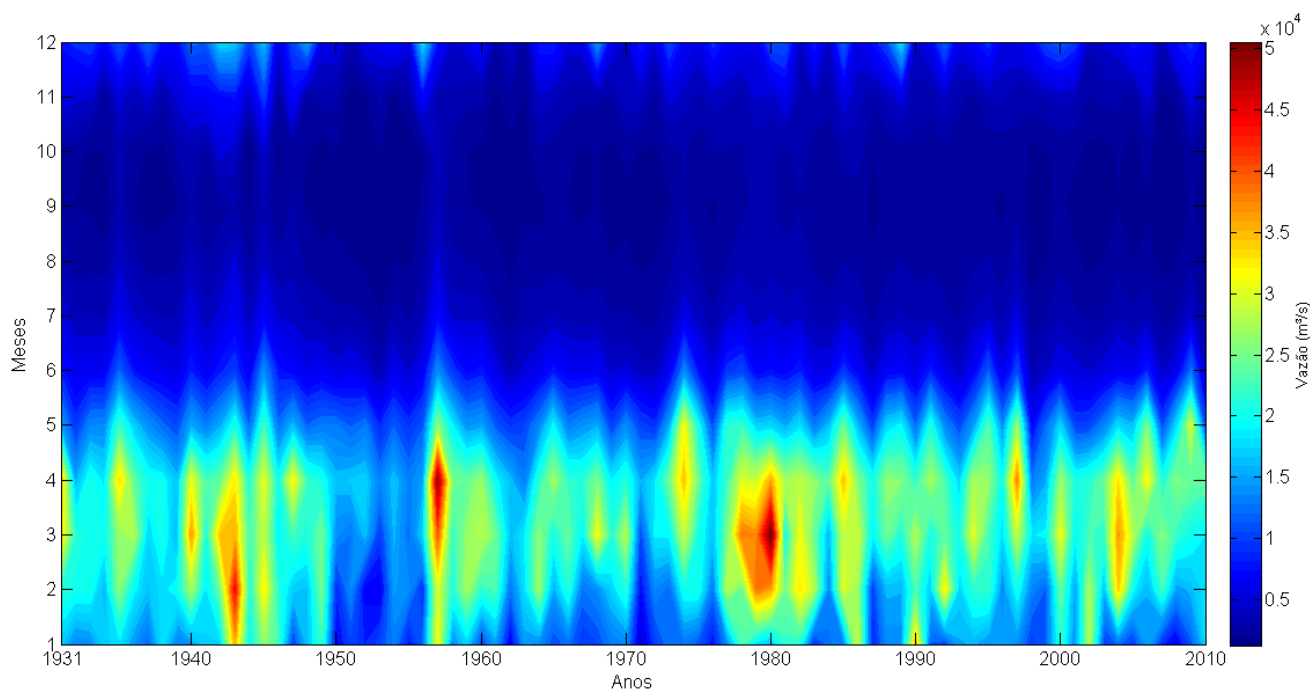
Figura 3 - Bacia do Tocantins-Araguaia.



Fonte: Modificado de Mistério do Meio Ambiente (MMA, 2006),

A hidrografia regional é formada por diversos rios e outros cursos d'água que compõe uma complexa rede, conhecida como "Golfão Marajoara". A abundância hídrica local é importante em diversos fatores como o elevado índice pluviométrico, para uso como vias de transporte para diversos fins por meio dos vários canais e a diversidade biológica da floresta amazônica (AB'SABER, 2010). A figura a seguir ilustra as variações sazonais de vazão em uma série anual de 80 anos para o município de Tucuruí, no rio Tocantins.

Figura 4 - Regime hidrológico (vazão média mensal) de Tucuruí-Pa, período de 1931 a 2011.



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2011),

Basicamente, podemos dizer que o estuário amazônico é formado pelos rios Amazonas e Tocantins (BARTHEM; SCHWASSMAN, 1994), entre os quais ocorre alguma interação entre as suas bacias de acordo com variações sazonais da região por meio dos Estreitos de Breves, que consiste em uma área situada a oeste e noroeste da ilha do Marajó em que ocorre um encontro complexo de feições hidrológicas de grande significância geográfica (AB'SABER, 2010). Esforços vem sendo feitos para determinar a influência da bacia amazônica sobre o rio Pará, no

qual destaca-se os trabalhos de Silva (2009) e Costa (2014, no prelo). Apesar do eventual contato entre as águas dos dois rios, foi definido que a área de estudo pertence à bacia dos rios Araguaia-Tocantins, se acredita que a maior contribuição hídrica no curso do rio Pará estudado no trabalho é proveniente da descarga do rio Tocantins.

#### **4.3 Condições meteorológicas e oceanográficas**

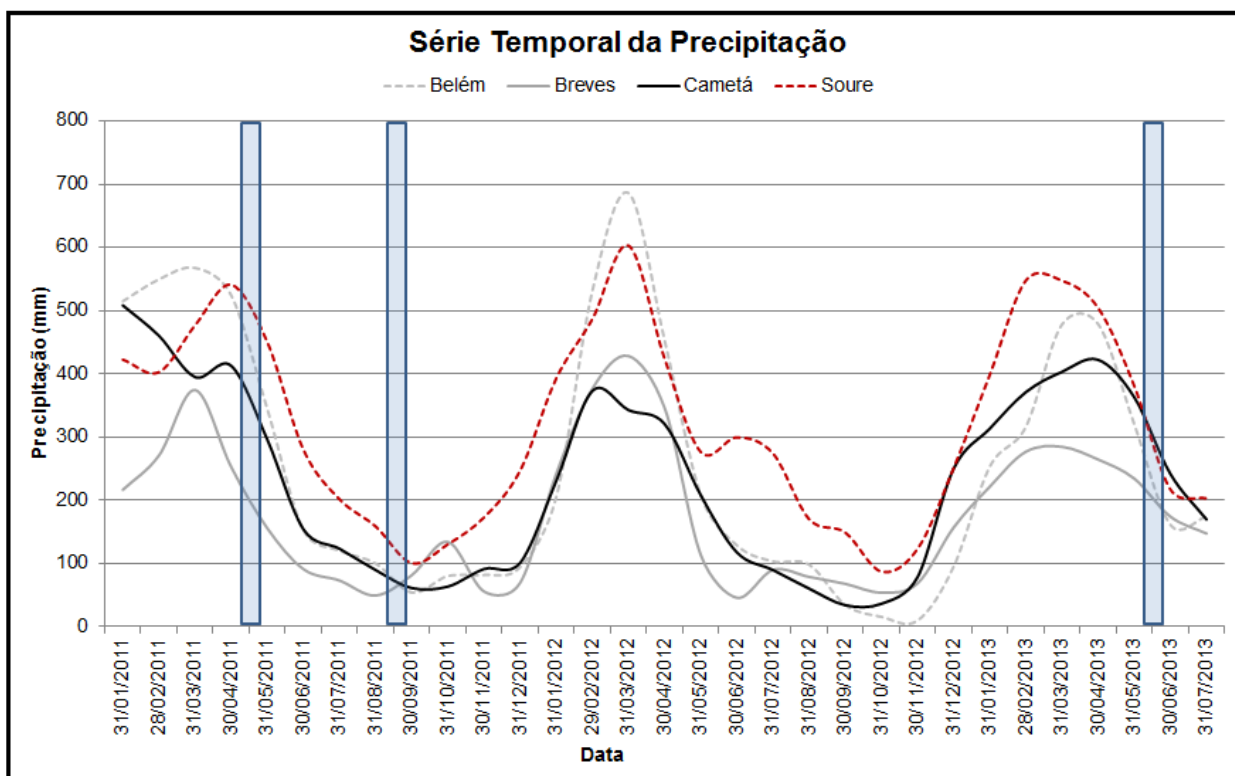
A compreensão de diversos processos naturais é fundamental para um estudo hidrodinâmico de uma dada região, uma vez que as suas variações ao longo do tempo definem a característica local a respeito de vários parâmetros, como o regime de ventos, o clima de ondas, o padrão da maré, as correntes e a climatologia.

A região que abrange a área de estudo do presente trabalho possui um clima definido como equatorial quente e úmido, apresentando temperatura média anual de 27° C, tipicamente de regiões equatoriais em que as variações térmicas diárias são mais significativas que as sazonais, além de valores de umidade relativa do ar acima dos 80% devido a fatores intrínsecos a taxa de precipitação, diretamente relacionadas à elevada temperatura, bem como os processos de insolação e evaporação (LIMA et al., 2005).

O parâmetro pluviométrico possibilita distinguir dois períodos climáticos para a região: um período chuvoso que compreende os meses de Dezembro a Maio, com maiores índices de Fevereiro a Abril e o período seco, que se estende de Junho a Novembro, com índices levados de estiagem para os meses de Setembro a Novembro. Entre as duas estações citadas, há um período de transição, em que pode haver tanto um retardo como antecipação da maior ocorrência de chuvas, com maior ou menos intensidade (LIMA et al., 2005).

As médias da precipitação mensal para os anos de 2010 a 2013, juntamente com os períodos em que as campanhas oceanográficas ocorreram, são exibidas na Figura 4, utilizando os dados das estações meteorológicas do INMET situadas em Belém, Breves, Cametá e Soure.

Figura 5 - Série temporal da precipitação média mensal ao longo dos anos de 2011 a 2013; estações meteorológicas de Belém, Breves, Cametá e Soure.

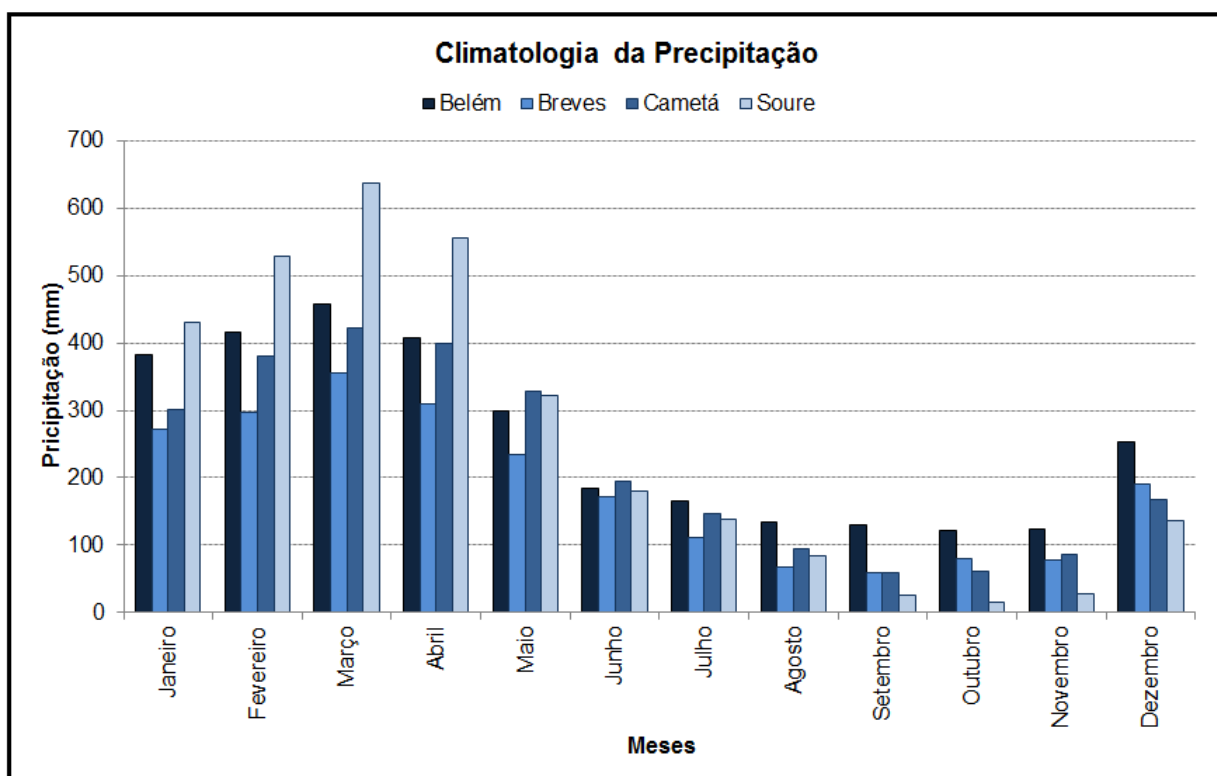


Fonte: INMET.

A análise do gráfico exibido na figura acima demonstra por meio das colunas em azul, que as coletas foram realizadas no período chuvoso (a primeira campanha), no máximo do período seco (segunda campanha) e na transição entre os períodos (terceira campanha).

Os valores com a climatologia mensal para a precipitação referente à área de estudo são apresentados na Figura 5. A climatologia foi determinada pelo cálculo da média da precipitação mensal para os anos de 1970 a 2013, em um período de 43 anos, referentes à série temporal dos dados disponíveis pelo INMET.

Figura 6 - Climatologia da precipitação média mensal ao longo dos anos de 1970 a agosto de 2013; estações meteorológicas de Belém, Breves, Cametá e Soure.



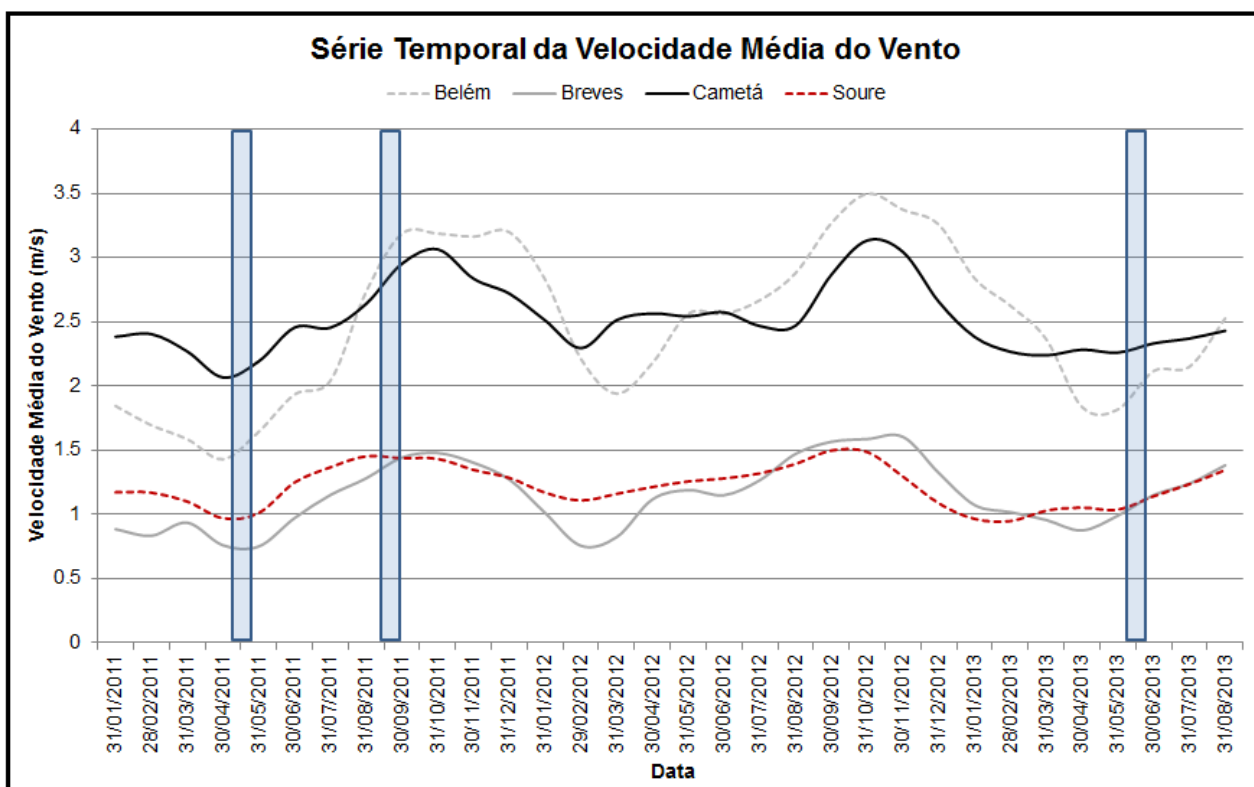
Fonte: INMET.

Para a climatologia da área de estudo, devido ao fato de não haver uma estação meteorológica próxima o suficiente como referência, foram utilizados os dados cinco estações do INMET (Belém, Breves, Cametá e Soure).

O regime de ventos sofre uma variação sazonal forçada pela variação na posição da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) durante o ano. Influenciando no regime de chuvas da região, as condições meteorológicas mais severas são observadas durante os meses de novembro a março, quando a ZCIT se move sobre a região costeira, em direção ao sul, sob ação dos ventos alíseos de nordeste, propiciando fortes chuvas e trovoadas (FIGUEROA; NOBRE, 1990).

As influências das variações sazonais resultam em valores máximos dos ventos durante o período seco e mínimos durante o chuvoso, com direção preferencial de NE / SW (MEAPA, 2000). O gráfico com os valores médios mensais para a intensidade do vento durante os anos de 2011 a 2013 são apresentados na figura 6, que exhibe novamente os períodos em que ocorreram as campanhas.

Figura 7 - Série temporal do vento médio mensal ao longo dos anos de 2011 a 2013; estações meteorológicas de Belém, Breves, Cametá e Soure.



Fonte: INMET.

Assim como ocorreu com a precipitação, dados do regime eólico também são provenientes do INMET, logo, não há uma estação única capaz de ser usada como referência para as informações do padrão de ventos da região.

Além da série temporal mensal para o parâmetro de ventos, também foi analisado um mapa de velocidades do vento, média anual a 30 metros de altura (Figura 7), gerado por meio de um modelo simplificado baseado em séries de dados meteorológicos da região (MEAPA, 2000).

Figura 8 - Mapa de velocidade do vento a 30 m de altura, evidenciando a localização da área de estudo.



Fonte: MEAPA (2000).

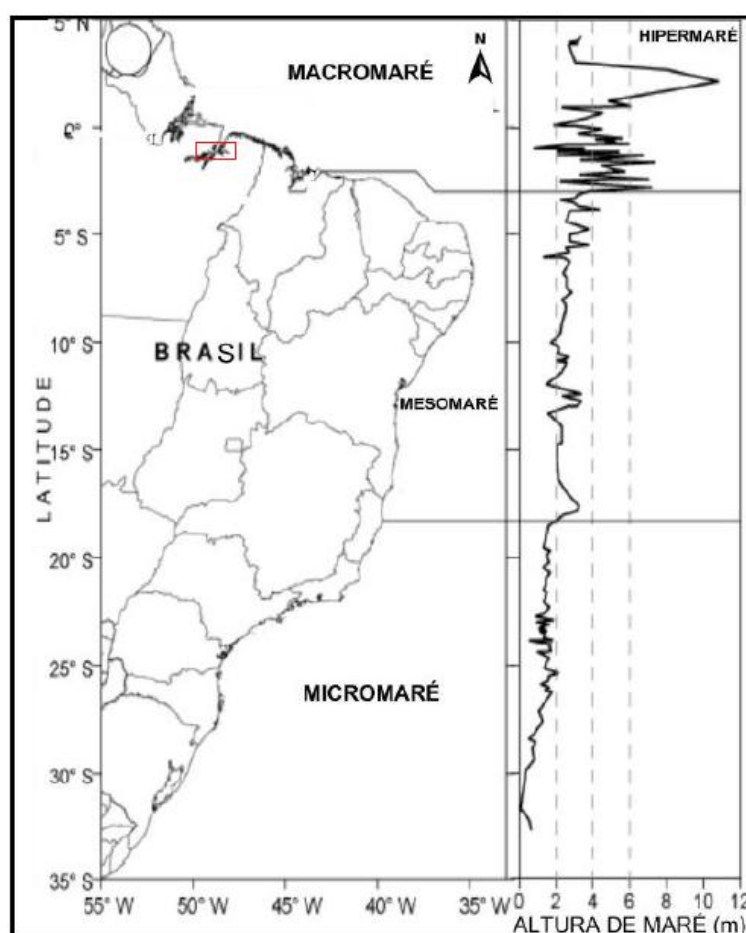
O mapa de velocidades do vento exibe interpolações e extrapolações de dados eólicos. A série temporal registrada pelas estações meteorológicas aliadas a rugosidade do terreno são os parâmetros utilizados no modelo de ventos. O resultado não contemplou o fator orográfico, admitindo características planas à região. Segundo o modelo, a área de estudo possui um regime de ventos com intensidades entre  $4,5$  a  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a uma altura de 30 metros (MEAPA, 2000).

O regime eólico é importante para o clima de ondas local, tendo em vista que estes são resultantes da tensão de cisalhamento do vento na superfície da água. Apesar de ser um parâmetro fundamental para a hidrodinâmica da área de estudo, dados de onda são inexistentes para a região como um todo, exceto alguns ambientes de praia no litoral paraense, de acordo com os estudos de Alves (2001), Barbosa et al (2007), Guerreiro (2010) e Borba et al (2012). Outros estudos foram desenvolvidos na região amazônica e produziram algum valor sobre este parâmetro,

porém, foram utilizadas metodologias defasadas e dubitáveis, como o uso de régua, comprometendo a confiabilidade do resultado gerado.

A maré na plataforma continental amazônica é predominantemente semidiurna, com a ocorrência de duas preamares e duas baixa-mares ao longo de um dia lunar ou aproximadamente 24 horas, caracterizando que o estuário está sob um regime de macromaré (Figura 8). O padrão da onda de maré somando-se às grandes vazões dos rios faz com que o ambiente apresente uma forte dinâmica (GALLO, 2004).

Figura 9 - Mapa com os regimes de maré na costa brasileira, destacando a área de estudo.



Fonte: adaptado de Vellozo; Alves, 2005.

A propagação da maré no trecho fluvial se dá na forma de uma onda progressiva com características semidiurnas e com a geração de outras componentes em decorrência de fatores como a geometria, os efeitos de águas

rasas, o atrito no fundo e a vazão fluvial (GALLO, 2004; DEFAN, 1960). A teoria sobre a onda de maré é apresentada mais detalhadamente em textos especializados, como Macmillan (1966), Harris (1981) e Pugh (1987).

Santos (2014, no prelo) elaborou uma tabela com 35 constantes harmônicas para o rio Pará (Tabela 1). De posse das constantes, foi possível realizar uma previsão da onda de maré para a área de estudo durante as campanhas oceanográficas do presente trabalho.

Tabela 1 - Constantes harmônicas com seus respectivos período em segundos, amplitude em metros e fase em radianos.

<b>Constantes Harmônicas</b>	<b>Período (s)</b>	<b>Amplitude (m)</b>	<b>Fase (rad)</b>
<b>Mm</b>	2380713,36	0,0698	0,565
<b>MSf</b>	1275721,42	0,0826	0,733
<b>Alpha1</b>	104661,60	0,0006	0,359
<b>2Q1</b>	100822,40	0,0015	0,434
<b>Q1</b>	96726,08	0,01	4,392
<b>O1</b>	92949,63	0,0673	5,903
<b>M1</b>	89399,69	0,0088	2,796
<b>K1</b>	86164,09	0,0886	0,106
<b>J1</b>	83154,52	0,0028	2,255
<b>OO1</b>	80301,87	0,0142	0,952
<b>KQ1</b>	77681,65	0,0003	2,404
<b>MNS2</b>	47258,16	0,0077	2,381
<b>MU2</b>	46338,33	0,0606	2,26
<b>N2</b>	45570,05	0,1796	0,392
<b>M2</b>	44714,16	0,9637	0,759
<b>L2</b>	43889,83	0,0691	0,878
<b>S2</b>	43200,00	0,2123	1,57
<b>KJ2</b>	42316,28	0,0182	2,839
<b>MO3</b>	30190,69	0,0354	4,696
<b>M3</b>	29809,44	0,0062	4,563
<b>MK3</b>	29437,70	0,0351	5,282
<b>SK3</b>	28773,74	0,0069	5,667
<b>MN4</b>	22569,03	0,0453	5,612
<b>M4</b>	22357,08	0,0969	6,069
<b>SN4</b>	22176,69	0,0122	0,817
<b>MS4</b>	21972,02	0,0506	0,51
<b>S4</b>	21600,00	0,0031	2,067
<b>2MK5</b>	17751,17	0,0158	3,771
<b>2SK5</b>	17270,54	0,0007	5,884
<b>2MN6</b>	14998,62	0,0306	4,081
<b>M6</b>	14904,72	0,0483	4,515
<b>2MS6</b>	14732,60	0,0329	5,214

<b>2SM6</b>	14564,40	0,0041	0,17
<b>3MK7</b>	12706,71	0,0074	2,559
<b>M8</b>	11178,54	0,0153	3,404

O fator forma da maré (COUTIER, 1936) é uma razão entre componentes harmônicas que determina se é diurna ou semidiurna, por meio de uma razão entre a soma das principais componentes diurnas: K1 (luni-solar diurna) e O1 (lunar principal diurna) e; semidiurnas: M2 (lunar principal) e S2 (solar principal), de acordo com a fórmula:  $Nf = (K1 + O1) / (M2 + S2)$ . Caso o valor de **Nf** seja menor que 0,25, a maré é semidiurna. Se for entre 0,25 e 1,5 se trata de uma maré semidiurna mista; entre 1,5 e 3 é uma maré diurna mista e; para valores maiores que 0,3, a maré é diurna. O resultado encontrado para a maré local é de 0,13, de modo que o valor fortalece a característica semidiurna da região.

$$Nf=(9,6+9,4) / (107,7+30,2)$$

$$Nf=19 / 137,9$$

$$Nf = 0,137$$

#### 4.4 Aspectos geológicos

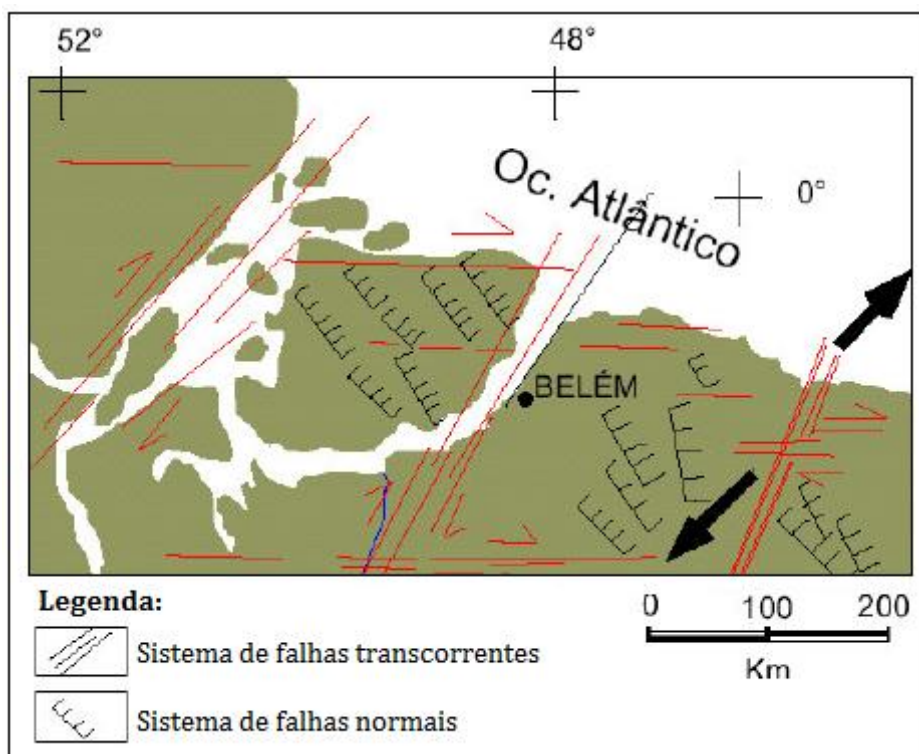
Os fatores físicos, hidrológicos e ecológicos do Golfão Marajoara são interpretados como processos que envolvem uma grande escala e complexidade (PINTO, 2010), de modo que para definir uma geomorfologia da região amazônica como um todo, é necessário adquirir conhecimentos batimétricos respeito dos vários corpos d'água em menor escala que compõem a rede hidrográfica.

A área de estudo, assim como em vários outros locais na baía do Marajó, possui uma batimetria irregular composta por vários bancos, produtos da intensa sedimentação característica em áreas de remanso. A ação das correntes de maré é fundamental para a formação dos bancos, assim como no transporte de sedimento de fundo, que é um processo importante na formação das fácies morfológicas. Os

sedimentos transportados no rio Pará são compostos basicamente por areia, silte, argila e matéria orgânica em decomposição (MARTINS, 2010).

As isóbatas de 70 m que foram observadas na margem esquerda do rio Pará para a área de estudo, são provavelmente produtos de falhas transcorrentes de orientação preferencial NE-SW, que são estruturas neotectônicas do Terciário Superior ou Quartenário (Figura 9), juntamente com um sistema de falhas normais na direção NW-SE (FRANÇA, 2003; COSTA et al., 2002).

Figura 9 - Principais estruturas do Quartenário da região norte e nordeste do Estado do Pará.



Fonte: adaptado de Costa (1996).

A geologia local é constituída por sedimentos do Terciário (Formação Barreiras) e do Quartenário (Formação Pós-Barreiras), sendo este mais comum nas margens dos rios, apresentando inclusive afloramentos lateríticos e argilosos na forma de barrancos (MARTINS, 2007).

Os níveis topográficos da região não são elevados, principalmente nas ilhas e áreas marginais aos canais dos rios, que estão sujeitas a inundações frequentes; o município de Barcarena situa-se em uma topografia mais elevada (aproximadamente 15 metros). Sobre a classificação de relevos, as praias fluviais possuem uma cota inferior a 2 metros e apresentam Terras Firmes Submersas; entre 2 – 5 metros estão situadas as Terras Firmes Emersas, podendo ser representadas por falésias próximas às praias; e acima de 5 metros de cota topográfica ocorrem as Terras Altas e posteriormente, acima de 10 metros, os platôs (BOULHOSA, 2007).

Nesse contexto, são reconhecidas para a área de estudo duas unidades morfoestruturais (Tabela 2) e quatro unidades morfológicas (ou denominadas ‘unidades de paisagem’), a saber: o Planalto Rebaixado da Amazônia (intrínseco ao Baixo Amazonas), de maior extensão, onde são encontradas as regiões de terra firme; e a Planície Amazônica, que abrange as planícies aluviais (ou seja, as áreas de várzea), as “praias” fluviais e os canais fluviais (MARTINS, 2007).

Tabela 2 - Unidades morfológicas e ambientes costeiros da região Amazônica.

<b>Unidades Morfoestruturais</b>	<b>Unidades Morfológicas</b>
<b>Planalto Rebaixado da Amazônia</b>	Regiões de Terra Firme
	Planície Aluvial
<b>Planície Amazônica</b>	Praias Fluviais
	Canais Fluviais

Fonte: modificado de Boulhosa (2007).

## 5 ANTECEDENTES DE ESTUDOS FÍSICOS

Os estudos no âmbito da oceanografia física para os estuários amazônicos são reduzidos. Há diversos trabalhos a respeito da caracterização física de uma dada área ou descrição dos fenômenos na região, porém são poucos os que apresentam larga escala de tempo e espaço ou um perfil de monitoramento integral. Nessa seção do trabalho serão abordados alguns pontos principais de estudos realizados na região amazônica.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos na região há mais de 20 anos e proporcionaram as primeiras informações sobre condições oceanográficas físicas. Cordeiro (1987) estudou a variação de parâmetros físico-químicos e o processo de salinização na baía do Guajará e rio Pará, verificando que a estratificação horizontal é mais evidente que a vertical e apresentando valores de até 7 ups em regiões com maior influência marinha. Já Pinheiro (1987) fez análises a respeito da hidrodinâmica para a baía do Guajará, exibindo valores para amplitude de maré entre 3 a 4 metros e velocidades médias de correntes de maré acima de  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Estes valores médios corroboram com os dados de velocidade de corrente e amplitude de maré apresentados por Bock et al (2011).

O estudo de Alves (2004) fez análises baseadas nos dados coletados durante as campanhas oceanográficas do Programa REVIZEE (Levantamento dos Recursos Vivos da Zona Econômica Exclusiva) na plataforma continental da região norte do Brasil. Foram realizadas discussões sobre a zona limite da pluma estuarina do rio Amazonas (isohalina de 30 ups) e as características hidrográficas por meio de diagramas-TS e análise de massas d'água. Rosário et al (2009) também realizou estudos na plataforma sobre a frente salina no estuário do rio Amazonas, no estado do Amapá. Os resultados exibiram perfis verticais de salinidade com estratificação variando entre os períodos climáticos e concluiu que a amplitude de maré local, a descarga fluvial e a ação dos ventos são os fatores físicos fundamentais para a dinâmica hidrológica do Amazonas, que representa a maior interface entre água doce e salgada do mundo.

No litoral do nordeste paraense já foram desenvolvidos alguns estudos hidrodinâmicos e hidrográficos, como por exemplo, os realizados no município de Bragança, nos estuários dos rios Caeté e Taperaçu e na praia de Ajuruteua. Neste

ambiente, Barbosa et al (2003) relacionou os padrões hidrodinâmicos de praia com a morfologia, descrevendo a área como uma região submetida a um regime de macromaré semi-diurna, com velocidades de corrente máxima de  $0,7 \text{ m.s}^{-1}$  e com grandes transformações morfodinâmicas. Cavalcante et al (2010), Pereira et al (2009) e Monteiro et al (2011) desenvolveram estudos no estuário do rio Caeté e concluíram que a descarga fluvial local produz gradientes de salinidade longitudinais com variação sazonal. Asp et al (2012) comparou este estuário com o do rio Taperaçu e verificou que ambos estão inseridos no mesmo contexto geológico e climático, com morfologias típicas de estuários com regime de macromaré e devidamente zoneados de acordo com a proposta de Dalrymple et al (1992). Porém, concluiu que o estuário do rio Taperaçu se difere do Caeté devido ser dominado por fricção, típico de regiões onde a amplitude de maré é elevada em relação à profundidade do canal, gerando inundações em suas margens, que em ambos os estuários são compostos por mangue.

A região da baía do Marajó possui estudos de caracterizações hidrodinâmicas e morfodinâmicas recentes, como nos trabalhos de Nascimento (2010), Ferreira (2010), Baltazar et al (2011), Bezerra et al (2011) e Ferreira (2013). Os trabalhos foram realizados em canais de maré e estuários adjacentes ao rio Pará na altura da baía do Marajó. Nascimento (2010) concluiu que os canais de maré da ilha do Marajó são rasos e estão sob o regime de mesomaré, com extensas áreas inundáveis nas planícies de intermaré em suas margens. Observou também a presença de marcas onduladas devido à ação de ondas e correntes que retrabalham os sedimentos. No estuário do rio Paracauari, também na ilha do Marajó, os resultados de Bezerra et al (2011) convergem com de Ferreira (2013), classificando o estuário como tipo 1 pelos critérios de Hansen e Rattray (1966), como bem misturados ou levemente estratificados. A mesma classificação foi verificada por Baltazar et al (2011) em relação ao rio Pará, na parte terminal de seu sistema estuarino, na baía do Marajó. Todos os resultados sobre salinidade corroboram a respeito da relação intrínseca desse parâmetro com o ciclo de maré, que gera oscilações no tamanho da coluna d'água e na velocidade das correntes, além da sazonalidade, que define variações nos regimes pluviométricos, descargas fluviais e ventos.

Vale ressaltar as contribuições provenientes do Projeto Amasseds (A Multidisciplinary Amazon Shelf SEDiment Study), resultado da parceria entre o Brasil e os Estados Unidos que visava principalmente entender a complexidade da Plataforma Continental Amazônica. Envolvendo cientistas de diversas áreas (geologia, química, física e biologia), todos envolvidos com estudos em oceanografia. Os sedimentos foram colocados como tema comum entre os grupos, devido à grande influência desse material na região (GEYER et al., 1996).

Os modelos numéricos com a finalidade de simular processos naturais e aferir prognósticos para vários parâmetros, como instrumento de compreensão de fenômenos complexos (PECLY, 2008), têm sido cada vez mais utilizados pela comunidade científica desde a última década. Poucos estudos nesse âmbito foram desenvolvidos na região amazônica. Sem necessidade de aprofundar o assunto, cita-se: Gallo (2004; 2009), no canal norte do rio Amazonas; Abreu (2008), no estuário do rio Caeté, em Bragança e; Barbosa (2008), no estuário do rio Maracaná, no litoral nordeste paraense.

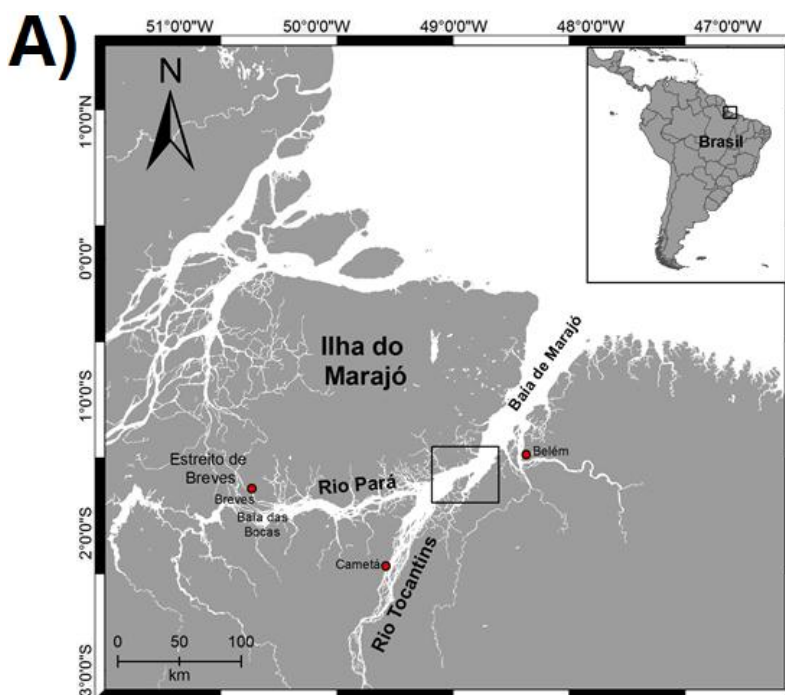
## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

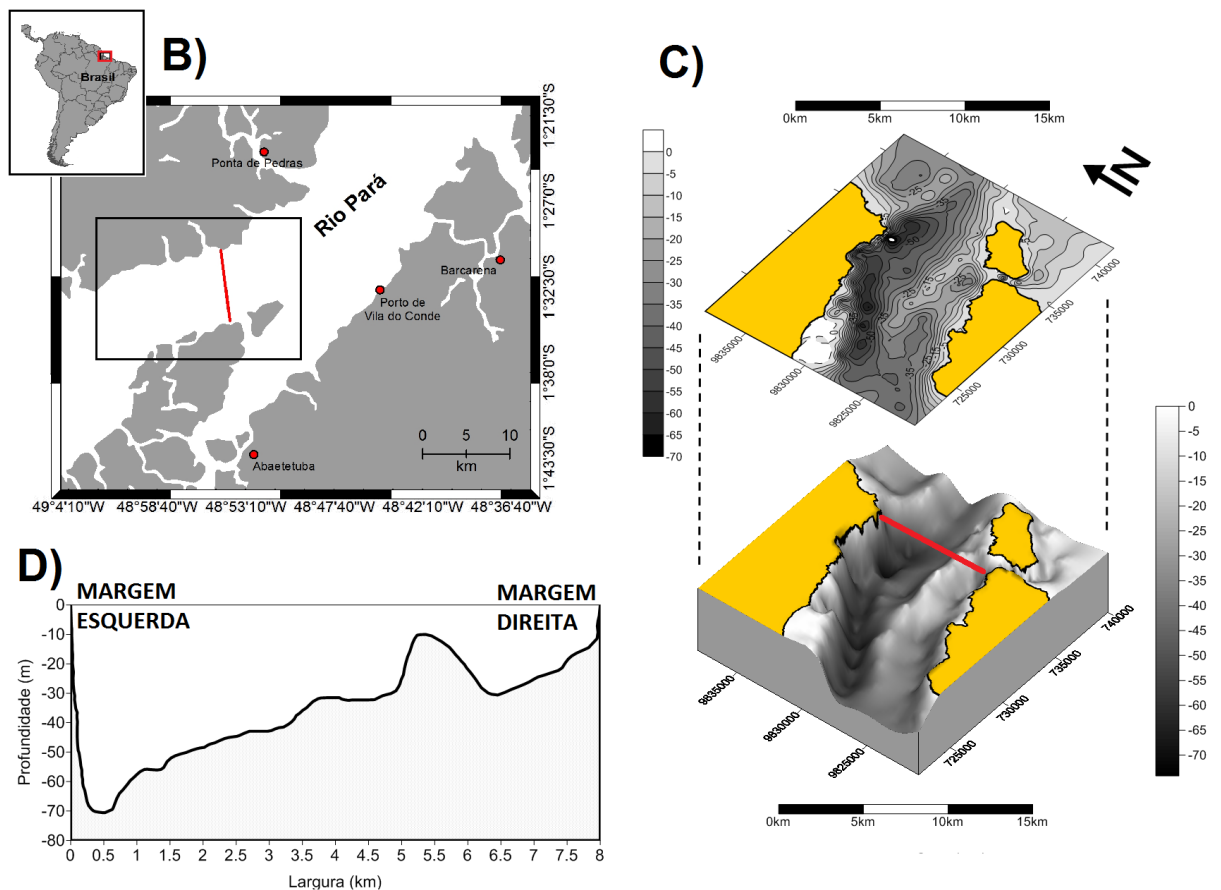
### 6.1 Área de estudo

A Zona Costeira Paraense (ZCP) possui uma extensão de aproximadamente 1.200 km, ocupando uma área de 82.596,43 km<sup>2</sup>. Levando em consideração aspectos sociais, econômicas e naturais, a ZCP foi dividida basicamente em três setores distintos: a Costa Atlântica ou Salgado Paraense (setor 1), o Insular Estuarino ou setor 2 e Continental Estuarino ou setor 3 (EI-ROBRINI, 2006).

A região de estudo (Figura 10) é o curso do rio Pará que compreende o limite entre os setores estuarinos insular (Ilha do Marajó) e o continental. Em outras palavras, é o curso do rio Pará entre a costa sudeste da ilha do Marajó e o continente, próximo aos municípios de Abaetetuba e Ponta de Pedras (Marajó) e do Porto de Vila do Conde, abrangendo os paralelos 1,50° S – 1,60° S e meridianos 48,95° W – 48,85° W.

Figura 10 – Área de estudo. A) Mapa de localização da área de estudo na América do Sul, ao norte do Brasil e suas fisiografias adjacentes; (B) Mapa evidenciando o local da seção transversal realizada no rio Pará e fisiografias adjacentes; (C) Mapa de isolinhas 2D e 3D para as isóbatas de 0 a 70 metros; (D) Vista lateral da seção transversal, destacando as margens e principais morfologias do canal.





## 6. 2 Aquisição de dados

Os dados hidrodinâmicos relacionados aos movimentos da água por meio das correntes de maré assim como os valores de descarga foram amostrados em três campanhas oceanográficas nos anos de 2011 e 2013 (Tabela 3). Como a ação da maré no ponto estudado exerce forte influência no transporte de volume do rio Pará, a amostragem foi realizada ao longo de 13 horas, ou seja, um ciclo completo de maré local que possui carácter semidiurno.

Tabela 3 - Coordenadas geográficas iniciais e finais dos transects realizados nas três campanhas, abrangendo o número de seções e ciclos de maré e a duração em horas.

Localização	Latitude		Longitude	
		1° 30,263' S - inicial	48° 54,315' W – inicial	
	1° 34,708' S - final	48° 54,269' W – final		
Campanha	nº de ciclos de maré	nº de Transects	Duração	
Maio de 2011	1	15	11,2 h	
Setembro de 2011	1	13	11,8 h	
Junho de 2013	1	14	12,5 h	

Para a aquisição de dados de corrente foi utilizado um perfilador ADCP ou *Acoustic Doppler Current Profiler* da Teledyne RD Instruments®, modelo Workhorse Rio Grande (Figura 11) operando a 600 kHz. O equipamento foi programado no modo *Bottom Tracking*, com bússola direcionada para o norte magnético e acoplado à embarcação. A tabela abaixo apresenta detalhes das configurações do equipamento.

Tabela 4 - Configurações do equipamento ADCP utilizado na aquisição dos dados.

Equipamento	ADCP - RD Instruments® (Workhorse Rio Grande)
<b>Configuração</b>	
<b>Perfil</b>	Banda larga (padrão)
<b>Frequência</b>	600 kHz
<b>Orientação</b>	Para baixo
<b>Modo</b>	“Bottom tracking”
<b>Distância da superfície até o 1° Beam</b>	1,34 m
<b>Padrão do Beam</b>	Convexo
<b>n° de Beams</b>	4
<b>Blank</b>	0,25 cm
<b>Tamanho da célula</b>	1 m
<b>n° de células</b>	124

Figura 11 - Imagem do ADCP modelo Workhorse Rio Grande.

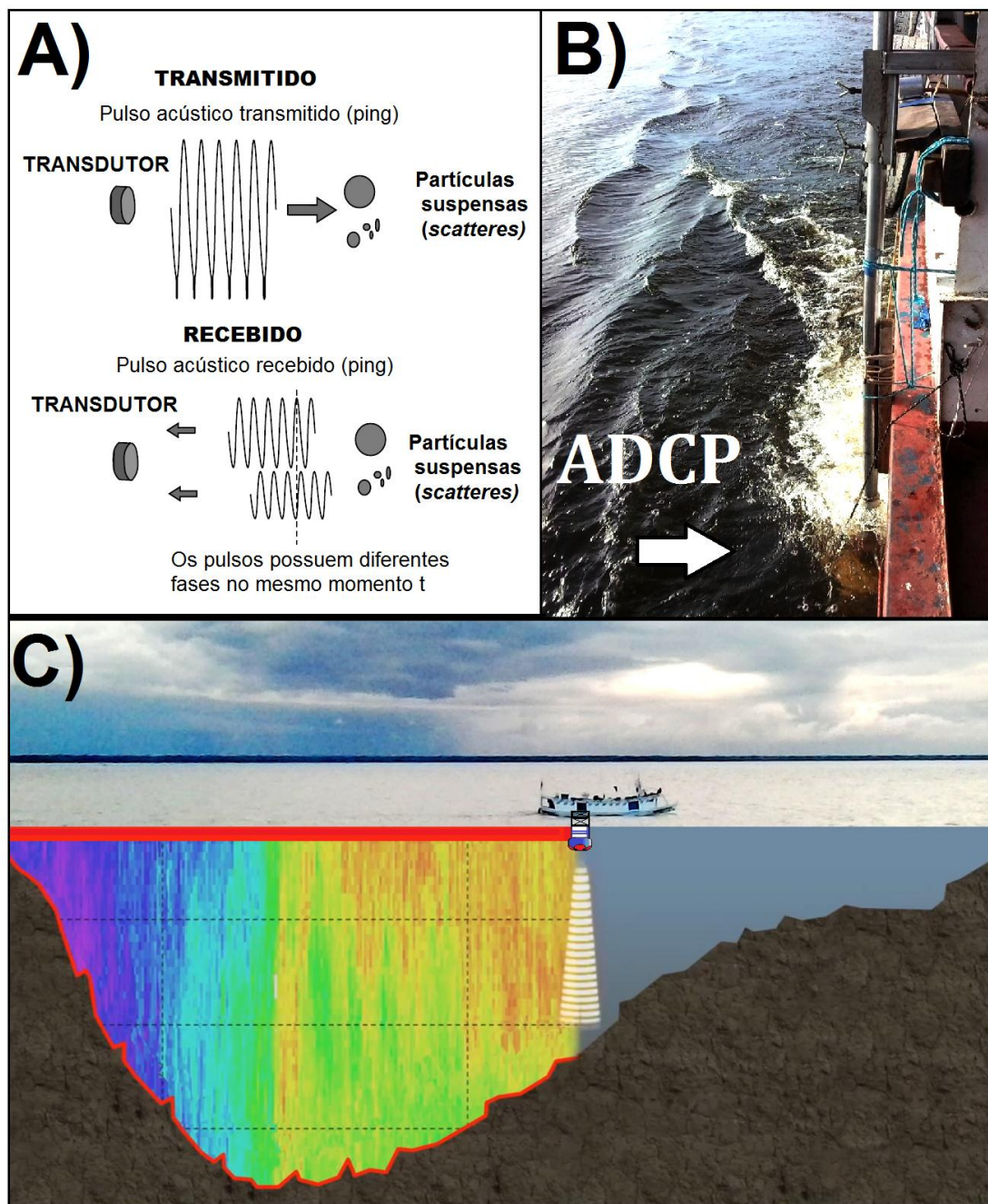


Fonte: Teledyne RD Instruments (2013).

Foram realizadas medições transversais ao rio, de uma margem a outra, durante um ciclo completo de maré (Figura 12). Acoplado ao ADCP foi utilizado um GPS, procedimento que demonstrou ser importante para o processamento. Apesar disso, o equipamento foi configurado no modo *bottom tracking*, o que minimiza erros amostrais referentes ao movimento relativo da água e da embarcação. Este

procedimento é importante devido ao fato do equipamento receber a informação do pulso sonoro que foi refletido pelas partículas em movimento, assumindo que estas se descolam com a mesma velocidade do fluxo de água.

Figura 12 - Método de medição com o uso do ADCP. (A) Princípio físico do efeito Doppler (Fonte: Adaptado de Simpson, 2001); (B) Imagem do ADCP acoplado à embarcação; (C) Ilustração do campo de velocidade que o equipamento fornece das seções transversais.

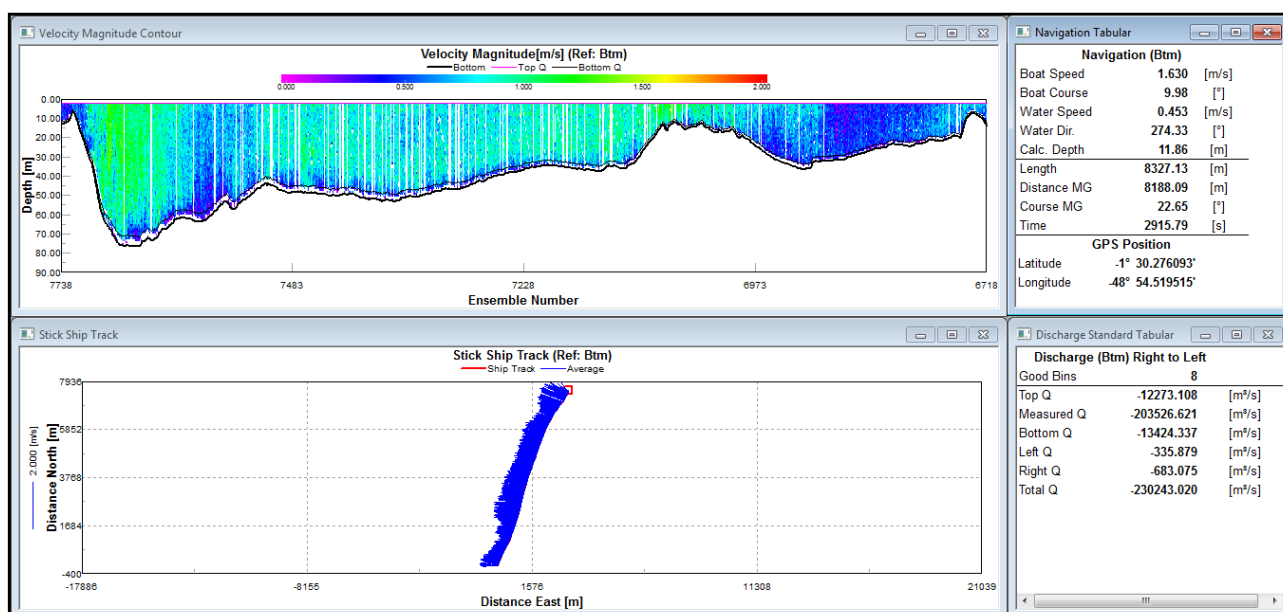


### 6.3 Processamento de dados

Após a aquisição dos dados brutos de corrente nas campanhas oceanográficas, foi realizado um processamento por meio de softwares e programações computacionais.

Para uma visualização inicial dos dados de corrente, os registros foram carregados pelo software WinRiver© 1.06, próprio para visualização e processamento básico dos dados adquiridos com ADCP. Com esse software é possível obter alguns resultados preliminares a respeito da intensidade e direção da corrente, bem como valores de vazões, cálculo da profundidade, distância entre as margens, velocidade da embarcação, duração do *transect* entre outros (Figura 13).

Figura 123 - Imagem do software WinRiver© 1.06 evidenciando a intensidade do campo de velocidade, a trajetória do transect e informações como velocidade do barco, profundidades, distancia entre as margens, coordenadas geográficas e descarga total no canal.

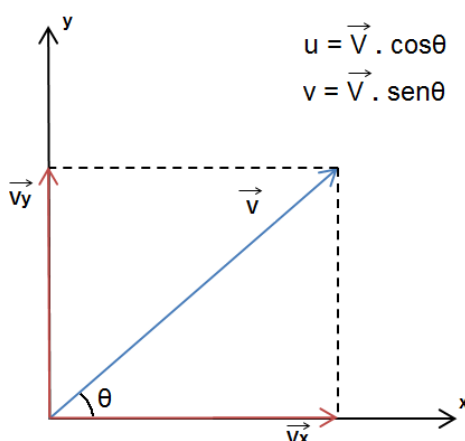


Em virtude de diversas colunas em branco ou sem dados (denominados *bad ensembles*) que são comumente encontradas nas seções transversais, no próprio software é possível realizar um cálculo de média. Para o presente trabalho foi realizado a média a cada 10 *ensembles*, o que gera um novo campo de velocidade

sem esse erro inicial de leitura do dado bruto<sup>2</sup>. Em seguida, estes são exportados do programa em formato “P” (‘nome\_do\_arquivop.000’) para que sejam posteriormente carregados em ambiente Matlab®.

Após serem carregados por este segundo software, os dados serão processados por um pacote de rotinas para ADCP denominado “rdpadcp.m” (PAWLOWICZ, 1999)<sup>3</sup>. A programação gera várias matrizes de dados separados por cada transect realizado. Entre eles, são usadas as componentes dos vetores de velocidade norte e leste e a partir delas são calculados os valores de direção e intensidade de corrente, por meio da fórmula de uma decomposição vetorial (Figura 14). As componentes  $u$  e  $v$  do vetor de velocidade das correntes representam o fluxo longitudinal e transversal, respectivamente.

Figura 14 - Esquema ilustrativo do cálculo de decomposição vetorial, exibindo o ângulo com a direção do vetor, as componentes longitudinais e transversais do vetor velocidade.



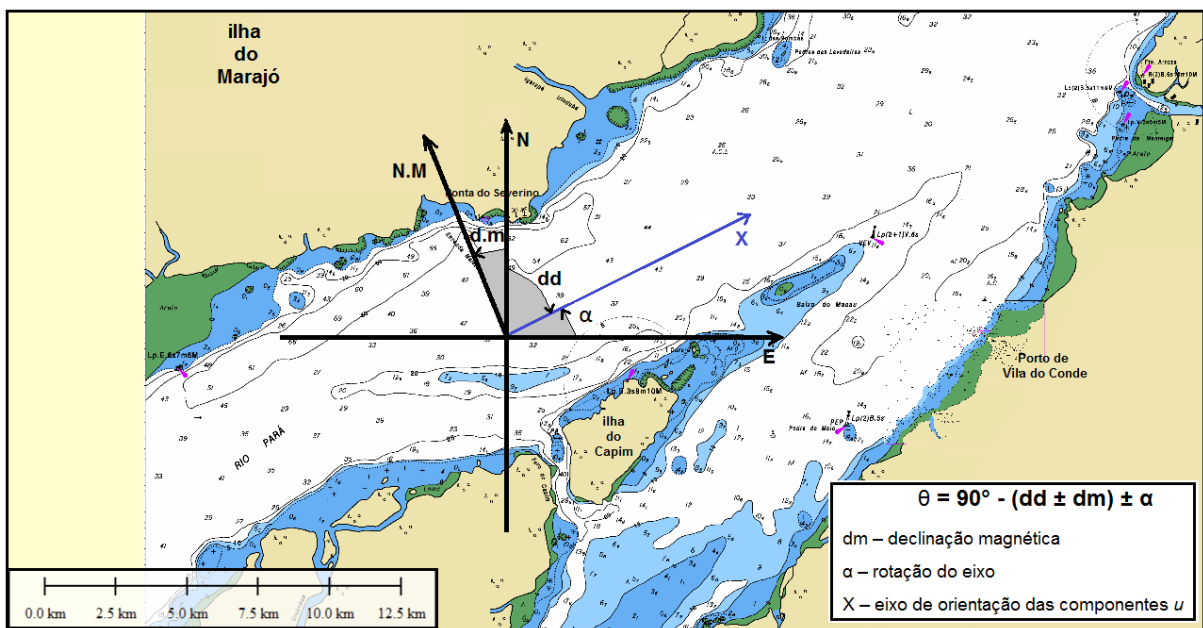
Como a bússola do equipamento estava direcionada para o norte magnético, se fez necessário corrigir a declinação magnética da área de estudo para que os vetores estejam referenciados em relação ao norte verdadeiro. A declinação magnética do local variou entre os anos de 2011 a 2013 nos valores de 19,88° a 19,95°, (Observatório Nacional). Como no estuário é mais comum se trabalhar apenas com

<sup>2</sup> Do ADCP usado no presente trabalho, são extraídos três formatos de dados brutos: “n.000”, “w.000” e “r.000”, sendo que este é lido pelo WinRiver© I para o processamento inicial dos dados.

<sup>3</sup> Rich Pawlowicz’s Matlab® Stuff. Disponível em: <http://www.eos.ubc.ca/~rich/>

as componentes  $u$  e  $v$  do vetor de velocidade das correntes (com  $u \gg v$ ), o eixo sofreu uma rotação anti-horária de  $30,5^\circ$ , gerando um ângulo  $teta$  que será utilizado no cálculo das componentes de velocidade longitudinal (MIRANDA *et al*, 2002). Para o cálculo de transporte de volume será utilizado apenas a componente  $u$  por sua maior significância no fluxo, que representa os estágios de enchente e vazante, com valores negativos e positivos, respectivamente (Figura 15).

Figura 15 - Imagem não geo-referenciada da área de estudo, ilustrando o cálculo da decomposição do vetor velocidade  $x$ , em relação aos norte magnético (NM) e verdadeiro/geográfico (N), além da fórmula para determinação do ângulo  $\theta$ .



Em seguida, o ângulo  $teta$  gerado que estava em graus, foi transformado para radianos para que finalmente fossem determinados os valores das componentes  $u$ , gerado pelo produto do vetor velocidade com o cosseno do ângulo  $teta$ . Para os cálculos do transporte de volume instantâneo e resultante serão utilizadas as médias espacial e temporal da componente  $u$ , respectivamente apresentadas abaixo, sendo  $Tv$  o transporte instantâneo e resultante,  $A$  a área da seção,  $h$  a profundidade para um perfil vertical,  $T$  período de maré e  $u$  a componente longitudinal.

$$Tv = \iint_A u dA = \bar{u} . A \quad (\text{eq. 1})$$

$$\langle Tv \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u}(t)h(t)dt = \langle \bar{u} . h \rangle \quad (\text{eq. 2})$$

A equação 2 (MIRANDA et al., 2002) é representativa para um perfil vertical  $h(t)$ , cuja profundidade local varia periodicamente com o tempo. Trata-se de um cálculo do transporte de volume resultante por unidade de largura da seção, com o perfil sendo representativo para o entorno da posição onde foi realizada a medida. Para o presente trabalho, essa equação foi adaptada para o cálculo de transporte por unidade de área, como a seguir:

$$\langle Tv \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u}(t)A(t)dt = \langle \bar{u} . A \rangle \quad (\text{eq. 3})$$

O transporte instantâneo (equação 1) é dado ao final de cada seção transversal, sendo um produto da média espacial da componente  $u$  ( $\bar{u}$ ) com a área do canal, de modo que ao final de um ciclo de maré, é possível calcular o transporte de volume resultante por meio de uma média temporal dos transportes instantâneos (equação 3). Como o integrando da equação 3 não pode ser encontrado de forma analítica, o transporte de volume resultante por unidade de área da seção pode ser calculado numericamente por uma equação discretizada da integral (MIRANDA et al. 2002), a qual fornece um resultado equivalente:

$$\langle Tv \rangle = \frac{1}{n} \left[ \frac{u(to)A(to)}{2} + \sum_k u(tk)A(tk) + \frac{u(tn)A(tn)}{2} \right] \quad (\text{eq. 4})$$

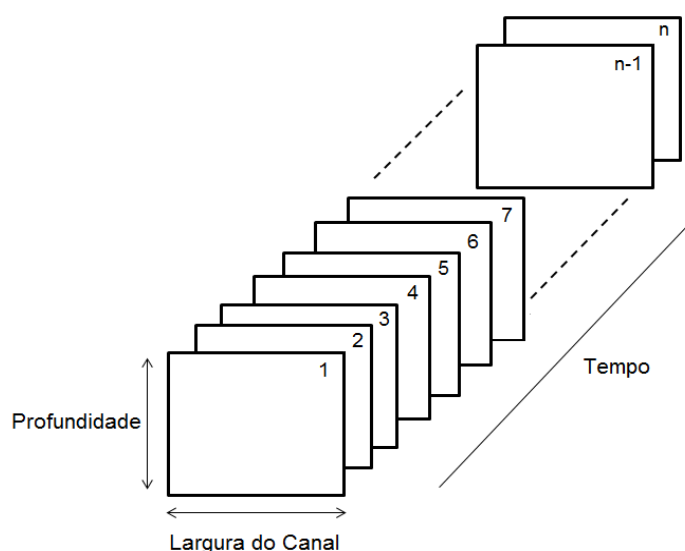
Os valores de área que serão utilizados nos cálculos de transporte são provenientes do ADCP. Os transportes instantâneos são determinados a cada *transect*, uma vez que ocorrem variações periódicas da média no espaço para as componentes  $u$  e na área de cada seção, gerando valores de transporte negativos e positivos (entrada e saída de água do sistema respectivamente). A média no tempo

dos transportes de volume em cada seção representa o transporte resultante por unidade de área ao longo de um ciclo de maré (equação 4).

A equação 4 apresentada na forma discretizada, agrega um embasamento físico ao cálculo, uma vez que divide pela metade o primeiro e o último termo da fórmula. O intuito é tornar os dados de início e fim representativos a um volume médio, meia hora antes da medição e meia hora depois do último *transect*. O cálculo realizado pelo software de leitura dos dados brutos realiza uma média aritmética simples, um método puramente matemático, com as informações coletadas repletas de erros amostrais e “ruídos”.

Para a aplicação do cálculo do fluxo de volume ( $\phi$ ) resultante ao longo do canal, do ponto de vista matemático inerente à linguagem em ambiente Matlab®, a solução encontrada foi criar uma matriz 3D das componentes  $u$ , delimitadas em “(nº de linhas, nº de colunas, nº de páginas)”. O número de páginas corresponde ao número de seções transversais realizadas. A interpretação física para o uso desse tipo de matriz está relacionada ao fato de que um cálculo de média realizado em páginas, na verdade representa uma média temporal da componente  $u$ . Desse modo, a matriz 3D é delimitada em “(largura, profundidade, tempo)” (Figura 16).

Figura 16 - Ilustração da matriz 3D gerada no processamento dos dados de corrente, com os valores das colunas referentes à profundidade; das linhas, a largura do canal e; as páginas ao tempo.



A dificuldade em montar a matriz está no fato de que todas as páginas devem possuir o mesmo número de linhas e colunas. Isso ocorre por várias razões, dentre as quais podemos destacar as diferentes profundidades ao longo do *transect*, tanto morfológicas como também de variação do nível de água em virtude maré, o tempo de cada seção transversal entre as margens e a trajetória da embarcação em cada *transect*. Dessa forma, foi realizado um cálculo para determinar larguras e profundidades adimensionais, para que as matrizes de dados possuam os mesmos números de linhas e colunas.

Os valores de profundidade e largura agora são referentes à porcentagem, variando de 0% até 100%. Por exemplo, os valores de profundidade igual à zero, significa 0% de coluna d'água, ou seja, valores de superfície, bem como os valores iguais a 1 (um), que significa 100% de coluna d'água ou o fundo do canal. O mesmo ocorre para a largura, em que valor zero é referente ao início do *transect*, por exemplo, na margem direita, até o valor igual a 100, na margem esquerda. O cálculo para determinar espaços adimensionais é exibido a seguir, sendo  $Z$  a profundidade adimensional,  $z$  a profundidade real e  $h$  a profundidade máxima em cada perfil vertical, variando no espaço e tempo.

$$Z = \frac{z}{h(x,y,t)} \quad (\text{eq. 5})$$

Esse procedimento matemático permite associar diferentes profundidades e larguras da morfologia do rio. Os dados da componente  $u$  de fundo ou de superfície expressos em porcentagem viabiliza comparações entre as velocidades das margens (menor profundidade) com as dos canais do rio (maior profundidade), filtrando uma parte do erro amostral associado às regiões da coluna d'água que o ADCP não consegue medir e à contração e expansão vertical da coluna d'água, não somente devido a diferenças na morfologia do *transect*, mas também por variações de nível, atenuando o efeito da maré.

De posse das matrizes de dados já expressas sem dimensão, agora é possível montar a matriz 3D com as seções transversais realizadas dispostas em

páginas, que nesse caso, possuem 101 linhas por 101 colunas. O número de matrizes quadradas em páginas da matriz 3D representa quantas seções transversais foram realizadas em cada campanha, de modo que essa quantidade variou entre as coletas de dados (ver Tabela 3).

Ao calcular uma média em páginas (por *transects*), o resultado final é uma matriz quadrada também com 101 linhas por 101 colunas. Essa matriz de dados representa a média temporal da componente  $u$  ou o campo resultante para esta componente da velocidade, em que os valores positivos são direcionados para a foz do rio (vazante) e os negativos são referentes ao estágio de enchente.

Da mesma forma que os dados referentes à componente  $u$  foram interpolados para adimensionalizar profundidade e largura, agora a matriz resultante da componente  $u$  será novamente interpolada com suas dimensões reais, retornando com a morfologia do rio e com a distância real entre as margens. O resultado é o fluxo de volume resultante ao longo de um ciclo de maré semidiuno, definindo a direção preferencial do fluxo em diferentes morfologias do canal.

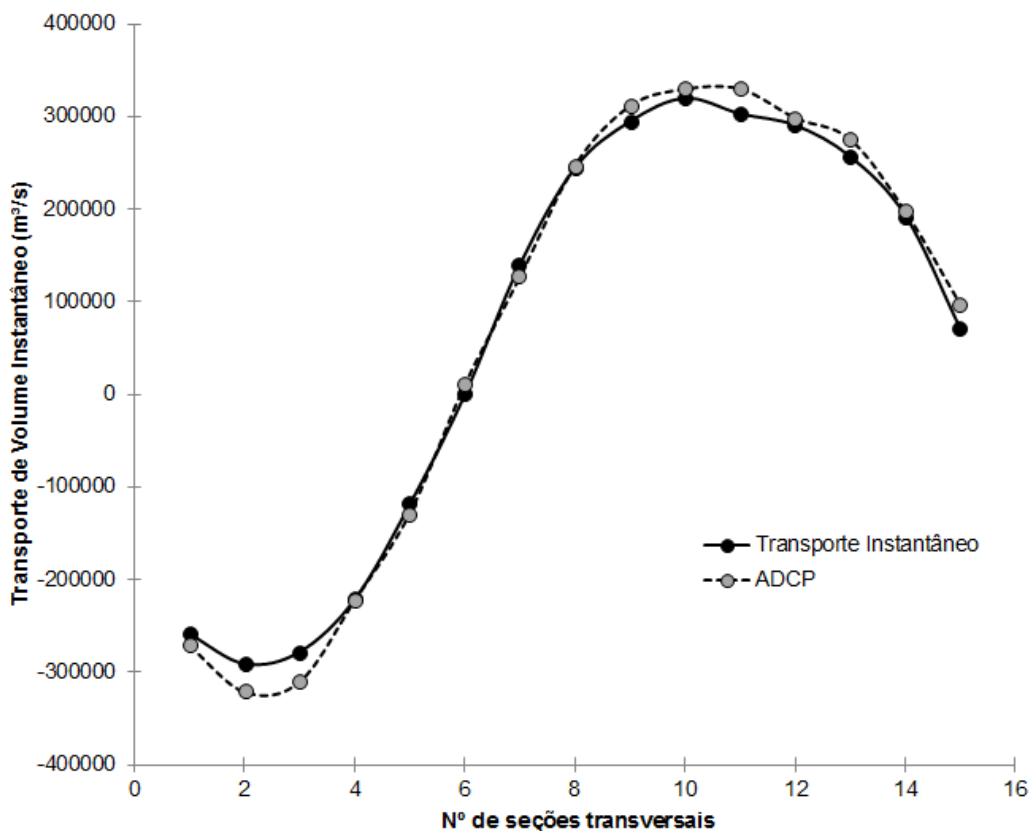
## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Transportes de volume instantâneos

Os resultados referentes ao transporte de volume instantâneo que foram calculados no tratamento de dados, para as campanhas oceanográficas realizadas em Maio e Setembro de 2011 e Junho de 2013, são apresentados a seguir. As curvas do transporte instantâneo calculado no tratamento adimensional dos dados e os valores fornecidos diretamente pelo ADCP foram apresentados no mesmo gráfico.

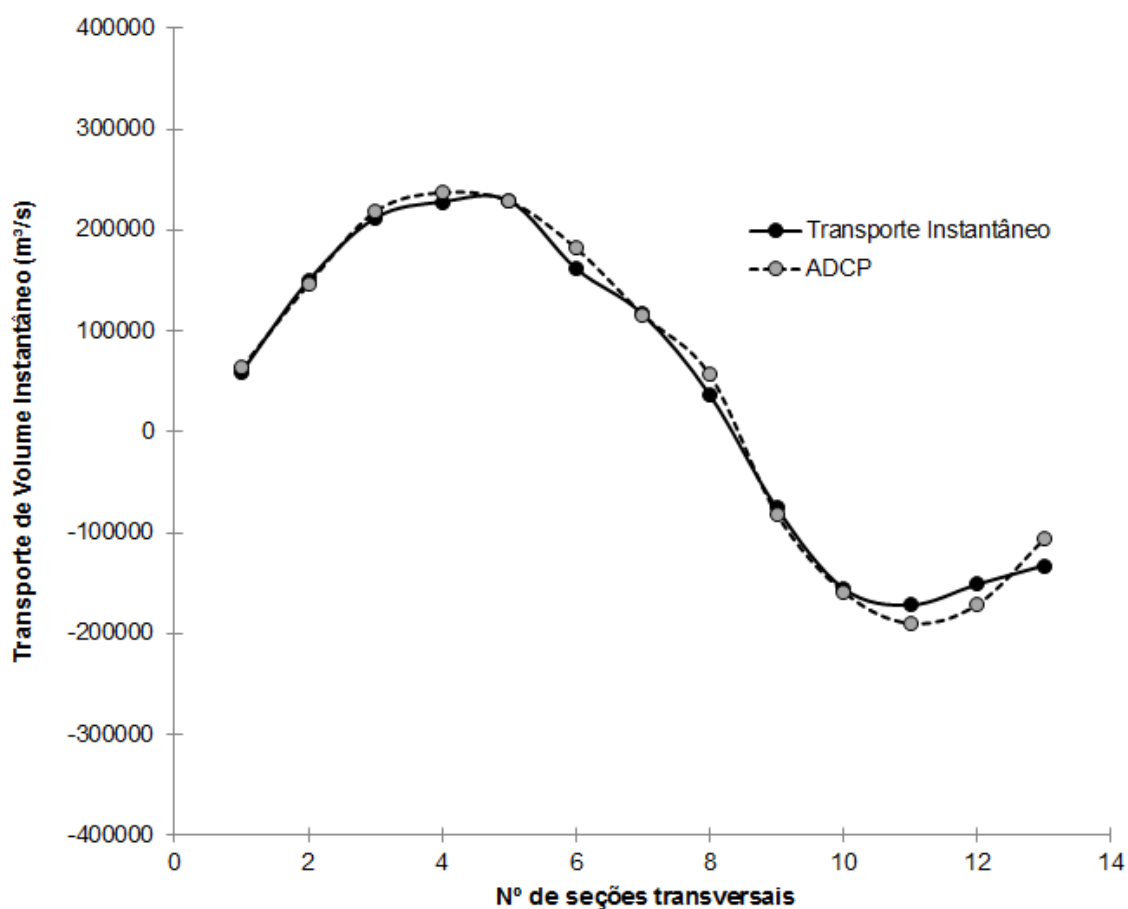
Os valores máximos para o transporte instantâneo calculado para dentro e fora do sistema foi de aproximadamente  $-290.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $320.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente (Figura 17); os valores mínimos de importação e exportação do sistema foram de  $-250 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $70.900 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para o ADCP, os transportes máximos foram de  $-321.000 \text{ m}^3/\text{s}$  entrando e  $330.000 \text{ m}^3/\text{s}$  saindo do estuário; os mínimos foram de  $-128.500 \text{ m}^3/\text{s}$  para importação e  $97.100 \text{ m}^3/\text{s}$  para exportação.

Figura 13 - Curva dos transportes instantâneos calculados e dos retirados diretamente do ADCP, para a campanha do dia 14 de maio de 2011.



Para a segunda campanha (Figura 18), os valores máximos e mínimos para o transporte instantâneo calculado para dentro do estuário foram de  $-171.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-75.300 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente; para o ADCP esses valores foram de  $-200.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-81.100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os resultados de máximos e mínimos do transporte calculado para fora do sistema foram de  $229.100 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $59.599 \text{ m}^3/\text{s}$ ; os valores do ADCP foram de  $237.200 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $56.600 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

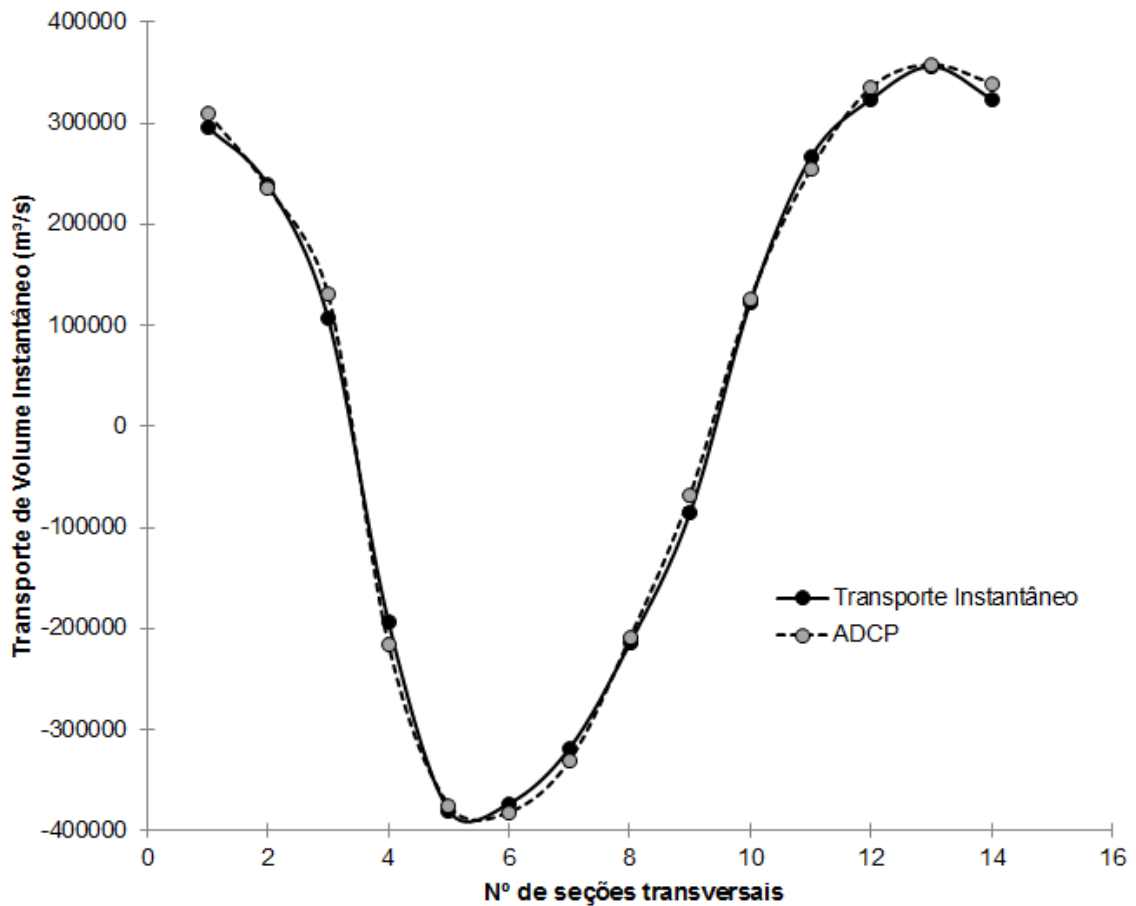
Figura 18 - Curva dos transportes instantâneos calculados e dos retirados diretamente do ADCP, para a campanha do dia 20 de setembro de 2011.



Na última campanha de Junho de 2013 (Figura 19), os resultados de máximos e mínimos de transporte calculado para o fluxo de importação do estuário foram de  $-380.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-85.300 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Os mesmos valores apresentados pelo ADCP foram de  $-381.700 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-67.400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por outro lado, os transportes instantâneos máximos e mínimos de exportação que foram calculados foram de

356.200 m<sup>3</sup>/s e 107.000 m<sup>3</sup>/s; para o ADCP esses valores foram de 358.100 m<sup>3</sup>/s e 126.200 m<sup>3</sup>/s.

Figura 14 - Curva dos transportes instantâneos calculados e dos retirados diretamente do ADCP, para a campanha do dia 25 de junho de 2013.



A tabela a seguir exibe os valores dos transportes instantâneos ao final de cada *transect* para o ADCP e o cálculo próprio. Os resultados da tabela são comparativos às curvas exibidas anteriormente dos transportes instantâneos.

Tabela 5 – Transportes instantâneos calculados em comparação com o proveniente do ADCP, em m<sup>3</sup>/s para as três campanhas.

Transporte (m <sup>3</sup> /s)	Maio/2011		Setembro/2011		Junho/2013	
	Calculado	ADCP	Calculado	ADCP	Calculado	ADCP
	-258.726	-271.579	59.506	63.371	296.522	310.420
	-290.837	-321.543	150.116	146.279	239.111	236.456
	-278.062	-310.59	212.092	218.379	107.029	130.478
	-221.304	-222.329	228.018	237.227	-193.378	-215.616
	-118.71	-128.509	229.139	228.693	-380.065	-374.780
	-250	10.526	162.03	182.185	-373.15	-381.728
	140.349	126.856	116.517	116.165	-318.526	-330.622
	244.782	247.257	36.776	56.61	-214.691	-209.446
	294.983	311.691	-75.346	-81.18	-85.334	-67.418
	320.104	329.906	-155.219	-158.595	123.23	126.203
	303.243	330.059	-171.769	-189.965	266.16	254.185
	290.846	298.671	-151.193	-171.39	323.841	335.451
	257.005	275.453	-132.541	-106.385	356.227	358.171
	193.237	197.659			284.11	339.503
	70.903	97.117				

As tabelas a seguir apresentam com detalhes os valores das componentes longitudinais ( $\bar{u}$ ) adimensionais, as áreas em cada seção, o valor do transporte instantâneo e a duração em minutos de cada *transect* realizado, para as três campanhas.

Tabela 6 - Valores de  $\bar{u}$  calculado em profundidades e larguras adimensionais, área de cada seção, transporte instantâneo e duração dos transects para a campanha do dia 14 de maio de 2011.

<b>1ª Campanha - Maio / 2011</b>			
<b>u interpolado (m/s)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Transporte Instantâneo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>duração (minutos)</b>
-0,80	319.690,51	-258.726	40,1
-0,92	313.804,86	-290.837	51,5
-0,85	324.404,69	-278.062	36,6
-0,70	313.947,37	-221.304	69,5
-0,37	315.474,71	-118.71	35,9
-0,001	169.904,55	-250	44,5
0,46	305.052,06	140.349	40,0
0,77	316.485,13	244.782	52,4
0,92	317.271,02	294.983	41,8
1,05	303.867,61	320.104	48,0
0,97	312.398,56	303.243	41,2
0,96	302.363,32	290.846	47,2
0,81	313.713,01	257.005	40,2
0,66	292.561,19	193.237	52,2
0,22	316.232,14	70.903	35,6

Tabela 7 - Valores de  $\bar{u}$  calculado em profundidades e larguras adimensionais, área de cada seção, transporte instantâneo e duração dos transects para a campanha do dia 20 de setembro de 2011.

<b>2ª Campanha - Setembro / 2011</b>			
<b>u interpolado (m/s)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Transporte Instantâneo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>duração (minutos)</b>
0,19	310.101,79	59.506	46,3
0,47	313.138,26	150.116	56,5
0,68	311.664,28	212.092	45,3
0,72	315.333,09	228.018	60,9
0,75	304.833,68	229.139	56,5
0,49	324.804,53	162.03	60,4
0,38	304.966,98	116.517	48,5
0,11	318.734,66	36.776	61,8
-0,24	308.632,23	-75.346	52,9
-0,48	321.357,58	-155.219	57,0
-0,57	301.206,6	-171.769	55,4
-0,46	322.287,88	-151.193	54,3
-0,43	308.000,7	-132.541	52,1

Tabela 8 - Valores de  $\bar{u}$  calculado em profundidades e larguras adimensionais, área de cada seção, transporte instantâneo e duração dos transects para a campanha do dia 25 de junho de 2013.

<b>3ª Campanha - Junho / 2013</b>			
<b>u interpolado (m/s)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Transporte Instantâneo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>duração (minutos)</b>
0,93	316085,57	296.522	43,63
0,77	309186,64	239.111	58,16
0,33	319142,57	107.029	40,08
-0,59	325046,48	-193.378	92,83
-1,13	333412,86	-380.065	47,22
-1,12	333077,16	-373.15	67,31
-0,95	332184,98	-318.526	38,40
-0,64	332196,87	-214.691	60,17
-0,29	285613,77	-85.334	42,24
0,38	317807,35	123.23	57,15
0,82	324519,16	266.16	43,53
1,04	310004,33	323.841	52,11
1,1	322625,12	356.227	42,19
0,93	302854,58	284.11	64,81

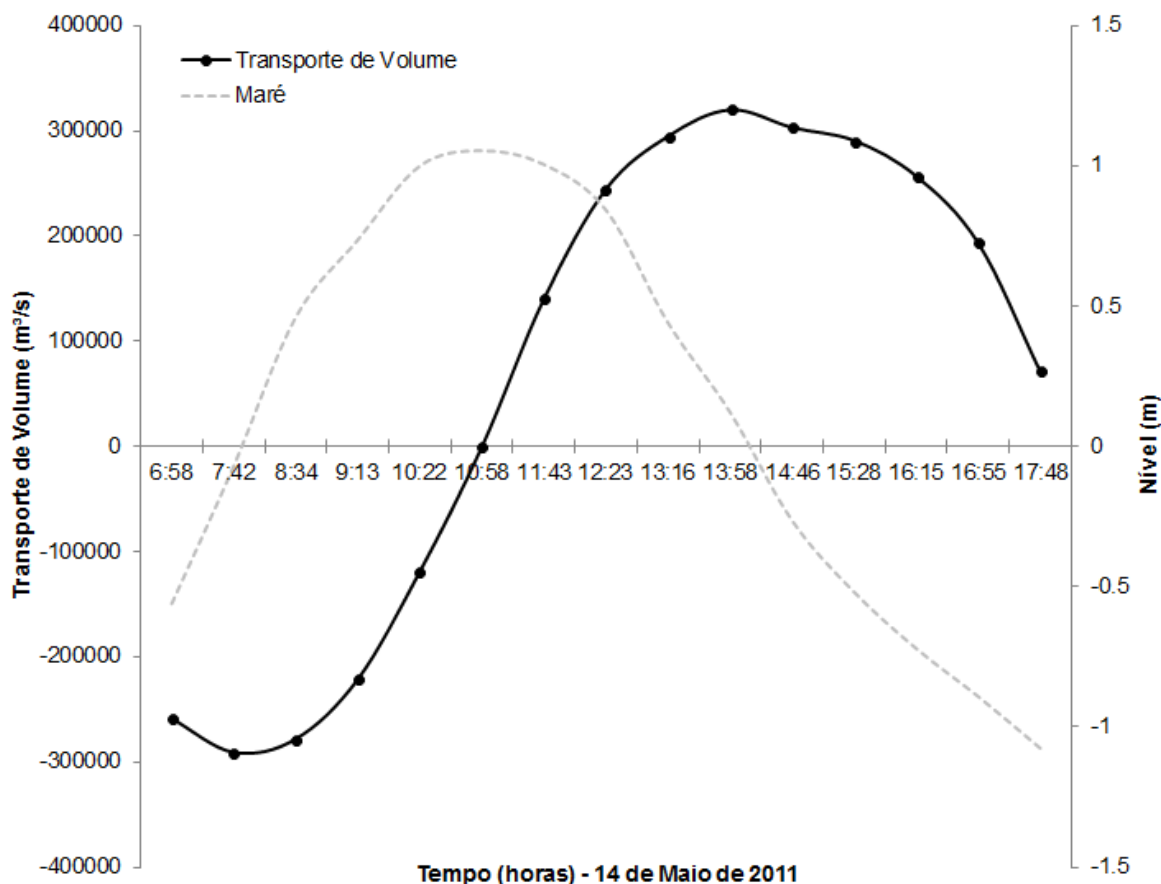
Os transportes de volume instantâneos calculados também foram plotados juntamente com a curva de maré ao longo do tempo de medição em cada campanha. Este parâmetro para a região possui um caráter semidiurno, com amplitude aproximadamente igual a 2 m e com duração de vazante maior que a enchente em 2 h, sendo observadas enchentes de 5 h e vazantes com duração de 7 h, em média.

Na primeira campanha (Figura 20), a medição começou durante o início da enchente e terminou no final da vazante, sendo que a mudança de um estágio para o outro (preamar) ocorreu às 11 h, no mesmo momento em que o fluxo inverteu a direção.

A soma das parcelas de fluxo que entraram no sistema foi de aproximadamente  $-1.167.800 \text{ m}^3$ , com duração de 4 h e apresentando um valor máximo de transporte instantâneo às 7:40 h. Por outro lado, as parcelas de fluxo que foram exportadas do estuário totalizou  $2.115.400 \text{ m}^3$ , ou seja, 55% maior em relação ao total da descarga de importação, em um período de 6:45 h de duração e com um

valor máximo observado às 14 h. As taxas de variação temporal da descarga foram de  $-291.900 \text{ m}^3/\text{hora}$  para o período de enchente e  $313.400 \text{ m}^3/\text{hora}$  para a vazante.

Figura 150 - Curvas de transporte instantâneo e nível da água gerado pela análise harmônica ao longo do tempo de medição para a primeira campanha, período chuvoso.

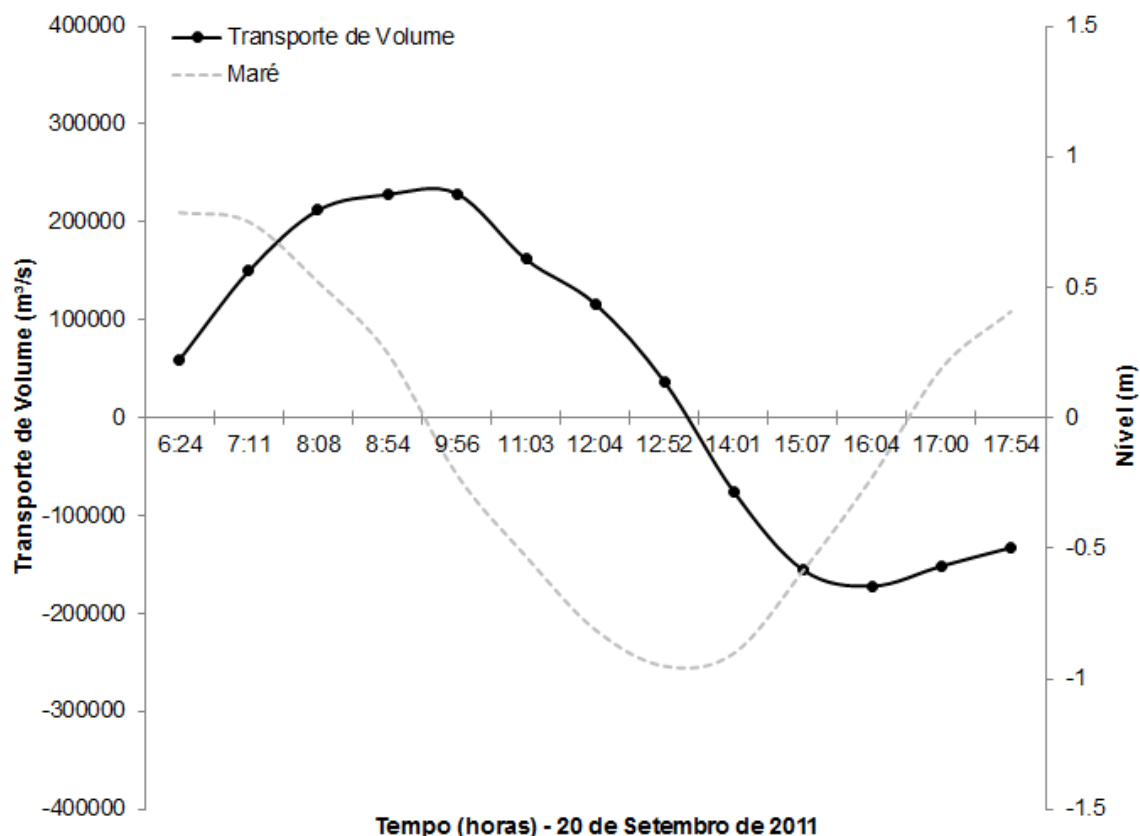


A variação do transporte de volume instantâneo com a curva de maré para a segunda campanha é exibida na Figura 21. A medição iniciou no final da preamar e terminou no final da enchente. A mudança observada entre os estágios de vazante e enchente (baixa-mar) ocorreu aproximadamente às 14 h, mesmo instante em que houve mudança da direção do fluxo.

A somatória das descargas de importação foi de  $-686.000 \text{ m}^3$ , com duração de 4 h e com o máximo valor observado às 16 h. O total das parcelas de exportação foi de  $1.194.200 \text{ m}^3$ , 57% maior que o total de importação, com duração de 7 h e maior descarga observada às 10 h. A taxa de transportes durante o estágio de

enchente (importação) foi de  $-171.500 \text{ m}^3/\text{hora}$  e para a vazante (exportação) de  $170.600 \text{ m}^3/\text{hora}$ .

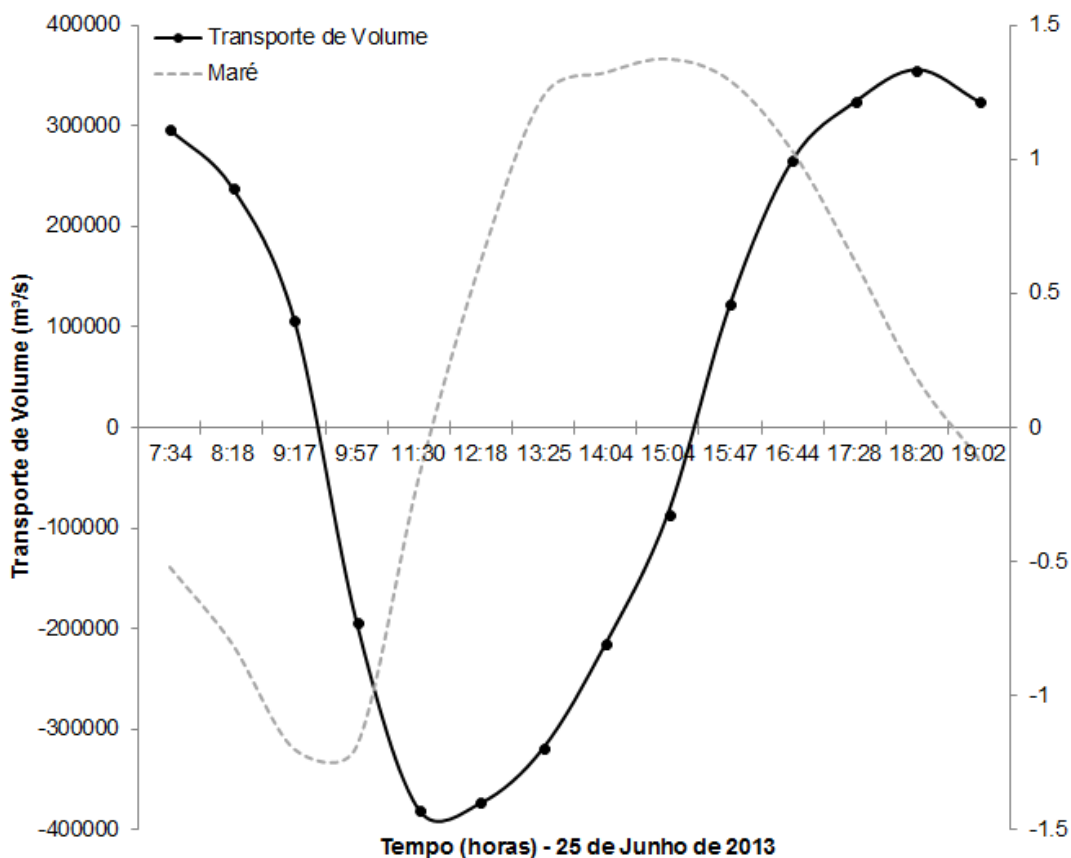
Figura 21 - Curvas de transporte instantâneo e nível da água gerado pela análise harmônica ao longo do tempo de medição para a segunda campanha, período seco.



Na última campanha (Figura 22), a medição se iniciou no final da vazante, podendo ser observada duas mudanças nos estágios da maré, sendo uma baixa-mar às 9:30 h e uma preamar às 15 h. As mudanças na direção do fluxo acompanharam as transições dos estágios de estufa de baixa-mar e preamar.

A descarga total de importação de água do sistema foi de  $-1.565.100 \text{ m}^3$ , ao longo de 5 h de duração e com valor máximo às 11:30 h. A soma das parcelas de exportação do sistema estuarino foi 22% maior que o de importação, com o valor de  $1.996.200 \text{ m}^3$ , com duração de 5,33 h e com o máximo de descarga às 18:20 h. As taxas de variação temporal da descarga durante a enchente foi de  $-313.000 \text{ m}^3/\text{hora}$  (importação) e  $347.100 \text{ m}^3/\text{hora}$  para a vazante (exportação).

Figura 22 - Curvas de transporte instantâneo e nível da água gerado pela análise harmônica ao longo do tempo de medição para a terceira campanha, período de transição entre seco e chuvoso.



Os valores máximos observados para o transporte instantâneo de volume são referentes à terceira campanha:  $-380.000 \text{ m}^3/\text{s}$  para importação e  $356.200 \text{ m}^3/\text{s}$  para exportação. Já os valores mínimos de transporte, foram verificados que, para a importação de água, a primeira campanha apresentou o valor de  $-250 \text{ m}^3/\text{s}$ ; para o fluxo de exportação, a segunda campanha exibiu o valor de  $59.599 \text{ m}^3/\text{s}$ . É possível observar que a diferença entre os máximos de transporte instantâneo de importação e exportação é pequena. Porém, o valor mínimo de exportação é cerca de 230% maior em relação ao de importação.

As maiores taxas de variação da descarga ocorreram na terceira campanha, em que a taxa de variação temporal da enchente foi de  $-313.000 \text{ m}^3/\text{hora}$  (importação) e  $347.100 \text{ m}^3/\text{hora}$  para a vazante (exportação).

Os resultados exibidos foram gerados por meio de um tratamento de dados em laboratório com a finalidade de filtrar erros associados à amostragem. Foram

realizadas interpolações dos dados para a superfície, margens e fundo, regiões nas quais o ADCP não fornece informações, devido aos seus *Blank's*. Isso explica a pequena diferença entre as curvas de transporte instantâneo que foi calculada e a proveniente do ADCP, em que é possível verificar que o dado bruto do equipamento sobrestima os valores de transporte em até 5%. Valores próximos nessa diferença foram encontrados por Genz et al (2010) – 5,5% - ao criarem um pacote de rotinas para processamento de dados de ADCP, denominado *ProcED*.

O processamento dos dados brutos gera resultados menores que os apresentados pelo ADCP/WinRiver©, pois as rotinas criadas utilizam conceitos físicos para tratamento numérico dos dados, fornecendo embasamento teórico ao resultado, com o objetivo de evitar que se realize um processamento meramente matemático das informações coletadas. É natural que no decorrer do processamento, como os dados são manipulados por meio de programações baseadas em conceitos físicos e submetidas a métodos matemáticos e computacionais, o resultado gerado apresente valores diferentes dos observados pelo software de leitura inicial dos dados.

O cálculo adimensional dos parâmetros hidrodinâmicos é um procedimento importante para gerar resultados confiáveis. Contudo, a manipulação matemática dos dados é uma tarefa que deve ser executada através de métodos compatíveis à natureza da amostragem. Silva (2009), no estuário do rio Amazonas, interpolou linearmente os seus dados de descarga com a finalidade de completar um ciclo. Como se trata de uma grandeza contínua, uma interpolação linear da curva da descarga agrega erros ao resultado gerado, sendo, portanto, um procedimento não aconselhável.

## 7.2 TRANSPORTE x MARÉ

O resultado obtido por meio da relação entre o transporte de volume e o nível da água é útil para esclarecer como se dá o comportamento da onda de maré através das seções transversais.

Quando o topo da curva gerada possui uma linha inclinada, o resultado se refere a uma onda progressiva, de modo que a velocidade máxima ocorre no maior nível da maré. Por outro lado, quando o topo da curva é boleado, tem-se uma onda estacionária, quando a velocidade máxima é alcançada no nível zero da maré (DYER, 1997).

Geralmente, o comportamento da co-oscilação da onda de maré em estuários é de carácter misto, com diferenças de alturas entre preamares e baixa-mares. Essa característica resulta na formação de uma elipse na relação transporte de volume com o nível da água, típico de ambientes com regime semidiurno (DYER, 1997). Este fato associado aos resultados apresentados nas Figuras 23, 24 e 25, reforça o carácter semidiurno da maré e a credibilidade dos dados coletados.

Figura 23 - Diagrama nível da água e transporte de volume ao longo do tempo de medição para a campanha de maio de 2011.

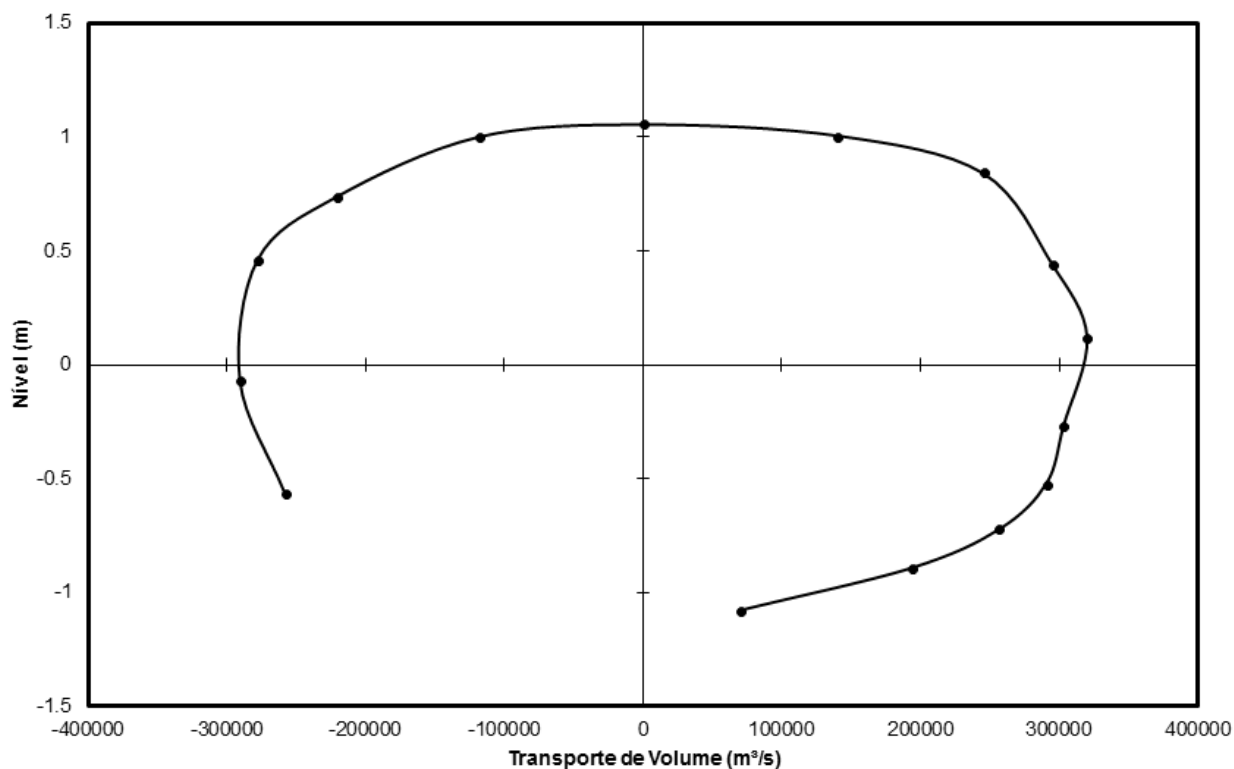


Figura 24 - Diagrama nível da água e transporte de volume ao longo do tempo de medição para a campanha de setembro de 2011.

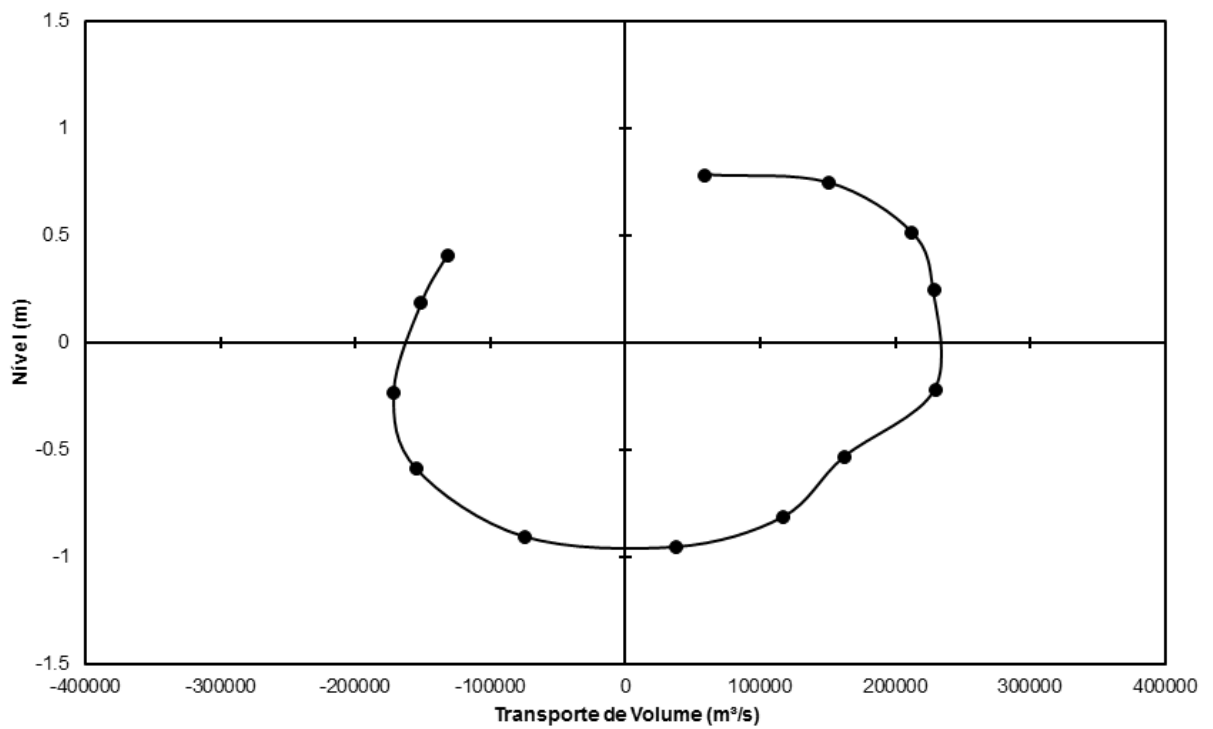
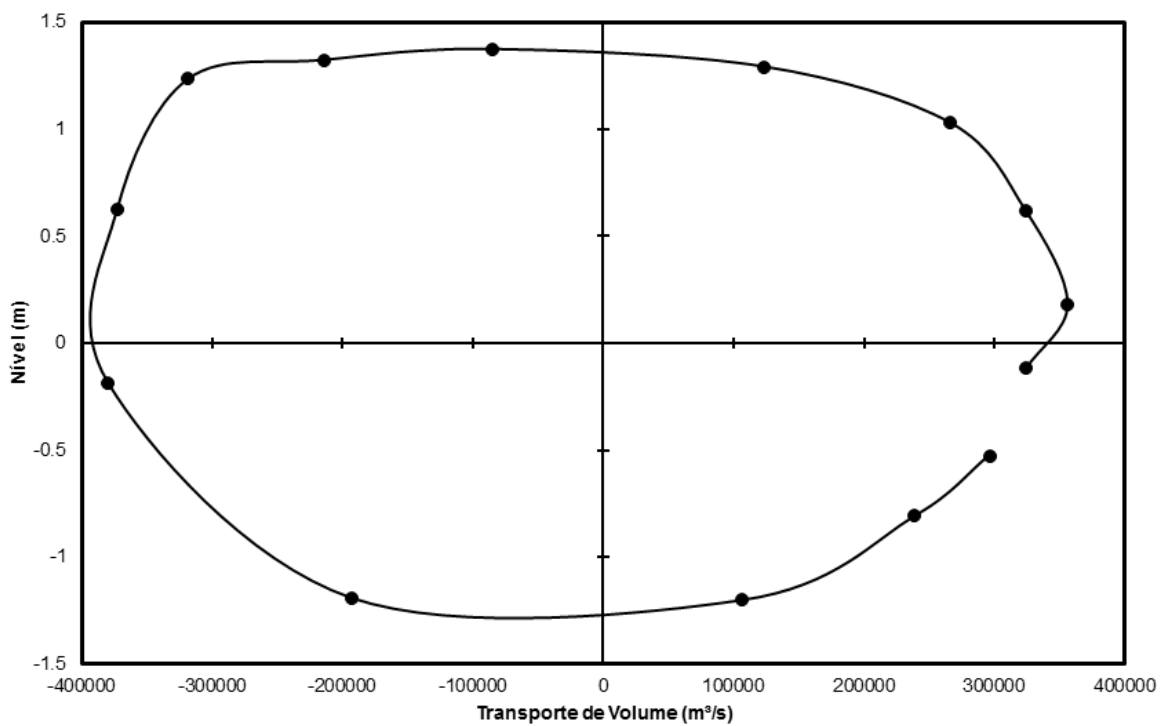


Figura 25 - Diagrama nível da água e transporte de volume ao longo do tempo de medição para a campanha de junho de 2013.



Os resultados obtidos através da interpretação da relação entre o transporte de volume com a variação no nível da água corroboram com as classificações citadas anteriormente. A curva em forma de elipse reforça a característica da maré a respeito do padrão de onda mista para a área de estudo, apresentando caráter progressivo e estacionário.

A relação também exhibe que os maiores valores de transporte instantâneo para as três campanhas, são observados na última medição, em Junho de 2013. Este fato faz com que a elipse gerada para a terceira campanha seja mais larga em relação às outras. O ciclo não foi completo totalmente para a primeira campanha e a segunda campanha, durante a enchente e vazante, respectivamente.

Schettini e Miranda (2010) utilizaram essa relação para o estuário de Caravelas, na Bahia em duas seções. A elipse gerada demonstrou um caráter progressivo da onda de maré mais evidente ao comparado com o presente trabalho. Isso se deve ao fato de que as seções estudadas no estuário de Caravelas são mais próximas à plataforma continental adjacente, além de apresentar larguras do canal menores. O cálculo da integral discretizada para determinação do transporte de volume resultante (equação 4) também foi realizado no trabalho, porém, o fluxo resultante nesse tipo de ambiente costeiro sofre influência de outros processos físicos como a circulação gravitacional e maior ação dos ventos.

### **7.3 Balanço de volume**

O balanço de volume é dado pela soma entre todas as parcelas do transporte instantâneo de volume, incluindo as parcelas negativas (importação de água) e positivas, referentes à exportação de água (Tabela 9). Este resultado é apresentado em  $m^3$ , pois é referente apenas às parcelas de volume para dentro e fora do sistema, ao longo do tempo de medição.

Tabela 9 - Valores de balanço de volume referentes aos transportes calculados e os provenientes diretamente do ADCP ao longo do tempo de medição.

Campanha	Balanço de Volume (m <sup>3</sup> )	
	Transporte Calculado	ADCP
<b>Maio / 2011</b>	947.567	970.647
<b>Setembro / 2011</b>	508.128	541.395
<b>Junho / 2013</b>	431.087	511.256

De acordo como os resultados exibidos na tabela 9, o balanço de volume calculado ao longo de um ciclo de maré local possui apenas valores positivos (exportação de água) e é inferior que o resultado extraído do ADCP para todas as três campanhas.

É possível observar que os resultados seguem um padrão vinculado à sazonalidade das medições, de modo que o final do período chuvoso (primeira campanha) apresentou o maior valor (947.567 m<sup>3</sup>), provavelmente devido ao maior índice de pluviosidade e menor intensidade dos ventos entre as campanhas. Em seguida, um resultado intermediário de 508.128 m<sup>3</sup> referente ao período seco (Setembro de 2011); esse valor é possivelmente um produto da maré de quadratura (com menor amplitude), maior intensidade dos ventos e os baixos níveis de precipitação, que diminuíram o balanço de volume, porém, não reduziu demasiadamente o valor de exportação de água do sistema. A última campanha (Junho de 2013), na transição do período chuvoso para o seco, apresentou o menor valor para o balanço de volume, com o valor de 431.087 m<sup>3</sup>. Ao ser comparado com a primeira campanha, foi verificado que apresentou menor precipitação e maior ação dos ventos, o que contribuiu significativamente com as parcelas de transporte instantâneo importado para o sistema estuarino. O valor inferior em relação à segunda campanha provavelmente se dá em virtude de diferenças na quantidade de seções transversais realizadas ou no regime dos ventos entre as medições, ocasionando em um número maior de parcelas de fluxo entrando no sistema com valores mais significativos em magnitude e no espaço.

#### 7.4 Transporte de volume resultante

O transporte de volume resultante é determinado de por meio de uma análise discreta de uma variável contínua em uma condição não estacionária, de modo que a média temporal dos transportes instantâneos (equação 3) representa o resultante do transporte de volume ao longo de um ciclo de maré (Tabela 9).

Tabela 10 - Valores de transporte de volume resultante ao longo do tempo de medição para as três campanhas.

<b>Campanha</b>	<b>Transporte de Volume Resultante <math>\langle Tv \rangle</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>
Maio / 2011	74.391
Setembro / 2011	45.387
Junho / 2013	10.828

Os resultados para o transporte de volume resultante corroboram com o padrão observado no balanço de volume, de modo que todos os valores de transporte resultante são positivos e, portanto, referentes à exportação do sistema. O maior valor resultante também foi encontrado para a primeira campanha (maior balanço de volume), assim como o menor foi observado para a terceira campanha (menor balanço).

O comportamento semelhante aos valores do balanço de volume já era esperado, mas somente em relação ao padrão de variação no transporte de volume entre as campanhas. A soma das parcelas de entrada e saída de água do sistema que compõem o cálculo do balanço de volume não representa uma média temporal dos transportes instantâneos, mas é capaz de evidenciar o mesmo padrão do transporte de volume resultante.

As explicações a respeito do padrão verificado nos valores da tabela 10 são as mesmas do balanço de volume, porém, o resultado do transporte de volume resultante trata-se de uma média temporal dos transportes instantâneos expressos por unidade de área da seção, gerando um valor final para o transporte ao longo de um ciclo de maré semidiurno.

A maior influência de parcelas negativas (importação) ao longo da seção para a terceira campanha pode ser observada nos resultados da variação temporal da descarga, na relação do transporte instantâneo com o nível e no campo do fluxo resultante. Esta é uma informação importante a respeito do fluxo de volume, uma vez que exhibe quais as morfologias existentes no canal são mais influentes no transporte resultante. Os fluxos negativos diminuem o valor final tanto do balanço positivo observado, como no transporte de volume resultante.

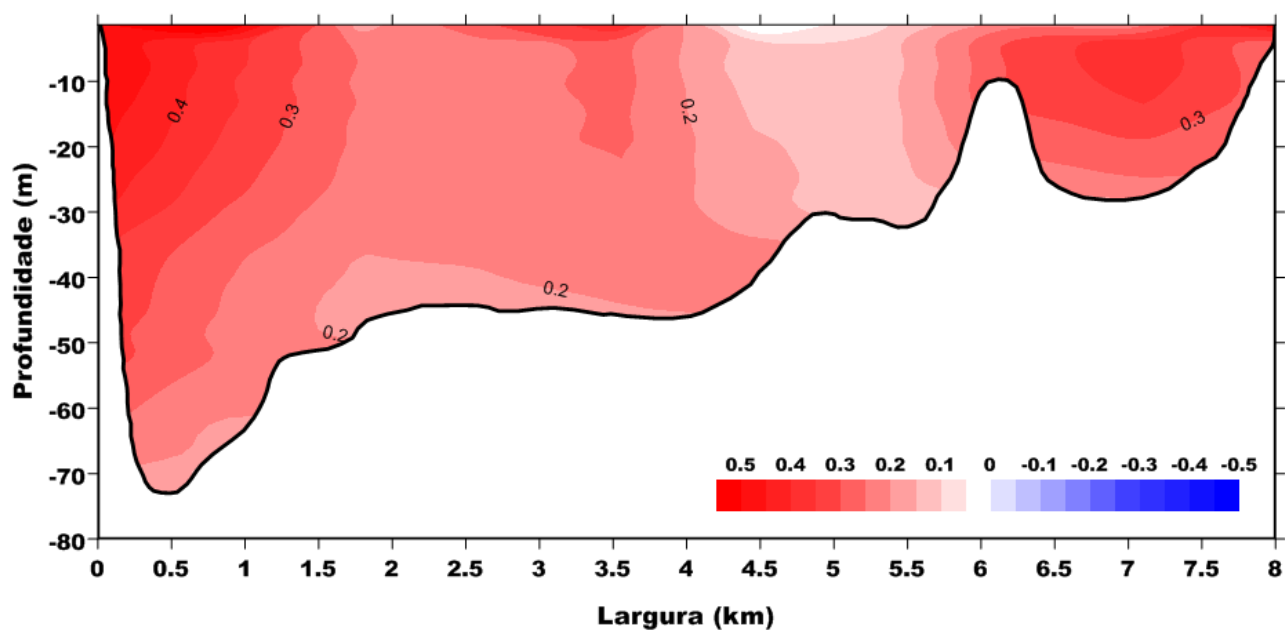
### 7.5 Fluxo de volume ( $\phi$ ) resultante

Os resultados para o fluxo de volume ( $\phi$ ) resultante ao longo do canal do rio Pará para as três campanhas são exibidos nas figuras 26, 27 e 28. É possível associar esses valores aos resultados encontrados no transporte de volume resultante, uma vez que ambos representam a variação temporal do fluxo de volume durante um ciclo de maré.

O transporte resultante é um valor único, evidenciando se houve predominância de importação ou de exportação água após os estágios de enchente e vazante. O valor de fluxo de volume é encontrado por meio da razão entre o transporte instantâneo e a área do canal para cada seção, de modo que o seu valor resultante representa a variação espacial da componente longitudinal ( $\bar{u}$ ). O fluxo de volume resultante (que pode ser representado tanto por  $\langle \bar{u} \rangle$  como também  $\langle \phi \rangle$ ) também demonstra quais são as morfologias do rio que exercem maior influência no regime do fluxo ao longo de um ciclo de maré. Este resultado também pode ser encontrado em outros trabalhos como “velocidade residual”.

O valor de transporte de volume resultante para a primeira campanha em Maio de 2011 (Figura 26) foi de 74.391 m<sup>3</sup>/s para fora do sistema (exportação de água). A margem esquerda, onde ocorrem as maiores profundidades da seção e, conseqüentemente, o canal principal, com isóbatas de aproximadamente 70 metros, demonstrou ser a principal morfologia no fluxo de volume resultante para o rio Pará.

Figura 26 - Campo resultante para o fluxo de volume ao longo da seção transversal para a primeira campanha, com os valores expressos em m/s.

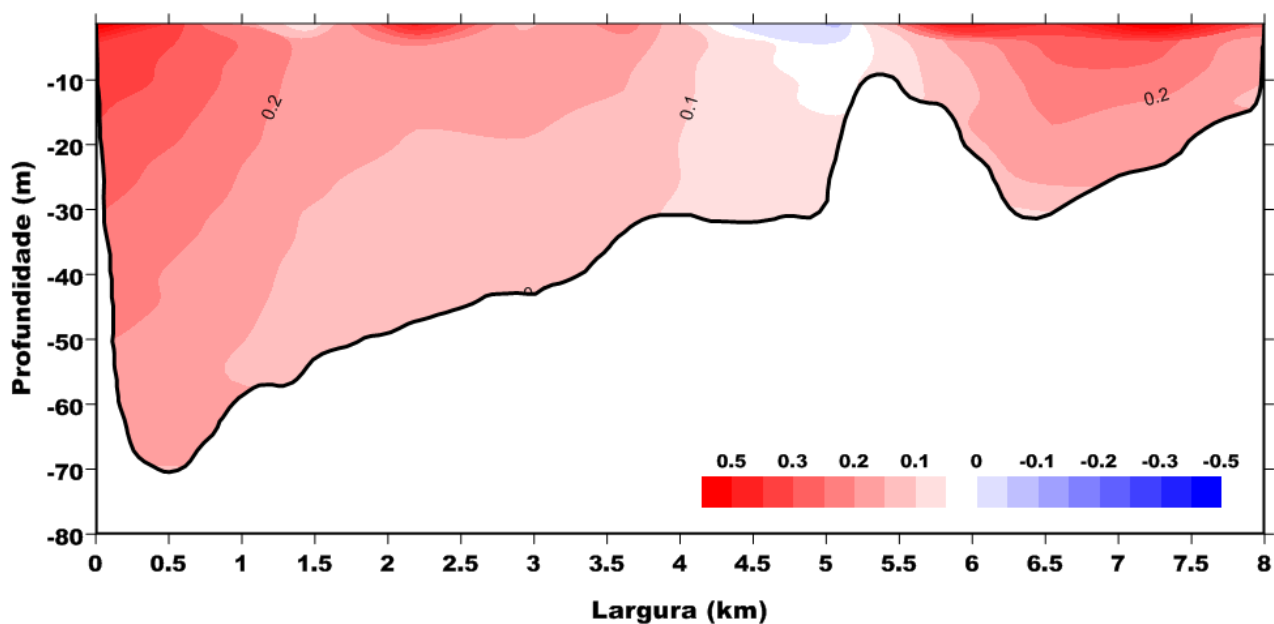


Para todas as campanhas, as maiores velocidades ao longo do canal foram verificadas nas margens do rio, assim como o fluxo em níveis superficiais são mais intensos que os próximos ao fundo.

Os valores de velocidade de corrente longitudinal (componente  $\langle \bar{u} \rangle$ ) para o canal principal foram de 0,4 m/s. Entre a margem direita e o centro do canal, são observadas as menores profundidades com a presença de um banco, atingindo as isóbatas de 10 m. São justamente nas proximidades dessa morfologia com baixas profundidades que são observadas os menores valores para o fluxo de volume resultante, com resultados de 0,1 m/s.

Para campanha de Setembro de 2011 (segunda medição), o campo resultante para o fluxo de volume também apresentou predominância nos valores de exportação de água do sistema estuarino (Figura 27), com um transporte de volume igual a 45.387 m<sup>3</sup>/s e aproximadamente 60% menor em relação à campanha do período chuvoso em Maio de 2011. Essa diminuição também pode ser verificada no resultado do campo resultante para o fluxo de volume, uma vez que apresentou valores menores para a componente longitudinal.

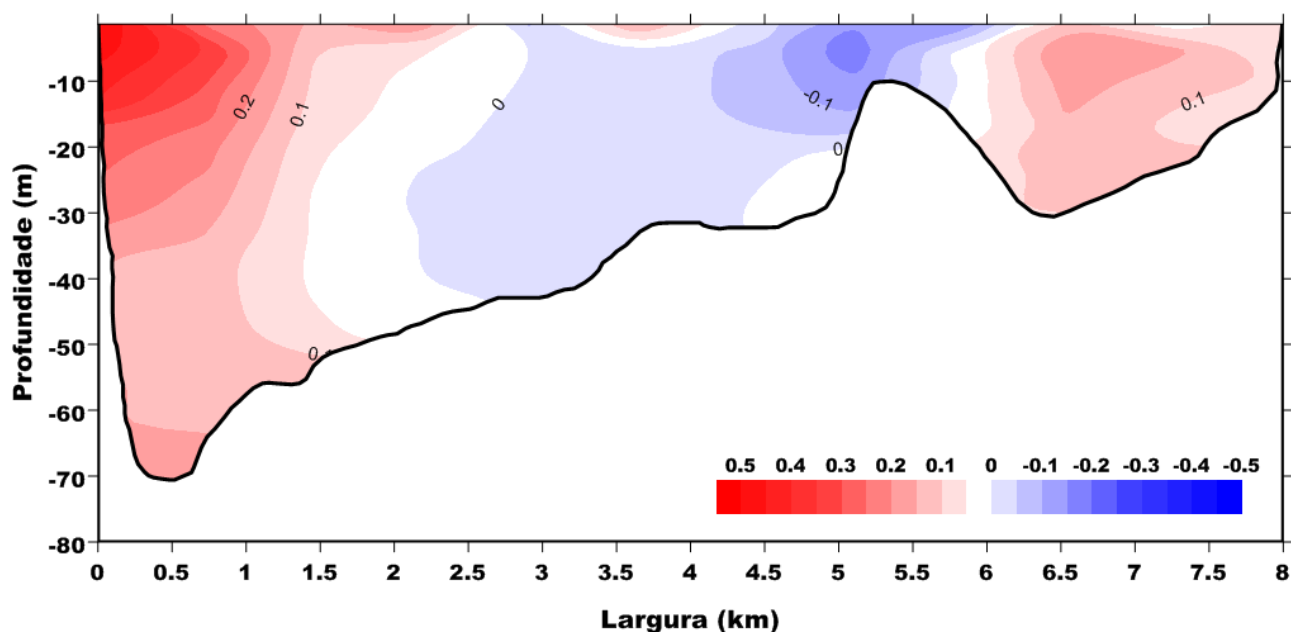
Figura 27 - Campo resultante para o fluxo de volume ao longo da seção transversal para a segunda campanha, com os valores expressos em m/s.



Novamente o canal principal situado na margem esquerda do rio Pará se apresentou como a principal morfologia, exercendo forte influência no fluxo e transporte de volume resultante, atingindo valores de até 0,3 m/s. Nos arredores do banco, nas isóbatas de 10 m, é possível observar um campo resultante nulo e os menores valores para o fluxo de exportação, com valores de 0,1 m/s e um parcela pequena de 0,05 m/s de importação.

Na última campanha, em Junho de 2013 (Figura 28), a exportação de água do sistema apresentou o seu valor mínimo para as medições realizadas, sendo aproximadamente 25% do total para o transporte da segunda campanha e apenas 15% da primeira, com um transporte de volume resultante igual a 10.828 m<sup>3</sup>/s.

Figura 28 - Campo resultante para o fluxo de volume ao longo da seção transversal para a terceira campanha, com os valores expressos em m/s.



Uma das explicações para que o transporte resultante ter sido tão inferior em relação às outras campanhas é o campo resultante para o fluxo de volume. Ao comparar os resultados das três medições, foi verificado que a última campanha apresentou valores significativos de importação para o sistema. No banco existente nas isóbatas de 10 m e no centro da seção transversal, ocorreram parcelas de fluxo entrando no sistema estuarino, com valores de 0,1 m/s, além de um campo nulo nas extremidades desse campo negativo para a componente longitudinal. Para os fluxos de exportação, as margens novamente exibiram maior influência, com os valores máximos de 0,3 m/s observados no canal principal (margem esquerda) e 0,2 m/s na margem direita da seção.

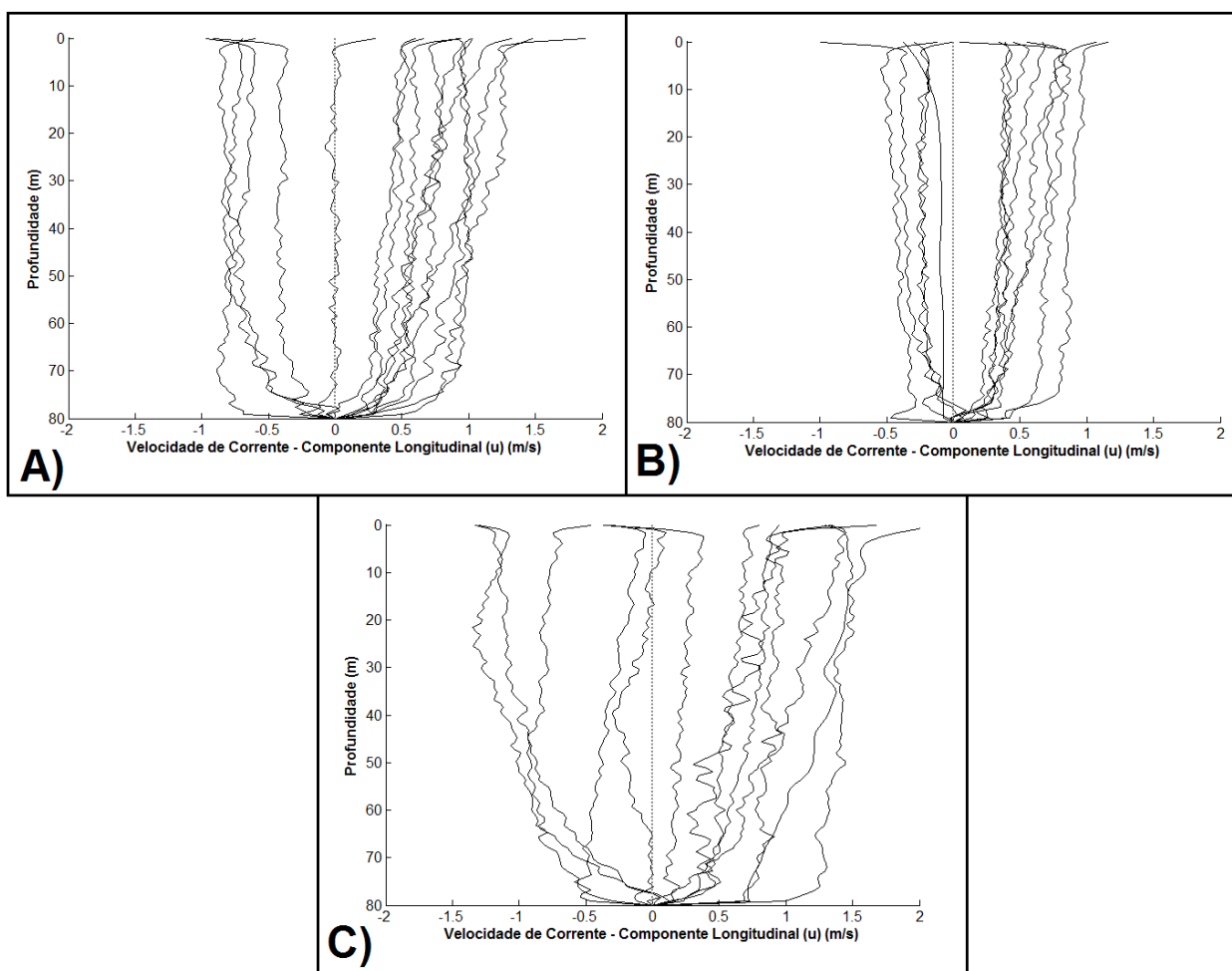
O canal principal do rio Pará para a área de estudo, situado na margem esquerda e apresentando isóbatas de 70 m, demonstrou ser a principal feição morfológica no transporte de volume resultante. Nessa morfologia foram observados os maiores valores para a velocidade de corrente longitudinal e predominância absoluta de exportação de água do sistema ao longo do tempo de medição.

A influência dos canais principais nos rios e estuários foi observada nos trabalhos de Costa (no prelo, 2014), nos rios Jacaré e Tocantins; Ferreira (2013), no

estuário do rio Paracauari, em Soure e; Schettini et al (1998), nos estuários dos rios Itapocu, Tijucas e Camboriú, no estado de Santa Catarina. No transporte de propriedades realizado pelos autores, os canais principais também demonstraram ser a morfologia que exerce maior influência nos fluxos de sedimento, material particulado em suspensão e sal. Certamente o padrão hidrodinâmico dessas feições morfológicas é decisivo no valor do transporte resultante, tanto de volume como de outras propriedades.

Foram selecionados três perfis verticais em cada seção transversal, contemplando os estágios de enchente e vazante, para as três campanhas. A partir deles, foram determinadas as médias dos perfis verticais da velocidade de corrente para a componente  $u$  no canal principal, os quais são exibidos na Figura 29.

Figura 29 - Perfis verticais da componente longitudinal  $u$  para o canal principal em cada seção ao longo do tempo de medição. (A) primeira campanha - maio de 2011; (B) segunda campanha – setembro de 2011; (C) terceira campanha - junho de 2013.



Os resultados dos perfis corroboram com o que foi apresentado pelo balanço de volume e transporte resultante, com a terceira campanha (Figura 29.C) apresentando fluxos significativos de importação de água para o sistema. O maior valor da componente longitudinal foi observado nessa campanha, assim como o maior transporte instantâneo de importação, igual a  $-380.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A análise dos perfis no canal principal permite verificar, além da influência dessa morfologia no transporte de volume, que possivelmente não há presença de circulação gravitacional gerada por diferenças de densidade na área de estudo, porém, não é possível afirmar sem um estudo de transporte de sal. Este fato converge com a classificação do estuário para o presente trabalho, caracterizado por Zona de Maré ou de Rio (KJERFVE, 1987). Portanto, a seção transversal estudada no rio Pará é interpretada como uma região que apresenta salinidade nula, mas que sofre efeitos da co-oscilação da maré, situando a área de estudo na zona de maré do rio Pará.

Nos resultados encontrados é possível verificar que houve interferência da não realização de um ciclo de maré completo, abrangendo às 13 horas de medição. No diagrama apresentado do transporte vs nível foi possível observar que alguns estágios do ciclo de maré não foram totalmente medidos, o que obviamente interferiu nos resultados apresentados, assim como o fato de somente segunda coleta ter sido realizada durante uma maré de quadratura. Entretanto, padrões e tendências foram observados nos diferentes períodos em que ocorreram as medições, de modo que o esforço do processamento gerou resultados satisfatórios dentro das condições em que foram realizadas as coletas.

O estudo dos parâmetros hidrodinâmicos possui diferentes métodos de aquisição e tratamento dos dados. Esse fato se deve à ampla variedade dos ambientes continental-estuarinos e costeiros que ocorrem em todo o mundo e que exigem diferentes métodos de amostragem e análise.

A largura média entre as margens do rio Pará para a região de estudo é de aproximadamente 8 km, fato que comprova a grandiosidade do estuário estudado no presente trabalho. Em virtude de suas dimensões, uma medição pontual seria impraticável, uma vez que seriam necessários diversos aparelhos dispostos

transversalmente ao canal e verticalmente ao longo da coluna d'água, proporcionando dados limitados no espaço e um consumo elevado de tempo.

É importante ressaltar que os resultados gerados são representações de processos naturais, em que seus fenômenos são contínuos. Nesse contexto, os métodos científicos no âmbito da oceanografia física buscam obter informações discretas no tempo e espaço, o que permite descrever e analisar padrões observados nesses processos. Portanto, os erros associados à amostragem são inevitáveis como, por exemplo, os erros do ADCP e GPS, a oscilação da embarcação, variação no tempo de duração das seções e *transects* em trajetórias diferentes.

A medição de descarga dos ambientes estuarinos por meio de seções transversais ao canal ainda é a melhor forma de estimar o transporte de volume e propriedades (como o sal, sedimento e nutrientes). Em sistemas de menor porte em comparação à área de estudo, é possível ainda minimizar os cálculos e o esforço amostral considerando como representativo da seção apenas um perfil vertical no canal principal (MIRANDA et al., 2002).

## 8 CONCLUSÕES

Os valores máximos referentes ao transporte instantâneo de volume foram observados na terceira campanha, com  $-380.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $356.200 \text{ m}^3/\text{s}$ , para dentro e fora do estuário, respectivamente.

Os menores valores de transporte instantâneo para dentro e fora do estuário foi observado na primeira e na segunda campanha, respectivamente. Com resultados de  $-250 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $59.599 \text{ m}^3/\text{s}$ .

As diferenças entre os valores máximos de transporte de volume instantâneo de exportação e importação são pequenas. Porém, a diferença entre os valores mínimos para dentro e fora do estuário é grande, com o valor de exportação mínimo 230% maior em relação ao de importação.

Os resultados do diagrama do transporte de volume com a maré evidenciaram que somente a medição referente à terceira campanha abrangeu de fato um ciclo completo de maré. As análises dos diagramas reforçam a importância de exatas 13 horas de medição ou, melhor ainda, 25 horas, o que permitiria comparar estágios da maré consecutivos em ciclos adjacentes.

O balanço de volume e o transporte de volume resultante não foram referentes a um ciclo de maré completo (exceto para a terceira campanha), mas sim ao tempo de medição.

O fluxo de volume resultante exibiu que o canal principal, com profundidade de 70 metros, foi a principal morfologia atuante no transporte de volume para fora do estuário, com as maiores velocidades de corrente observadas durante a vazante para a terceira campanha. A maior velocidade de corrente durante a enchente também foi observada na mesma campanha.

O processamento desenvolvido no trabalho gerou resultados satisfatórios. Como foram realizadas interpolações dos dados para a superfície, margens e fundo, regiões nas quais o ADCP não fornece informações devido aos seus *Blank's*, foi observada uma pequena diferença entre as curvas de transporte instantâneo que foi calculada e a proveniente do ADCP, em que é possível verificar que o dado bruto do equipamento sobrestima os valores de transporte em até 5%.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a continuidade a este estudo e outros trabalhos futuros, com a finalidade de propor melhorias ao método para a determinação do transporte, sugere-se aumentar o período amostral para 25 horas de medição, pois assim seria possível abranger dois ciclos consecutivos de maré, melhorando as interpretações da relação fluxo vs nível de maré, ou mesmo completar rigorosamente o tempo referente a um ciclo de maré, com medições mais criteriosas em relação às 13 horas de coleta; verificar a possibilidade de um “indicador hídrico” para a área de estudo, estipulando um corpo d’água de menor porte, no qual se pudesse estabelecer uma relação para se estimar a descarga de sistemas adjacentes maiores; associar os valores de transporte de volume com outras propriedades, por exemplo, para determinação do transporte de sedimento e; utilização de modelos hidrodinâmicos para simulação de condições extremas de maré, regimes de ventos e descarga.

Sobre o método de amostragem para corpos d’água de grande porte, como o estuário do presente trabalho, sugere-se ainda um maior critério no deslocamento da embarcação durante a medição. O *ProcED* (GENZ et al., 2010) demonstrou ser um bom pacote de processamento de dados de ADCP, porém, os métodos de interpolação do programa dependem de um dado gerado em seções relativamente retas. De fato, diferentes trajetos realizados em cada seção transversal dificulta o tratamento de dados, de modo que o esforço em manter um deslocamento constante e retilíneo certamente gera dados amostrais satisfatórios e mais fáceis de processar em laboratório. Entretanto, a programação que foi gerada no processamento dos dados demonstrou resultados satisfatórios em relação à interpolação horizontal, independente da trajetória da embarcação.

A rotina desenvolvida durante o processamento de dados do trabalho realiza o cálculo adimensional tanto na profundidade como na largura, sem depender necessariamente de uma seção retilínea. Porém, depende das coordenadas geográficas ao longo de cada *transect* para conseguir realizar as interpolações, o que torna o uso do GPS acoplado ao ADCP um procedimento importante para o pleno funcionamento da rotina elaborada.

## REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **Paisagens de Exceção: O Litoral e o Pantanal Mato-Grossense: Patrimônios Básicos.** Ateliê editorial. Brasil, São Paulo. 2006.

AB'SÁBER, A. N. Zoneamento Fisiográfico e Ecológico do Espaço Total da Amazônia Brasileira. **Estudos avançados**, v. 24, n. 68, 2010.

ABREU, M. W. M. **Aplicação do Modelo Hidrodinâmico no Estuário do Rio Caeté (NE do Pará).** 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém. 2008.

AQUINO, S., LATRUBESSE. E. M., SOUZA-FILHO. E. E. Caracterização Hidrológica e Geomorfológica dos Afluentes da Bacia do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 1, 2009.

ASP, N. E., SCHETTINI. C. A. F., SIEGLE. E., SILVA. M. S., BRITO. R. N. R. The Dynamics of a Frictionally-Dominated Amazonian Estuary. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 60, n. 3, p. 391-403, 2012.

ALVES, D. S. C. **Caracterização Termohalina da Região Norte do Brasil.** 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Geociências, Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

ALVES, M. A. M. S. **Morfodinâmica e Sedimentologia da Praia de Ajuruteua – NE do Pará. Modelagem Hidrodinâmica na Circulação do Estuário do Rio Maracanã (NE do Pará).** 2001. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém. 2001.

BALTAZAR, L.R.S. **Contribuições ao Entendimento dos Processos Oceanográficos Físicos da Baía de Marajó-PA em final de período seco.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Geociências. Faculdade de Oceanografia. Universidade Federal do Pará. Belém. 2009.

BARBOSA, L. P. F. **Aplicação de Modelagem Hidrodinâmica na Circulação do Estuário do Rio Maracanã (NE do Pará).** 2008. Dissertação (Mestrado em Geoquímica) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém. 2008.

BARBOSA, V. M., GREGÓRIO. A. M. S., BUSMAN. D. V., COSTA. R. A. A. M., SOUZA-FILHO. P. W. M., PEREIRA. L. C. C. Estudo Morfodinâmico Durante uma Maré Equinocial de Sízigia em uma Praia de Macromaré do Litoral Amazônico (Praia de Ajuruteua-PA, Brasil). **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 60-61, p. 31-43. 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**, v. 10, n. 1, 1994.

BEZERRA, M. O., MEDEIROS, C., KRELLING A. P. M., ROSÁRIO, R. P., ROLLNIC, M. **Physical oceanographic behavior at the Guama/Acara-Moju and the Paracauari river mouths, Amazon coast (Brazil)**. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, n. 64, p. 1448-1452, 2011.

BOCK, C. S., ASSAD, L. P. F., LANDAU, L. Influence of Bottom morphology on the hydrodynamics of Guajará Bay (Amazon, Brazil). **Journal of Coastal Research**. Special Issue n. 64, p. 981-985, 2011.

BOULHOSA, M. B. M. **Morfologia, Sedimentologia e Índices de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo na Região Portuária de Vila do Conde – Barcarena – PA**. Relatório do Programa de Capacitação Institucional - PCI/MPEG. 2007.

BORBA, T. A. C. ; PRESTES, Y. O. ; MELLO, L. H. ; ROLLNIC, M. Variação Sazonal do Regime de ondas em uma Praia da Zona Costeira Amazônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 5., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: AOCEANO, 2012.

CAMERON, W.M., PRITCHARD, D.W. Estuaries. In: HILL, M.N. (ed.) **The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas**. New York, 1963.

CAVALCANTE, G. H., KJERFVE, B., KNOPPERS, B., FEARY, D. A. Coastal Currents Adjacent to the Caeté Estuary, Pará Region, North Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, n. 88, p. 84-90, 2010.

CORDEIRO, C. A. **Estudo (Salinização no Estuário do Rio Pará no trecho Belém-Mosqueiro)**. 1987. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém. 1987.

COSTA, M. S. (no prelo). **Aporte Hídrico e do Material Particulado em Suspensão para a baía do Marajó: Influência dos rios Amazonas e Tocantins**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém. 2014.

COSTA, J. B. S. A neotectônica da Amazônia. Simpósio de Geologia da Amazônia, 5. Belém. **Boletim de resumos expandidos e guia de excursões**. Belém. SBG. p. 35-38, 1996.

COSTA, J. B. S., HASUY, Y., BEMERGUY, R.L., SOARES JÚNIOR, A.V., VILLEGAS, J.M.C. Tectonic and paleogeography of the Marajó Basin, Northern Brazil. In: **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 74, n. 3, p. 1-13, 2002.

DAGG, M., BENNER, R., LOHRENZ, S., LAWRENCE, D. Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 7-8, p. 833–858, 2004.

DALRYMPLE, R.W., ZAITLIN, B.A., BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. **Journal of Sedimentary Petrology**, n. 62, p. 1130-1146, 1992.

DEFANT, A. **Physical Oceanography**, v. 2. New York, Pergamon Press. 1960.

DIONNE, J. C. **Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary**. Zeithschr. F. Geomorph, v. 7, n. 1, p. 36-44, 1963.

DYER, K. R. **Estuaries: A physical introduction (2nd Edition)**. John Wiley and Sons. New York. 1997.

EL-ROBRINI, M., SILVA, M. A. M. A., SOUZA FILHO, P. W. M., EL-ROBRINI, M. H. S., SILVA Jr., O. G. S., FRANÇA, C. F. **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Belém: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

FIGUEROA, S. N., NOBRE, C. A. Precipitation distribution over Central and Western Tropical South América. Climanálise. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. 5, n. 6, p. 36-45, 1990.

FERREIRA, G. P. **Circulação em canais de maré - Ilha de Marajó/PA**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Geociências, Faculdade de Oceanografia. Universidade Federal do Pará. Belém. 2010.

FERREIRA, G. P. **Caracterização hidrodinâmica e do transporte de sedimentos na região fluvio-estuarina do rio Paracauari – ilha de Marajó – Pará**. 2013. Dissertação (Mestrado em Oceanografia). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2013.

FRANÇA, C. F. **Morfologia e Mudanças Costeiras da Margem Leste da Ilha de Marajó (Pa)**. Tese (Doutorado em Geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém. 2003.

GABIOUX, M. **Influência da Lama em Suspensão na Propagação da Maré na Plataforma Amazônica**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

GALLO, M. N. **A Influência da Vazão Fluvial sobre a Propagação da Maré no Estuário do rio Amazonas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Engenharia Oceânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2004.

GALLO, M. N. **Escoamentos em Planícies de Marés com Influência Fluvial – Canal Norte do Rio Amazonas**. 2009. Tese (doutorado em Engenharia Oceânica) Programa de Engenharia Oceânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

GENZ, F., CIRANO, M., LESSA, G. C. ProcED: A MATLAB Package for Processing ADCP Estuarine Data. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 2, p. 183-192, 2010.

GEYER, W. R., BEARDSLEY, R. C., LENTZ, S. J., CANDELA, J., LIMEBURNER, R., JOHNS, W. E., CASTRO, B. M., SOARES, I. D. Physical oceanography of the Amazon shelf. *Continent. Shelf Research.*, v. 5/6, n. 16, p. 575–616, 1996.

GREGÓRIO, A. M. S., MENDES, A. C. Batimetria e Sedimentologia da Baía do Guajará , Belém, Estado do Pará, Brasil. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento, Belém**, v. 5, n. 9, p. 53-72, 2009.

HANSEN, D. V., RATTRAY JR, M. **New dimensions in estuary classification. Limnology and Oceanography**, v. 11, n. 3, p. 319-326, 1966.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – **INMET**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acessado em: 15 Out. 2013.

KJERFVE, B. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: **ESTUARINE ECOLOGY**. New York, Wiley, p. 47-78, 1987.

LATRUBESSE, E., STEVAUX, J. C. Geomorphology and Environmental aspects of Araguaia Fluvial Basin, Brazil. **Zeitschrift für geomorphologie**, n. 129, p. 109-127, 2002.

LIMA, A. M., OLIVEIRA, L. L., FONTINHAS, R. L., LIMA, R. J. S. Ilha do Marajó: Revisão Histórica, Climatológica, Bacias Hidrográficas e Propostas de Gestão. **HOLOS Environment**, v.5 n.1, p. 65, 2005.

MACMILLAN, D.H. **Tides**. Elsevier. New York. 1966.

MARTINS, S. E. M. **Caracterização Sdimentológica de Fundo da Área de Influência do Porto de Vila do Conde – Margem Leste do rio Pará, Barcarena/PA**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Geociências. Faculdade de Oceanografia. Universidade Federal do Pará. Belém. 2007.

MARTINS, S.E.M. **Geomorfologia e Sedimentologia de depósitos sedimentares recentes da porção superior do Estuário do Rio Pará (Baía de Marajó, Amazônia)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia Marinha) – CECO. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 119f. 2010.

MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M. E KJERFVE, B. **Princípio de Oceanografia Física em Estuários**. Edusp - Editora da Universidade de São Paulo. Brasil, São Paulo. 2002.

MONTEIRO, M. C., PEREIRA, L. C. C., GUIMARÃES, D. O., COSTA, R. M., SOUZA-FILHO, P. W. M., VIEIRA, S. R., JIMÉNEZ, J. A. Influence of Natural and Anthropogenic Conditions on The Water Quality of The Caeté River Estuary (North Brazil). **Journal of Coastal Research**, Special Issue, n. 64, p. 1535-1539, 2011.

MUEHE, D., GARCEZ, D.S. A Plataforma Continental Brasileira e sua Relação com a Zona Costeira e a Pesca. Mercator - **Revista de Geografia da UFC**, v. 4, n. 08, p. 69-88, 2005.

NASCIMENTO, I. B. A. **Batimetria e Aspectos Morfodinâmicos de Canais de Maré da Costa Leste da Ilha do Marajó (Pará)**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Geociências. Faculdade de Oceanografia. Universidade Federal do Pará. Belém. 2010.

OBSERVATÓRIO NACIONAL - **ON**. Disponível em: <http://www.on.br/>. Acessado em: 11 de Setembro de 2013.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - **ONS**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>. Acessado em: 28 de Outubro de 2013.

PAWLOWICZ, R. **rdpadcp.m**. 2004. Disponível em: <<http://www2.ocgy.ubc.ca/~rich>>. Acessado em: 27 de Agosto de 2013.

PECLY, J. O. G. **Metodologia para Aquisição, Processamento e Análise de Dados Ambientais em Suporte à Modelagem Computacional Costeira e Estuarina**. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Programa de Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

PEREIRA, L. C. C., MENDES, C. M., MONTEIRO, M. C., ASP, N. E. Morphological and Sedimentological Changes in a Macrotidal Sand Beach in the Amazon Littoral (Vila dos Pescadores, Pará, Brazil). **Journal of Coastal Research**, Special Issue v. n. 64, p. 1414-1418, 2009.

PINHEIRO, R.V.L. **Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do Estuário Guajará - Belém/PA**. 1987. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém. 1987.

PINTO, N. S. S. **Análise Morfológica de Fundo na Região do rio Pará através da Sísmica de Reflexão**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Geociências. Faculdade de Oceanografia. Universidade Federal do Pará. Belém. 2011.

PUGH, D.T. **Tides: surges and mean sea level**. John Wiley. New York, 1987.

PRITCHARD, D. W. Estuarine circulation patterns. **Proc. Am. Soc. Civ. Eng.**, v. 81, n. 717, p. 1-11, 1955.

PRITCHARD, D. W. What is an Estuary: Physical View Point. In: **Estuaries**. American Association for the Advance of Science, Washington D.C., n83, p. 3-5, 1967.

RD INSTRUMENTS – **RDI**. Disponível em: <http://www.rdinstruments.com>. Acessado em: 18 de Setembro de 2013.

ROCHA, B., SILVA, I.O., MORAES, S., ROCHA. O. **Metodologia Integradas para o Mapeamento de Energias Alternativas no Estado do Para - MEAPA**. Disponível em: <http://luiscosta.free.fr/Docs/Elab99.pdf>. Acessado em: 15 de Setembro de 2013.

ROSÁRIO, R. P., BEZERRA, M. O., VIZÓN, S. B. Dynamics of the Saline Front in the Northern Channel of the Amazon River – Influence of Fluvial Flow and Tidal Range (Brazil). **Journal of Coastal Research**, Special Issue, n. 64, p. 1414-1418, 2009.

SANTOS, A. S (no prelo). **Propagação de Maré da baía do Marajó e seus principais tributários**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Instituto de Geociências. Faculdade de Oceanografia. Universidade Federal do Pará. Belém. 2014.

SILVA, I. O. **Distribuição da Vazão Fluvial no Estuário do Rio Amazonas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Programa de Engenharia Oceânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

SIMPSON, M. R. **Discharge Measurement Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current**. United States Geological Survey – USGS, Open-file: Report 01-1. 2001.

SCHETTINI, C. A. F., CARVALHO, J. L. B. Hidrodinâmica e Distribuição de Sedimentos em Suspensão dos estuários dos rios Itapocu, Tijucas e Camboriú (Relatório). **Notas Técnicas da Facimar I**, n. 2, p.141-153, 1998.

SCHETTINI, C. A. F., MIRANDA, L. B. Circulation and Suspended Particulate Matter Transport in a Tidally Dominated Estuary: Caravelas Estuary, Bahia, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58 n. 1, p. 1-11, 2010.