



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA  
AMBIENTAL

FLÁVIA ACYPRESTE ALFREDO GARONCE

**CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO E BALANÇO  
DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO  
(MPS) NA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE  
VITÓRIA/ES**

ARACRUZ

2012

FLÁVIA ACYPRESTE ALFREDO GARONCE

**CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO E BALANÇO  
DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO  
(MPS) NA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE  
VITÓRIA/ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental do Departamento de Oceanografia e Ecologia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Oceanografia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Valéria da Silva Quaresma

ARACRUZ

2012

FLÁVIA ACYPRESTE ALFREDO GARONCE

**CARACTERIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO E BALANÇO DO  
MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) NA  
DESEMBOCADURA DA BAÍA DE VITÓRIA/ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental do Departamento de Oceanografia e Ecologia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Oceanografia Ambiental.

Apresentada em 28 de março de 2012.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof(a). Dra. Valéria da Silva Quaresma**  
*Universidade Federal do Espírito Santo*  
*Orientador - Examinador Interno UFES*

---

**Prof. Dra. Josefa Varela Guerra**  
*Universidade Estadual do Rio de Janeiro*  
*Examinador Externo UERJ*

---

**Prof. Dr. Renato David Ghisolfi**  
*Universidade Federal do Espírito Santo*  
*Examinador Interno UFES*

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

G237c Garonce, Flávia Acypreste Alfredo, 1984-  
Caracterização da circulação e balanço do material  
particulado em suspensão (MPS) na desembocadura da Baía  
de Vitória/ES / Flávia Acypreste Alfredo Garonce. – 2012.  
79 f. : il.

Orientador: Valéria da Silva Quaresma.  
Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências  
Humanas e Naturais.

1. Vitória, Baía de (ES). 2. Hidrodinâmica. 3. Estuários. 4.  
Material particulado. I. Quaresma, Valéria da Silva. II.  
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências  
Humanas e Naturais. III. Título.

CDU: 55

---

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por sempre me dar forças para conseguir vencer as barreiras de cada dia!!!

À FAPES pelo apoio financeiro ao projeto.

À FACITEC pelo apoio financeiro concedido pela bolsa de mestrado durante os dois anos de curso.

À minha orientadora Valéria da Silva Quaresma pelos ensinamentos, dedicação e enorme compreensão com tudo que se passou ao longo desses dois anos.

Ao professor Alex Bastos, por suas ideias e ajudas essenciais no campo.

Ao Johnny e Daniel pela compreensão e ajuda com tudo e a todo o momento que precisei. Amo vocês dois demais....

Aos meus pais pelo apoio e incentivo, que se não fosse isso não teria conseguido tudo o que consegui ao longo da minha vida.

As minhas irmãs pelas infinitas conversas e troca de experiências da vida. Muito obrigado por existirem.

Aos amigos Estefânia, Danielle, Alex Evaristo, Bárbara, Priscila, e a mais recente Renata, e todos os outros pela enorme ajuda nos campos, tratamento dos dados e muita paciência para esperar o filtro esfriar, eu pesar, para então podermos ir embora. Sem contar as fofocas no laboratório. Sentirei muitas saudades de tudo!!!!

Ao pessoal da base, Luciano e Eliana pela enorme ajuda com tudo que precisávamos.

E todos os outros que de alguma forma contribuíram para a finalização de mais esta etapa. Muito obrigado mesmo!!!!

## RESUMO

Entender a dinâmica estuarina é uma tarefa extremamente árdua devido às inúmeras variáveis que podem influenciar o sistema, tais como maré, vazão fluvial, vento, morfologia, entre outros. Porém, estudos desse tipo fazem-se necessário devido à grande utilização deste ambiente, para navegação, criação de portos, pesca, turismo, e uma gama de bens e serviços que o mesmo fornece. Sendo assim, o presente estudo visou colaborar para o conhecimento da hidrodinâmica e fluxos de propriedades (MPS e sal) na desembocadura do estuário da baía de Vitória. Para isso foram feitas medidas em quatro ciclos de maré, sendo dois nos momentos de sizígia e dois na quadratura, com variações sazonais entre verão (período chuvoso) e inverno (período seco), de salinidade e temperatura com um CTD (OBS 3A) e correntes com um ADCP (*River Surveyor*). Para a análise do MPS foram feitas coletas de água que foram filtradas para obtenção das concentrações do mesmo. A partir das análises, esta seção do estuário foi classificada de acordo com o diagrama de Hansen e Hattray (1966) como do tipo 1a nos momentos de sizígia e 2a no período de quadratura seco e 2b na quadratura chuvoso. Isso corrobora com o que foi encontrado para o número de Richardson em camada onde, os maiores valores foram encontrados no período de quadratura chuvoso, já que foi o ciclo que apresentou maior estratificação. Embora houvesse uma variação entre o período seco e chuvoso, a maré foi a variável que mais controlou os processos hidrodinâmicos no estuário. Com relação aos fluxos de sal e MPS, houve uma predominância de importação, com exceção do ciclo de sizígia chuvoso que exportou MPS. Além disso, a dinâmica do material em suspensão apresentou-se de modo não conservativo, não apresentando correlação com as correntes, já que processos de defasagens (*lags*) interferem no seu transporte, isso pode ser verificado devido ao residual das correntes de maré (assimetria da maré) ser principalmente em direção ao mar. Além disso, foi percebido que a maré foi a mais atuante na disponibilização através da ressuspensão do fundo, além do processo do bombeamento da maré (*tidal pumping*) que possibilitou o transporte para dentro do estuário.

## ABSTRACT

Understanding estuarine dynamics is an extremely arduous task due to the numerous variables that can influence the system, such as tide, river flow, wind, morphology, among others. However, such studies are necessary due to the large use of this environment for navigation, creation of ports, fisheries, tourism, and a range of goods and services it provides. Thus, this study aimed to contribute to the knowledge of hydrodynamics and flow properties (SPM and salt) in the mouth of the estuary of the Bay of Vitoria. For this purpose measurements were made in four tidal cycles, two in spring tides and two in the neap tides, with seasonal variations between summer (rainy season) and winter (dry season), salinity and temperature with a CTD (OBS 3A) currents with a ADCP (River Surveyor). For the analysis of SPM water samples were collected. This water samples were filtered to obtain the concentrations thereof. From our analysis, this section of the estuary was classified according to the diagram Hansen and Hattray (1966) as the type 1a in springs tide and 2b in neap tide during dry season and 2b in neap tide rainy season. This corroborates the findings using Richardson layer number where the highest values were found during the neap tide rainy, it was the cycle that showed greater stratification. Although there were variations between the dry and rainy season tides was the main forcing controlling hydrodynamic processes in the estuary. Salt and MPS, there were predominantly imported, except for the spring rainy cycle, were exported SPM. In addition, the dynamics of the suspended material showed a non-conservative behavior, with no association with the current processes although lags interfere in the transport, it may be observed due to residual tidal currents (asymmetry tide) is mainly toward the sea. Furthermore, it was realized that the tide was the most active in providing through the suspension of the bottom, and the process of tidal pumping that allowed transport into the estuary.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.1:</b> ÁREA DE ESTUDO MOSTRANDO OS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	<b>13</b>
<b>FIGURA 1.2:</b> MORFOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DA ÁREA ESTUDADA.....	<b>14</b>
<b>FIGURA 1.3:</b> SERIE TEMPORAL DA MAGNITUDE E DIREÇÃO DA CORRENTE EM UM PONTO NO CANAL DO PORTO.....	<b>15</b>
<b>FIGURA 2.1:</b> PERFIS TEMPORAIS DA VARIAÇÃO DA ALTURA DA MARÉ, NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA, SALINIDADE E TEMPERATURA. PARA O CICLO QS (15/09/10).....	<b>25</b>
<b>FIGURA 2.2:</b> PERFIS TEMPORAIS DA VARIAÇÃO DA ALTURA DA MARÉ (A), NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA, SALINIDADE E TEMPERATURA PARA O CICLO QC (29/11/10).....	<b>26</b>
<b>FIGURA 2.3:</b> PERFIS TEMPORAIS DA VARIAÇÃO DA ALTURA DA MARÉ, NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA, SALINIDADE E TEMPERATURA PARA O CICLO SS (22/09/10).....	<b>28</b>
<b>FIGURA 2.4:</b> PERFIS TEMPORAIS DA VARIAÇÃO DA ALTURA DA MARÉ (A), NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA, SALINIDADE E TEMPERATURA PARA O CICLO SC (03/12/10).....	<b>29</b>
<b>FIGURA 2.5:</b> VELOCIDADE E DIREÇÃO DA CORRENTE NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA DESEMBOCADURA PARA O CICLO QS (15 DE SETEMBRO DE 2010).....	<b>33</b>
<b>FIGURA 2.6:</b> VELOCIDADE E DIREÇÃO DA CORRENTE NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA DESEMBOCADURA PARA O CICLO DE QC (29 DE NOVEMBRO DE 2010).....	<b>34</b>
<b>FIGURA 2.7:</b> VELOCIDADE E DIREÇÃO DA CORRENTE NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA PARA O CICLO SS (22 DE SETEMBRO DE 2010).....	<b>35</b>



<b>FIGURA 2.8:</b> VELOCIDADE E DIREÇÃO DA CORRENTE NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA DESEMBOCADURA PARA O CICLO SC (03 DE DEZEMBRO DE 2010).....	<b>36</b>
<b>FIGURA 2.9:</b> DIAGRAMA DE ESTRATIFICAÇÃO E CIRCULAÇÃO PROPOSTO POR HANSEN E RATTRAY, 1966.....	<b>40</b>
<b>FIGURA 2.10:</b> MODELO DE INFLUÊNCIA DO VENTO NA CIRCULAÇÃO ESTUARINA E NO PERFIL VERTICAL DE ESTRATIFICAÇÃO.....	<b>42</b>
<b>FIGURA 2.11:</b> VARIAÇÃO TEMPORAL DA VELOCIDADE LONGITUDINAL DO VENTO, DA CIRCULAÇÃO ESTUARINA, DA ESTRATIFICAÇÃO VERTICAL E DA VARIAÇÃO DA MARÉ PARA O CICLO QS (15/09/2010).....	<b>43</b>
<b>FIGURA 2.12:</b> VARIAÇÃO TEMPORAL DA VELOCIDADE LONGITUDINAL DO VENTO, DA CIRCULAÇÃO ESTUARINA, DA ESTRATIFICAÇÃO VERTICAL E DA VARIAÇÃO DA MARÉ PARA O CICLO SS (22/09/2010).....	<b>44</b>
<b>FIGURA 2.13:</b> VARIAÇÃO TEMPORAL DA VELOCIDADE LONGITUDINAL DO VENTO, DA CIRCULAÇÃO ESTUARINA, DA ESTRATIFICAÇÃO VERTICAL E DA VARIAÇÃO DA MARÉ PARA O CICLO QC (29/11/2010).....	<b>44</b>
<b>FIGURA 2.14:</b> VARIAÇÃO TEMPORAL DA VELOCIDADE LONGITUDINAL DO VENTO, DA CIRCULAÇÃO ESTUARINA, DA ESTRATIFICAÇÃO VERTICAL E DA VARIAÇÃO DA MARÉ PARA O CICLO SC (03/12/2010).....	<b>45</b>
<b>FIGURA 2.15:</b> CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS PROPOSTAS NO MODELO E A COMPONENTE LONGITUDINAL DO VENTO PARA O CICLO QS.....	<b>46</b>
<b>FIGURA 3.1:</b> VARIAÇÃO TEMPORAL DA CORRENTE LONGITUDINAL E DO MPS PARA O CICLO QS NO DIA 15/09/2010.....	<b>57</b>
<b>FIGURA 3.2:</b> VARIAÇÃO TEMPORAL DA CORRENTE LONGITUDINAL E DO MPS PARA O CICLO QC NO DIA 29/11/2010.....	<b>58</b>
<b>FIGURA 3.3:</b> VARIAÇÃO TEMPORAL DA CORRENTE LONGITUDINAL E DO MPS PARA O CICLO SS NO DIA 22/09/2010. ....	<b>59</b>

**FIGURA 3.4:** VARIAÇÃO TEMPORAL DA CORRENTE LONGITUDINAL E DO MPS PARA O CICLO SC NO DIA 03/11/2010. .... **60**

**FIGURA 3.5:** FLUXOS INSTANTÂNEOS DE SAL E MPS PARA OS CICLOS DE QUADRATURA..... **65**

**FIGURA 3.6:** FLUXOS INSTANTÂNEOS DE SAL E MPS PARA OS CICLOS DE SIZÍGIA..... **66**

**FIGURA 3.7:** FLUXOS RESIDUAIS NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE MPS. E SAL .....**68**

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 2.1:</b> CAMPANHAS REALIZADAS. ....	<b>20</b>
<b>TABELA 2.2:</b> DESCRIÇÃO MÉDIA DOS PARÂMETROS $\langle \delta S \rangle$ , $\langle \bar{\rho} \rangle$ , $\langle Ri_L \rangle$ NOS CICLOS. ....	<b>22</b>
<b>TABELA 2.3:</b> PARÂMETROS DE CIRCULAÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO DURANTE OS CICLOS.....	<b>39</b>
<b>TABELA 3.1:</b> CAMPANHAS REALIZADAS. ....	<b>51</b>
<b>TABELA 3.2:</b> ASSIMETRIA DE DURAÇÃO ( $A_D$ ), TEMPO ( $A_v$ ) E RESIDUAL ( $AI_{DV}$ ) PARA OS QUATRO CAMPOS REALIZADOS.....	<b>54</b>
<b>TABELA 3.3:</b> MÉDIAS NO CICLO PARA OS PONTOS T1, T2 E PARA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL, DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) E DA MATÉRIA ORGÂNICA (MO) E O PERCENTUAL DE MATERIAL ORGÂNICO NO MATERIAL PARTICULADO. ....	<b>56</b>
<b>TABELA 3.4:</b> FLUXOS RESIDUAIS DE SAL, MPS PARA OS PONTOS T1 E T2 E ÁGUA PARA A SEÇÃO TRANSVERSAL. ....	<b>67</b>

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.3 ÁREA DE ESTUDO.....	12
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	16
<b>CAPÍTULO 2 – ASPECTOS HIDRODINÂMICOS NA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE VITÓRIA, ES. ....</b>	<b>18</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	18
2.2 METODOLOGIA.....	20
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
2.3.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DAS PROPRIEDADES E CORRENTES.....	22
2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO.....	30
2.3.3 CLASSIFICAÇÃO DA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE VITÓRIA.....	38
2.3.4 – A INFLUÊNCIA DO VENTO NA CIRCULAÇÃO .....	41
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
<b>CAPÍTULO 3 – FLUXO DE PROPRIEDADES (ÁGUA, SAL E MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO) NA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE VITÓRIA, ES. ....</b>	<b>49</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	49
3.2 METODOLOGIA.....	51
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
3.3.1 ASSIMETRIA DA MARÉ.....	53
3.3.2 VARIAÇÃO TEMPORAL E CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA DO MPS .....	54
3.3.3 FLUXOS DE SAL, ÁGUA E MPS.....	64
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
<b>CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>71</b>
<b>CAPÍTULO 5 – REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1 JUSTIFICATIVA**

O uso intenso dos estuários tem cada vez mais necessitado de estudos do aporte, transporte e deposição sedimentar nestes ambientes. Cerca de 60% das grandes cidades estão distribuídas em torno dos estuários (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002), sendo assim, entender o processo atuante nestes ambientes pode ajudar a resolver os problemas de assoreamento, os quais prejudicam a navegação, impactos advindos da bacia hidrográfica, tempo de residência e dispersão de poluentes, entre outros.

O sistema estuarino da Baía de Vitória tem uma utilização bastante diversa, desde comunidades tradicionais a um grande sistema portuário, que tornam este ambiente bastante complexo no contexto de uso e ocupação. Desta forma, compreender o seu comportamento hidrodinâmico é essencial para que haja melhor interação entre as atividades ali realizadas.

Independente da utilização destes ambientes, a circulação e mecanismos de transportes em estuários são por si só complexos e sujeitos a uma grande variabilidade espacial e temporal devido à interação de três forçantes: descarga de água fluvial, marés e vento. Estas forçantes dirigem a circulação gravitacional e a difusão turbulenta que são os principais processos que controlam o transporte de propriedades nos estuários (MANTOVANELLI et al., 2004).

Medidas de fluxos de sedimento particulado em suspensão são, segundo Medeiros e Kjerfve (2005), um meio útil para analisar processos hidrodinâmicos, os quais servem para elucidar o processo físico atuante no estuário. Dessa forma, através de estudos do comportamento do material particulado em suspensão, se pode conhecer o seu tempo de residência no estuário, a atuação das correntes de maré no transporte de sedimentos, entre outros (DYER, 1997). Ou seja, determinara a sua origem (marinha ou fluvial), e/ou a direção para a qual ele será transportado, é de fundamental importância em regiões portuárias, como é o caso da Baía de Vitória, já que esse sedimento poderá se depositar, interferindo nos canais de navegação.

Trabalhos com o objetivo de entender o comportamento estuarino são escassos, no Estado do Espírito Santo mais particularmente na Baía de Vitória. Assim sendo, este trabalho é de grande relevância, visando contribuir para um melhor entendimento do comportamento do sistema o que permitirá uma maior capacidade de planejamento e gerenciamento das atividades implantadas neste ambiente.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir para o conhecimento da circulação estuarina e da dinâmica do material particulado em suspensão (MPS) de uma área transversal na desembocadura do Canal do Porto, Baía de Vitória – ES.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender a variação temporal, na escala de um ciclo de maré, da salinidade, temperatura e MPS ao longo da coluna d'água e na seção transversal do canal.
- Analisar as variações entre alta e baixa pluviosidade e entre as diferentes fases da maré;
- Avaliar o fluxo do material particulado em suspensão;
- Determinar a corrente residual e a sua relação com o transporte do material particulado em suspensão.

## 1.3 ÁREA DE ESTUDO

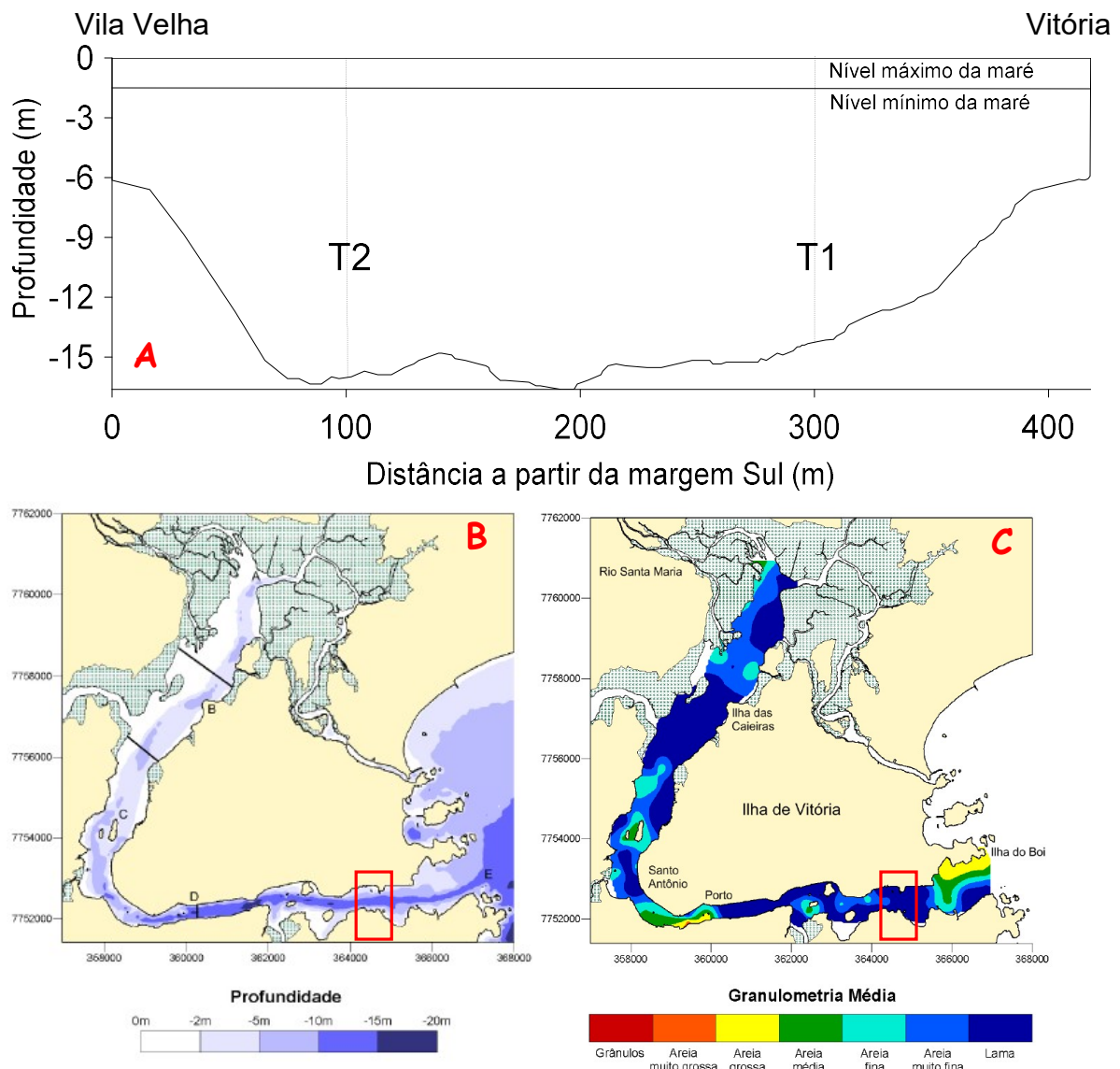
A baía de Vitória é a parte principal de um complexo sistema estuarino tropical localizado no estado do Espírito Santo (VERONEZ; BASTOS; QUARESMA, 2009) (Figura 1.1).



**Figura 1.1:** Área de estudo mostrando os pontos de amostragem (T1 e T2). **Fonte:** Modificado de Veronez, Bastos e Quaresma, 2009.

Este sistema apresenta-se em dois eixos sendo um orientado Leste-Oeste e, após uma inflexão, nordeste - sudoeste. Isto causa uma mudança no comportamento das correntes influenciando na batimetria e na faciologia. Um fator de influência antrópica na morfologia da região é a presença do Porto de Vitória, o que exige dragagens frequentes gerando um canal muito mais profundo no primeiro eixo (Figura 1.2b). A sedimentologia é influenciada pela descarga fluvial (principalmente do Rio Santa Maria da Vitória) (Figura 1.1) e pelo aporte marinho próximo à desembocadura (Figura 1.2c). Porém, próximo à inflexão, o sedimento mais grosso é devido à erosão provocada pelo estreitamento e aprofundamento do canal, provocando velocidades maiores nas correntes (VERONEZ; BASTOS; QUARESMA, 2009).

A Figura 1.2 destaca a seção estudada mostrando um canal com profundidades predominantes entre 10 e 15 m (Figura 1.2b) e sedimentos lamosos (Figura 1.2c).



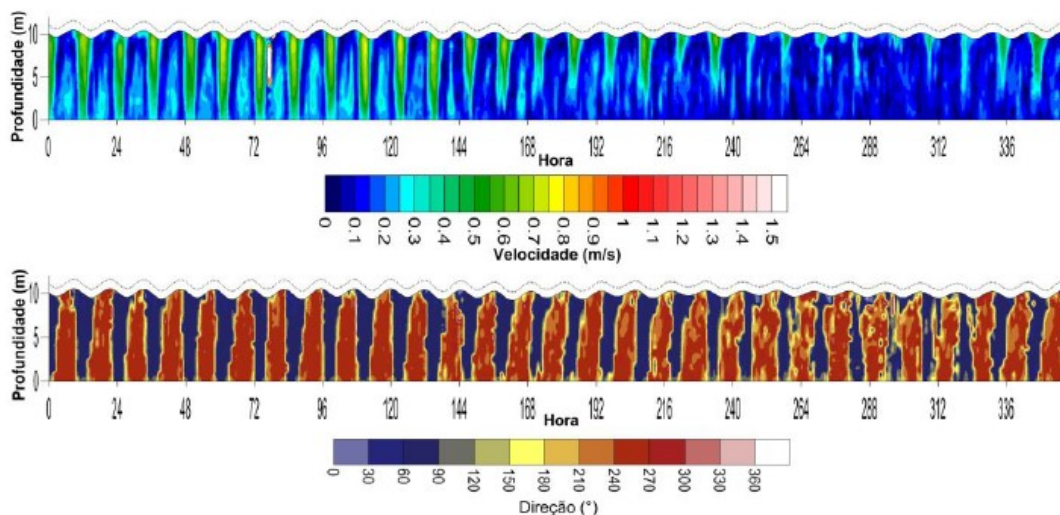
**Figura 1.2:** Morfologia e sedimentologia da área estudada. A – seção transversal do canal (em destaque pelos retângulos vermelhos nas figuras B e C); B – batimetria; e C - sedimentologia da Baía de Vitória. **Fonte:** Modificado de Veronez; Bastos e Quaresma, (2009).

A região insere-se em um clima tropical quente úmido (NIMER, 1989), onde o vento predominante é do quadrante NE e ventos do quadrante sudeste em menor frequência, porém com maior intensidade, originados por frentes frias. O período de maior pluviosidade acontece no verão (meses de novembro a março) e menores pluviosidades são encontradas no inverno (meses de junho a setembro). De acordo com Dalmaschio (2008) a vazão do rio Santa Maria da Vitória segue o padrão de pluviosidade local sendo que em épocas chuvosas a vazão ultrapassa os  $50\text{m}^3/\text{s}$  e



na estação seca fica abaixo de  $10\text{m}^3/\text{s}$ , sendo o principal rio que desemboca no sistema, com aproximadamente  $1.500\text{ Km}^2$  de bacia hidrográfica, seguido dos rios Formate/Marinho e Bubu, entre outros de menor porte (VERONEZ; BASTOS; QUARESMA, 2009).

O estuário é dominado por maré com características de micromarés (CHACALTANA; MARQUES, RIGO, 2003; RIGO, 2004). Neves e colaboradores (no prelo) comprovaram o padrão de assimetria de tempo da maré mostrado por modelagens, principalmente na sizígia com a maré vazante alcançando mais de  $1\text{ m/s}$  e a enchente com velocidades em torno de  $0,3\text{ m/s}$  nas marés de sizígia (Figura 1.3). Em marés de quadratura, a assimetria também é percebida, porém não tão proeminente, já que as velocidades de enchente e vazante são aproximadas, ficando em torno de  $0,3$  e  $0,1$  respectivamente (Figura 1.3).



**Figura 1.3:** Serie temporal da magnitude e direção da corrente em um ponto (aproximadamente 5 Km à montante do transecto deste estudo) no canal do porto.  
**Fonte:** Neves e Bastos (2010).

Os autores *op cit.* observaram também uma mudança na direção da corrente em toda a coluna d'água durante um ciclo de maré, sendo predominantes para nordeste e leste durante a vazante e para oeste durante a enchente. Porém em períodos de maré de sizígia, as correntes de enchente tendem a ficar mais tempo próximas ao fundo e as de vazante na superfície, o que não é percebido nas marés de quadratura. Dessa forma, segundo estes autores o setor do estuário próximo ao

porto de Vitória apresenta características de estuários bem misturados na sizígia e parcialmente misturados na quadratura.

Assim como as correntes, o prisma de maré também apresenta diferença entre as marés de quadratura e sizígia. Rigo (2004) encontrou um prisma de  $23,6 \times 10^6 \text{ m}^3$  na sizígia e  $8,31 \times 10^6 \text{ m}^3$  na quadratura na região da terceira ponte (próximo à seção a ser estudada). Quanto ao tempo de residência, Gaze (2005) utilizando o modelo DIVAST, encontrou um tempo de residência de 11 dias na porção Sul (próximo à Vila Velha) e 14 dias na porção Norte (próximo à Vitória) na região da desembocadura.

A dinâmica do MPS é coerente com a maré. Neves e colaboradores (no prelo) analisando a concentração próximo ao fundo com um ADV obtiveram as maiores concentrações durante marés de sizígia. Moura e colaboradores (2011) estimando a concentração de MPS ao longo da coluna d'água, da mesma forma obtiveram maiores concentrações na sizígia e próximo ao fundo. Além disso, os autores encontraram uma concentração maior também nos momentos de maior velocidade das correntes tanto da vazante, quanto da enchente. Porém, na quadratura, houve um aumento sub-superficial na concentração de MPS, o qual foi possivelmente trazido pela descarga fluvial, fato explicado pela variação da salinidade ao longo da coluna d'água.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação não segue o padrão clássico de trabalhos acadêmicos, pois visa uma estruturação na forma de artigos, facilitando-se assim sua redação para publicação. Dessa forma, estará dividida na seguinte estrutura:

Capítulo 1 – Introdução geral sobre o assunto, justificando a importância do tema, bem como seus objetivos e contextualização da área de estudo;

Capítulo 2 – Refere-se ao primeiro artigo, com a caracterização hidrodinâmica da área de estudo;

Capítulo 3 – Mostra o segundo artigo, onde estão apresentados os fluxos de MPS e sal.

Capítulo 4 – É a conclusão final do trabalho, com interação entre os dois artigos; e por fim,

Capítulo 5 – Onde estão as referências utilizadas para a elaboração da dissertação.

Com base nesta estruturação poderá haver partes de texto repetidas, o que não afetará o desenvolvimento do trabalho, nem a compreensão do leitor.

## **CAPÍTULO 2 – ASPECTOS HIDRODINÂMICOS NA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE VITÓRIA, ES.**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A dinâmica estuarina é regida pelos processos atuantes em um estuário. Estes processos são função da descarga fluvial, marés, ondas, ventos e forçantes meteorológicas (NICHOLS; BIGGS, 1985). Além disso, a geometria do estuário tem grande influência no comportamento das variáveis hidrodinâmicas (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

A água fluvial sendo menos densa que a água do mar, tende a fluir por cima desta gerando uma estratificação vertical. Se a descarga fluvial é forte o suficiente para quebrar esta estratificação, ocorre um processo chamado entranhamento (*entrainment*) onde o sal tende a mover para a camada superior através de um processo advectivo. Como deverá entrar mais sal na camada inferior para compensar a perda para a camada superior, é esta mistura de água salina com doce que propicia a distribuição da salinidade governando a circulação estuarina (NICHOLS; BIGGS, 1985). Quando o movimento da maré torna-se mais significativo que a descarga do rio, uma tensão de cisalhamento irá aparecer no fundo (DYER, 1997) movimento passa de advectivo para turbulento desestratificando a coluna d'água continuamente com o aumento da amplitude da maré dando origem a uma corrente bidirecional e gerando os tipos de estuários parcialmente e bem misturados (WELLS, 1995). Desta forma, a circulação estuarina tende a passar de bem misturada para uma cunha salina pelo aumento da descarga fluvial, diminuição da maré, diminuição da extensão e aumento da profundidade do canal (NICHOLS; BIGGS, 1985). Para uma análise da estratificação, um bom indicador é o número de Richardson em camadas.

O vento também provoca uma tensão superficial podendo desestratificar a coluna d'água ou mesmo gerar ondas e correntes em estuários com grande área superficial intensificando os processos de mistura (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Além disso, pode gerar mudanças no nível da água e correntes de deriva afetando o

transporte de sedimentos em suspensão. Ventos fortes em direção ao continente, eventualmente causam mudanças na direção da corrente superficial, dando origem à uma resultante para montante do estuário (NICHOLS; BIGGS, 1985).

A geomorfologia pode atuar deformando a onda de maré e gerando a assimetria. Em manguezais as correntes nos momentos de marés baixas apresentam maior velocidade, já que podem fluir livremente. Quando a maré está cheia, a água fica retida nas árvores, impedindo o livre escoamento, atrasando seu movimento (RIGO, 2004).

Dessa forma, a compreensão da hidrodinâmica do estuário apresenta enormes dificuldades, devido às inúmeras variáveis envolvidas. Sendo assim, esse capítulo visa entender a interferência de cada dessas variáveis na desembocadura do estuário da baía de Vitória, através da compreensão da variação temporal da salinidade, temperatura e correntes ao longo da coluna d'água e na seção transversal do canal.

## 2.2 METODOLOGIA

Foram realizadas 4 campanhas de coleta de dados (Tabela 2.1), sendo duas na estação seca e duas em estação chuvosa. Para cada estação foram obtidos dados de um ciclo de maré de sizígia e um ciclo de maré de quadratura (aproximadamente 12 horas em cada ciclo). Dessa forma, o ciclo de quadratura na estação seca foi identificado como QS, os de sizígia na mesma estação SS, já para estação chuvosa, os ciclos de sizígia foram representados por SC e quadratura por QC.

Tabela 2.1: Campanhas realizadas.

	Seca	Chuvosa
Quadratura	15-set-10	29-nov-10
Sizígia	22-set-10	03-dez-10

Em cada campanha foi utilizado um CTD OBS3A da *Campbell*, para perfilagem na coluna d'água, de hora em hora durante um ciclo de maré, adquirindo dados de salinidade, temperatura, e profundidade em dois pontos do transecto (T1 e T2) (Figura 1.1). A partir da salinidade e temperatura obtiveram-se os valores de densidade, os quais foram calculados utilizando a equação de estado da água do mar à pressão atmosférica  $\rho = \rho(S, T)$ .

Foram ainda realizadas medições simultaneamente de velocidade e direção de corrente, de 20 em 20 minutos, utilizando um ADP (*Acoustic Doppler Profiler*) *River Surveyor* M9 SONTEK/YSI de 3 a 0,5 kHz., que gera um perfil de velocidade em três direções através do sistema *doppler* acústico (SONTEK, 2009), mostrando a magnitude e direção das correntes, que foram posteriormente decompostas no eixo  $O_{xy}$ , dando origem às componentes longitudinais (Leste-Oeste) e transversais (Norte-Sul) em relação ao canal.

Além disto, foram obtidos, os dados de vazão, largura, fluxo residual (média do fluxo) e área da secção transversal. Estes cálculos foram feitos pelo ADP através do software do equipamento *River Surveyor Live*.

Para análise da estratificação foi calculado o número de Richardson por camada ( $R_{iL}$ ). O número de Richardson ( $R_i$ ) compara a influência do gradiente vertical de densidade ( $\partial\rho/\partial z$ ) à influência do cisalhamento de velocidade ( $\partial u/\partial z$ ) na estabilização da coluna d'água, indicando sua capacidade de estratificação. Porém, devido às dificuldades de medidas precisas do gradiente, o número de Richardson por camada ( $R_{iL}$ ) tem sido mais utilizado, para a mesma análise, porém de forma agrupada e assim refletindo mais as características de todo o fluxo, do que com o detalhamento do número de Richardson, sendo definido por:

$$Ri_L = \frac{gh\Delta\rho_v}{\overline{\rho u}^2} \quad (2.1)$$

Onde,  $h$  = é a profundidade local;  $\overline{u}$  e  $\overline{\rho}$  = velocidade e a densidade médias na coluna d'água, respectivamente; e  $\Delta\rho_v$  é a diferença entre a densidade do fundo e da superfície.

Dyer (1982) propôs limites práticos para o Número de Richardson por camada de acordo com os regimes de mistura, sendo assim, quando:  $Ri_L > 20$  a turbulência gerada pelo fundo foi incapaz de diminuir a estratificação dando origem aos estuários estratificados;  $20 > Ri_L > 2$  a mistura está crescendo ativamente, como acontecem nos estuários parcialmente misturados; e  $Ri_L < 2$  ocorre uma mistura completa da coluna d'água, caracterizando os estuários bem misturados.

A velocidade e direção dos ventos foram obtidas a partir de dados da estação meteorológica existente no aeroporto de Vitória que se situa a aproximadamente 10km de distância da área de estudo, e com ventos medidos a 4m de distância da superfície. Estes dados também foram decompostos no eixo  $O_{xy}$ , de modo que permitisse uma comparação com a corrente. Porém, é importante ressaltar que a direção do vento é defasada em  $180^\circ$  em relação às correntes já que os ventos são medidos de onde vêm e as correntes em função do seu destino. Nesse caso os dados foram corrigidos para que se pudesse ter uma melhor visualização, fazendo com que correntes e vento tivessem a mesma referência.

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DAS PROPRIEDADES E CORRENTES

Na Tabela 2.2 estão sintetizados os principais resultados encontrados, considerando as médias em cada ciclo. A seção transversal variou entre 5680,8m<sup>2</sup> no período de SC a 4235,5m<sup>2</sup> no período de SS, com largura máxima de 440,8m no período de SC e menor, 418,88m no QC. A vazão média no canal que representa o fluxo residual de água foi sempre em direção ao mar (valores positivos na Tabela), exceto no ciclo QC, o qual foi em direção ao continente (valores negativos), sendo o maior valor no ciclo SS, alcançou o valor de 235,31m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e o menor valor 18,39m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> no ciclo QS. Na margem sul do canal (Vila Velha) o transporte residual de água foi principalmente em direção ao continente, com exceção do ciclo SC que foi em direção ao mar. Já na margem Norte (Vitória), o fluxo residual foi em direção ao mar nos ciclos de quadratura e em direção ao continente nos ciclos de sizígia.

**Tabela 2.2:** Descrição média dos ciclos.  $\langle \delta S \rangle$  = Variação da salinidade entre a superfície e o fundo residual;  $\langle \bar{\rho} \rangle$  = densidade média na coluna d'água residual;  $\langle Ri_L \rangle$  = Número de Richardson por camada, médio no ciclo; QS = ciclo de quadratura no período seco; SS = Ciclo de sizígia no período seco; QC = Ciclo de quadratura no período chuvoso; SC = Ciclo de sizígia no período chuvoso. Valores positivos – em direção ao oceano; Valores negativos - em direção ao continente.

		15/09/10	22/09/10	29/11/10	03/12/10
		QS	SS	QC	SC
Área (m <sup>2</sup> )	média	4973,7	4906,8	4933,0	5123,4
	máxima	5276,0	5344,3	5304,4	<b>5680,8</b>
	mínima	4391,6	<b>4235,5</b>	4701,8	4834,7
Largura média (m)		436,00	425,21	<b>418,88</b>	<b>440,8</b>
Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	canal	<b>18,39</b>	<b>235,31</b>	-106,1	88,46
	margem Norte	0,07	-0,07	0,03	-0,01
	margem Sul	-0,03	-0,013	-0,02	0,24
Variação da maré (m)		1,00	1,52	1,04	1,35
Velocidade longitudinal (m.s <sup>-1</sup> )	média	0,004	0,04	-0,02	0,01
	enchente	<b>-0,04</b>	-0,22	<b>-0,14</b>	-0,21
	vazante	0,03	<b>0,38</b>	0,11	<b>0,26</b>
$\langle \delta S \rangle$		3,1	0,4	4,9	1,9
$\langle \bar{\rho} \rangle$		1023,46	1023,89	1022,99	1023,66
$\langle Ri_L \rangle$		13,10	0,76	13,43	3,75

Isso indica que no período seco, a troca do fluxo (*exchange flow*) é induzida pela maré e no período chuvoso, pela densidade. De acordo com Valle-Levinson *et al* (2009) fluxos governados pela maré apresentam a maior troca na sizígia, sendo que



o fluxo no canal principal é em direção ao mar, característico de ondas de maré progressivas. Nos fluxos onde a densidade tem um papel predominante, e a fricção tem maior efetividade, a maior troca de água ocorre em momentos de quadratura, com características de ondas estacionárias, onde o fluxo residual no canal principal é em direção ao continente. Lima (2007) também encontrou este padrão para o estuário do Rio Jacuípe no litoral da Bahia.

Assim como a vazão, a velocidade longitudinal residual foi com exceção do ciclo QC, em direção ao mar, sendo que as velocidades residuais nos momentos de vazante foram maiores nos ciclos de sizígia (0,38 e 0,26 m/s nos períodos seco e chuvoso, respectivamente). Nos ciclos de quadratura, as velocidades residuais de enchente prevaleceram com -0,04 no período seco e -0,14m/s no período chuvoso. Esse resultado corroborou com o encontrado por Santiago (2007) através de modelagens na área, onde o autor percebeu dominância das velocidades de corrente de enchente na quadratura e de vazante na sizígia. Porém, como o autor não levou em consideração variações na descarga fluvial, encontrou sempre velocidades maiores no ciclo de sizígia em relação à quadratura, porém, percebeu-se que a quadratura em momentos de maiores descargas fluviais apresentou uma velocidade residual maior que a sizígia para um mesmo padrão de água fluvial no sistema.

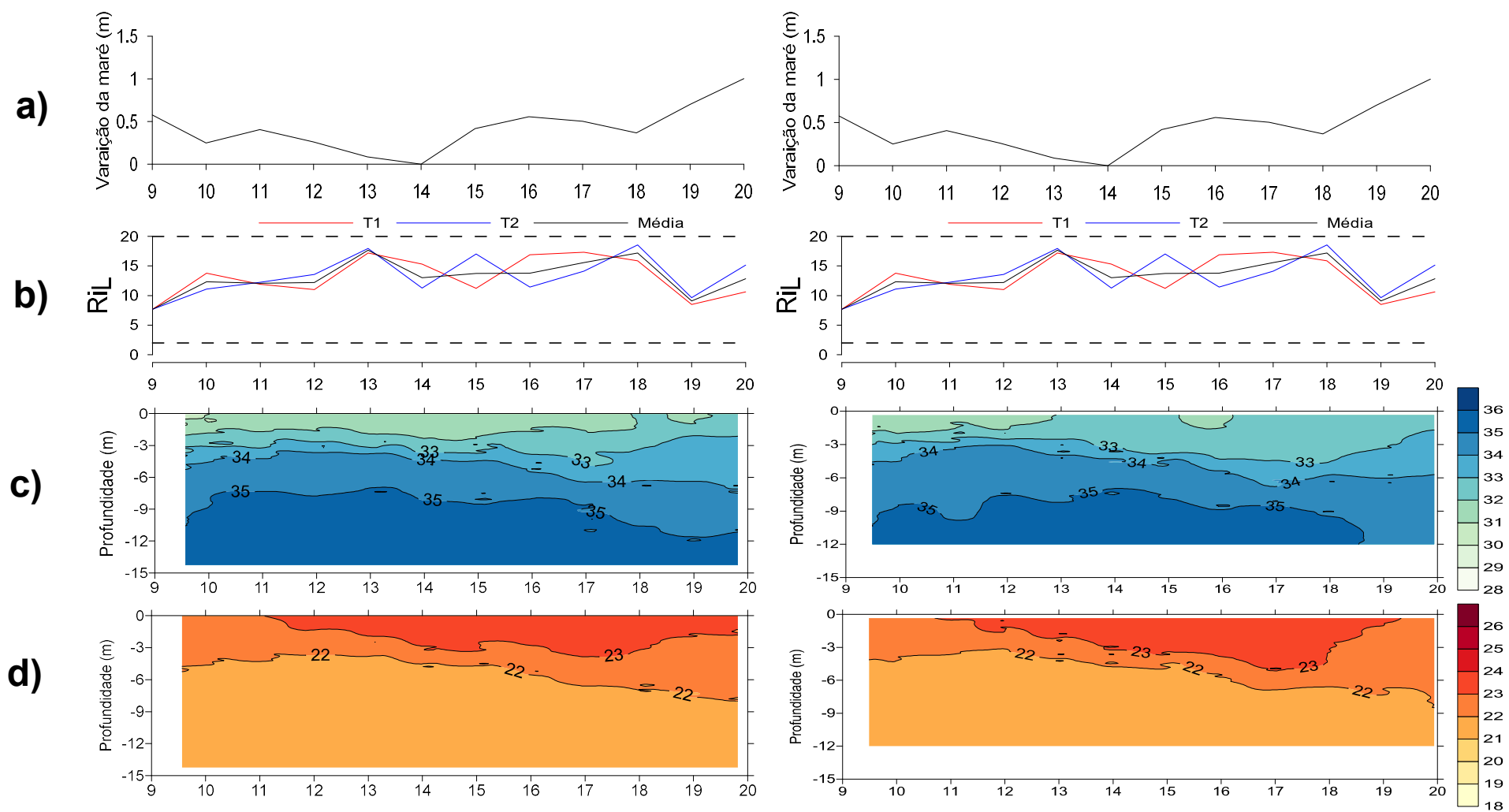
Com relação à salinidade, tem-se que nos períodos de quadratura a diferença entre a superfície e o fundo foi maior em relação aos ciclos de sizígia indicando maior estratificação, sendo que no período de SS, esse valor foi menor que a unidade indicando quase nenhuma estratificação. O número de Richardson em camada reafirma esse padrão misturado, onde nesse ciclo (SS), apresentou um valor de 0,76. Além disso, esse foi o ciclo com maior densidade média (1023,89), indicando uma água mais salina, seguido pelo SC, QS, e por último o QS (Tabela 2.2).

As Figuras de 2.1 a 2.4 mostram os perfis de salinidade, temperatura, número de Richardson, e a variação da maré para os ciclos, considerando que o ponto T1 é próximo à margem Norte (Vitória) e o ponto T2 próximo à margem Sul (Vila Velha).

Fazendo uma análise da variação temporal da salinidade com a variação da maré, percebe-se uma relação direta entre as duas, ou seja, a salinidade segue o padrão da maré (Figuras 2.1, 2.2, 2.3). Por outro lado, no período QC (Figura 2.2), é notável uma estratificação logo após a baixa-mar (em torno de 16 às 18 horas) com salinidade variando de 28 na superfície a 35 no fundo e número de Richardson

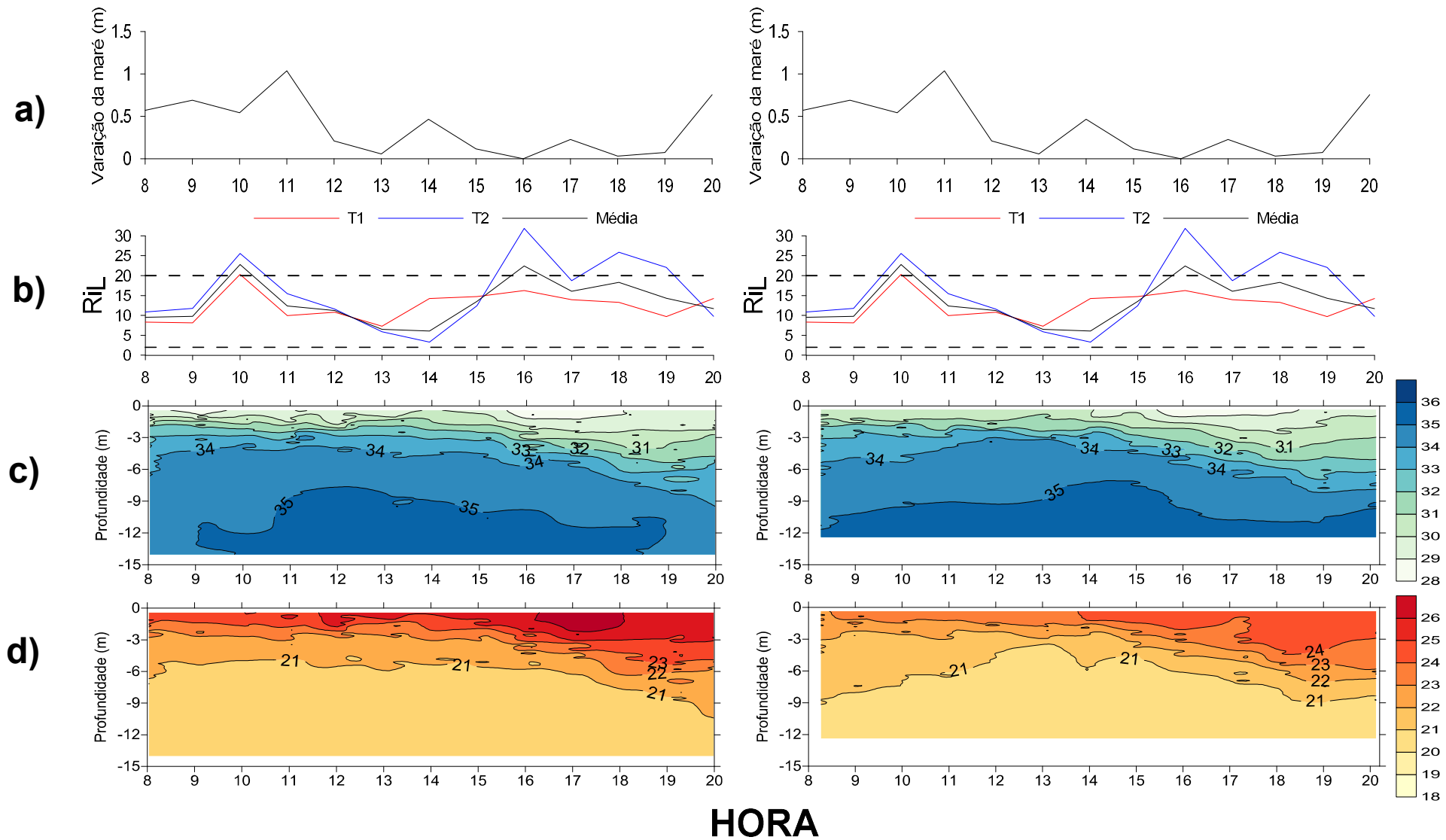
acima de 20. Já no ciclo QS existe uma tendência de estratificação com salinidade de 31 na superfície e 35 no fundo e número de Richardson mais alto (entre 10 e 15), porém não alcança o limite de 20 que Dyer (1982) definiu como estratificado (Figura 2.1).

Além disso, percebe-se que a amplitude de maré foi maior no período de quadratura chuvoso do que no de seca (Tabela 2.2), embora a variação total teve pouca diferença (0,4m), o valor e 1,04 foi um extremo, uma vez que a maré máxima permaneceu em torno de 0,7m (Figura 2.1), o que provavelmente contribuiu para esta leve estratificação e similaridade nestes dois perfis. A amplitude da maré tem uma importância na capacidade de renovação da massa de água no ambiente estuarino (MIRANDA et. al, 2002), ou seja quanto maior, maior será a troca de água propiciada pelos processos de mistura, dando origem a um sistema misturado. De acordo com Dyer (1997) para que o sistema seja misturado a altura elevada da maré é um requisito, porém em se tratando de um estuário de micromaré, essa intensa homogeneização pode ser propiciada também pelo baixo aporte de água fluvial no estuário. Este fato também foi verificado por Pereira e colaboradores (2010) e Schettini e Miranda (2010) no estuário de Caravelas, BA e por Schettini e Carvalho (1999) na Baía de Babitonga, SC.



## HORA

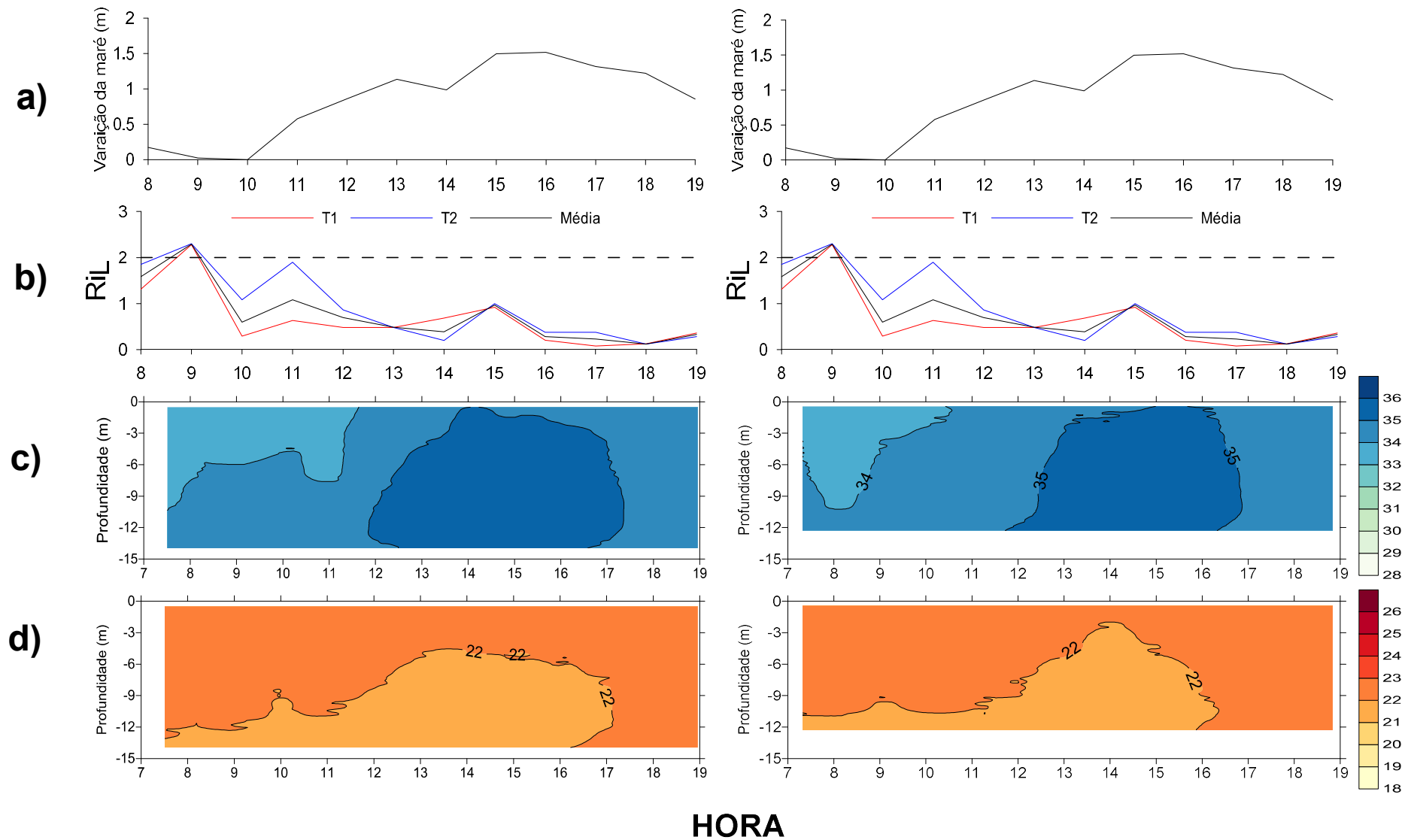
**Figura 2.1:** Perfis temporais da variação da altura da maré (a), número de Richardson por camada (b) salinidade e (c) temperatura (°C). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e o T1 (Vitória) para o ciclo QS (15/09/10).



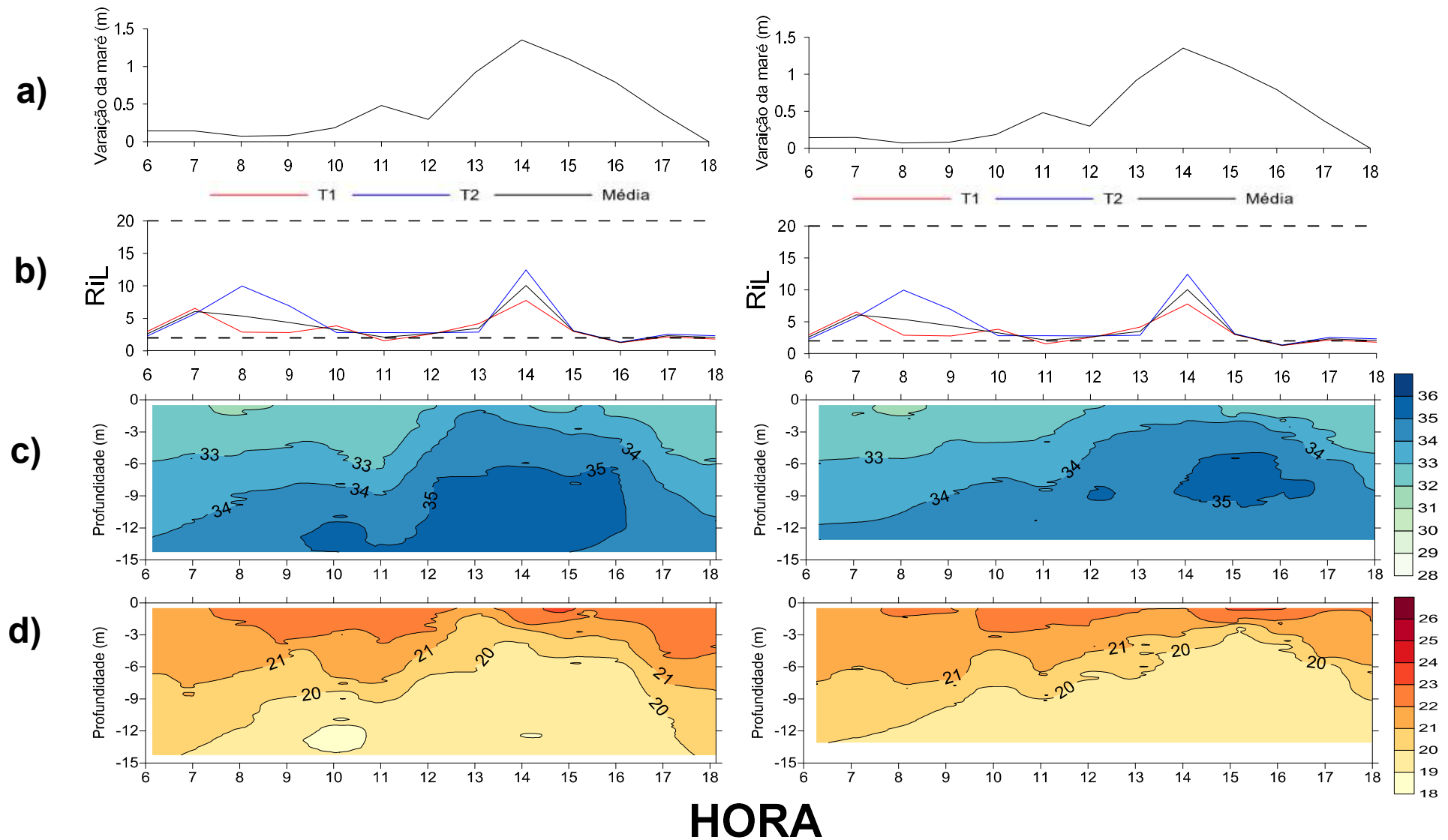
**Figura 2.2:** Perfis temporais da variação da altura da maré (a), número de Richardson por camada (b) salinidade e (c) temperatura (°C). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e o T1 (Vitória) para o ciclo QC (29/11/10).

A estratificação não é percebida no período SC (Figura 2.4) os valores encontrados de  $Ri_L$  ficaram quase sempre próximo a 2, com exceção dos momentos de estofa, onde o número de Richardson se eleva, ficando próximo de 10 (Figura 2.4b), confirmando que se a vazão fluvial é baixa, a maré é a variável que mais influencia a distribuição da salinidade nesta porção do estuário. No SS (Figura 2.3b) os valores de  $Ri_L$  assumiram valores abaixo de 2, ou seja, sem estratificação, exceto no período de baixamar (por volta de 9-10 horas), quando apresentou o valor ligeiramente superior (Figura 2.3b e c). Outros autores encontraram o mesmo padrão de variação da estratificação entre quadratura e sizígia, e conseqüentemente a mesma correlação com o número de Richardson (ZEM, 2008; MANTOVANELLI et al, 2004; GENZ, 2006).

Assim como a salinidade, a temperatura, mesmo com pequena variação, também apresenta influência da maré, uma vez que as maiores temperaturas coincidem com momentos de marés baixas e as menores, com momentos de marés altas (Figuras 2.1 a 2.4d). Este fato, além da própria água marinha (mais fria) adentrando o estuário, também sofre influência da presença dos manguezais, cujas planícies entre marés faz com que em momentos de preamar, a água do estuário fique por algum tempo armazenada nessas áreas, possibilitando seu aquecimento. Sendo assim, as maiores temperaturas estão relacionadas com as águas advindas das partes mais a montante do estuário, tanto as que ficam estocadas nas áreas de manguezais durante a preamar quanto as dos rios, e as mais frias trazidas do oceano. A mesma relação pode ser feita também para os momentos de quadratura e sizígia, ou seja, na quadratura, o alcance dessas áreas é menor, não elevando significativamente a temperatura (Figuras 2.1 a 2.4d).



**Figura 2.3:** Perfis temporais da variação da altura da maré (a), número de Richardson por camada (b) salinidade e (c) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e o T1 (Vitória) para o ciclo SS (22/09/10).



**Figura 2.4:** Perfis temporais da variação da altura da maré (a), número de Richardson por camada (b) salinidade e (c) temperatura (°C). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e o T1 (Vitória) para o ciclo SC (03/12/10).

De um modo geral, observou-se que nos momentos de quadratura o estuário mostrou-se parcialmente misturado. No período chuvoso nos momentos de estofa observou-se uma forte estratificação. Tal situação é propiciada pela pequena amplitude da maré e um pequeno aumento de descarga de água doce dando origem ao mecanismo do entranhamento (*entrainment*). Este processo é uma transferência unidirecional, onde o sal da camada inferior passa para a camada superior, que é menos salina, através da advecção, dando origem a um movimento estuário acima na camada de fundo (MIRANDA; MESQUITA; FRANÇA, 1995).

Por outro lado, os ciclos de sizígia apresentaram características de estuários bem misturados, com exceção dos períodos de estofa no SC. Dessa forma, nos momentos de sizígia, o processo predominante é a difusão turbulenta, que juntamente com o entranhamento, tendem a ocasionar a mistura do ambiente. Os processos turbulentos podem ser de três tipos, aqueles gerados pelo atrito com o fundo ou bordas; aqueles gerados pela influência do gradiente vertical de salinidade e a turbulência originada na superfície através da atuação do vento e das ondas (DYER, 1997). Estes processos são propiciados pelo aumento da amplitude da maré em relação à quadratura, onde as velocidades são maiores, e conseqüentemente o atrito, provocando uma desestabilização da coluna d'água e quebra da estratificação gerando uma maior mistura.

A diferença essencial entre entranhamento e difusão turbulenta é o grau de turbulência nas camadas superficial e de fundo. Se a turbulência for igual nas duas camadas, o entranhamento será mínimo e toda a mistura será por difusão turbulenta. Por outro lado, se a camada inferior é estática, então não haverá difusão turbulenta ao longo da interface e a mistura será inteiramente por entranhamento. Dessa forma, o entranhamento ocorre em altos valores de  $R_{iL}$  e a difusão turbulenta em baixos. Conseqüentemente, estuários altamente estratificados são dominados pelo entranhamento e nos parcialmente misturados, a difusão turbulenta será dominante (DYER, 1997).

### 2.3.2 CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO

De acordo com Mantovanelli e colaboradores (2004) são as correntes de marés as principais forçantes atuantes nos processos de mistura e estratificação, ficando



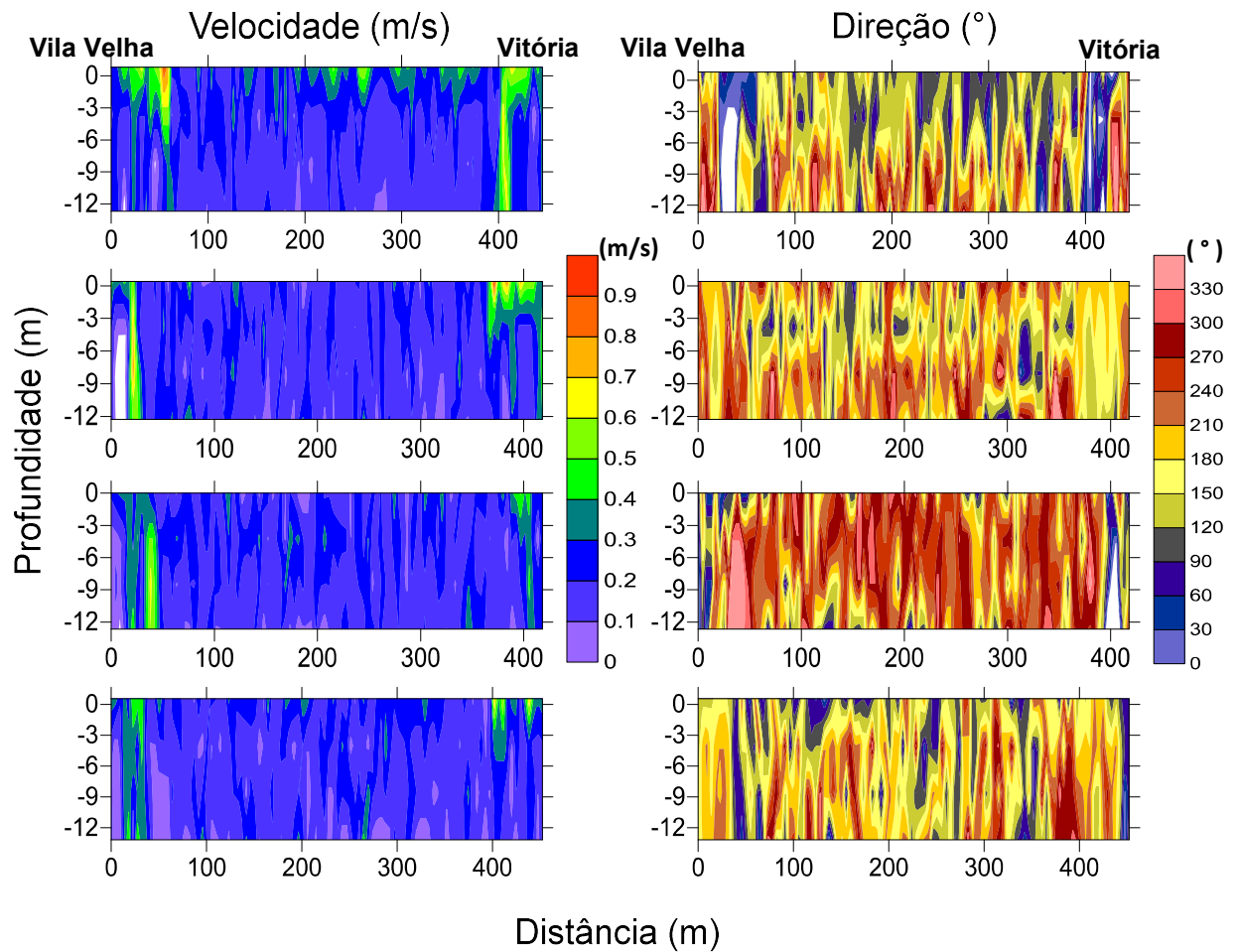
secundariamente a descarga de água doce. Além disso, em momentos de maré de sizígia há um aumento nas velocidades das correntes devido ao aumento da amplitude da maré, colaborando para o aumento dos processos de mistura. Por outro lado, quando há uma diminuição na velocidade destas correntes, os processos de mistura dão lugar aos advectivos gerando uma maior estabilidade vertical, possibilitando assim o aparecimento de estratificações, o que corrobora com o que foi descrito acima para a área, coincidindo com resultados encontrados por outros autores (KJERFVE, 1986; KIM; VOULGARIS, 2008; SIEGLE et al, 2009; MANTOVANELLI et al, 2004;). Em contrapartida, atuando como um *feedback*, o grau de estratificação da salinidade governa a dinâmica estuarina, uma vez que um aumento desta impede a mistura vertical, decrescendo a viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) (SCULLY, FRIEDRICHS, BRUBAKER, 2005).

Mantovanelli e colaboradores (2004) mostraram que é comum uma maior assimetria da maré nos momentos de sizígia, devido à intensificação das correntes, sendo importante salientar que a assimetria da maré influencia o padrão de estratificação em toda a coluna d'água (KIM; VOULGARIS, 2008). De acordo com Scully, Friedrichs e Brubaker (2005) a maré vazante apresenta uma maior estratificação de salinidade que a enchente, fato este observado para os períodos de quadratura neste trabalho, porém em momentos de sizígia, observa-se uma maior estratificação nos períodos de enchente (Figuras 2.1 a 2.4c). Isso acontece devido à diferença das correntes residuais longitudinais nos períodos de enchente e vazante, as quais foram maiores nos períodos de vazante em momentos de sizígia e na enchente nos períodos de quadratura (ver Tabela 2.2).

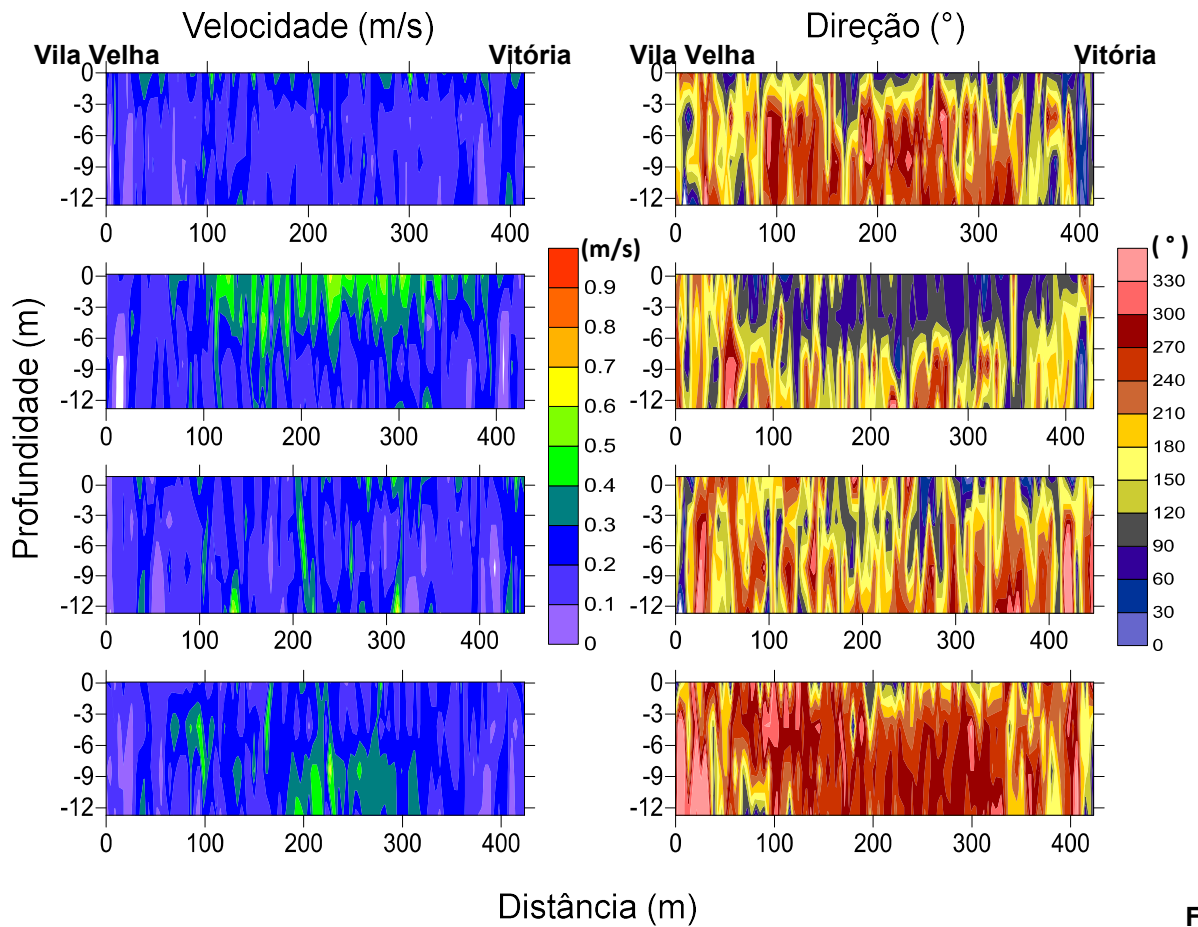
Essa relação de assimetria de velocidade é percebida nas Figuras de 2.5 a 2.8, que são os perfis transversais à desembocadura mostrando as velocidades e direção das correntes. Os valores para direção de 0 a 180° mostram as correntes saindo do estuário e os de 180° a 360° entrando. Os valores de correntes são máximos na sizígia, chegando a mais de 1m/s na vazante enquanto na enchente não passam de 0,7 m/s (Figura 2.7 e 2.8). Na quadratura, os valores atingidos são bem menores, alcançando em torno de 0,6 m/s na vazante e 0,5 na enchente (Figura 2.5 e 2.6).

Essa assimetria é também influenciada pela presença do manguezal na região a montante do estuário, o qual provoca um atraso da maré no entorno da preamar, favorecendo o aumento do tempo de enchente e a diminuição do tempo de vazante.

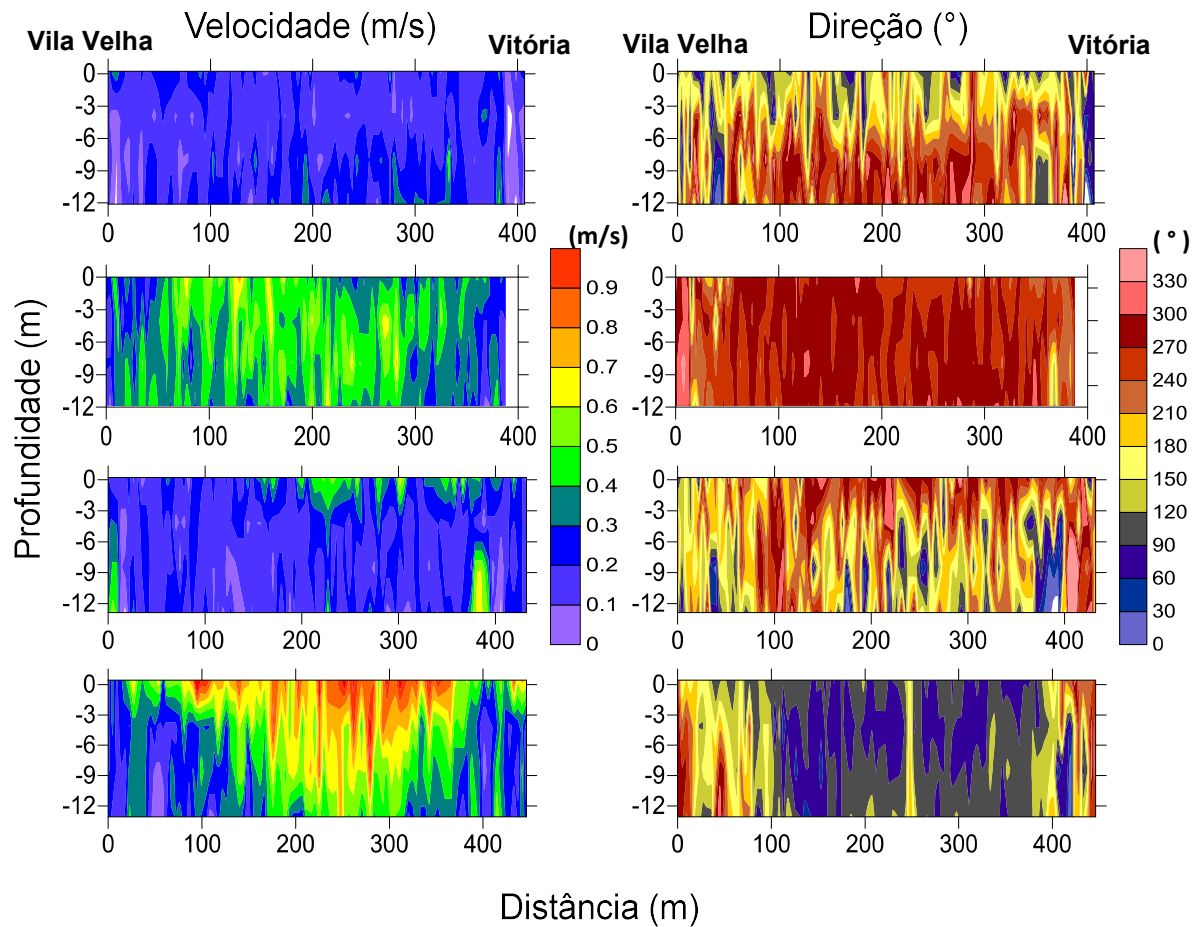
Como consequência, as velocidades de vazante tornam-se mais intensas que as de enchente (RIGO, 2004). Isto acontece devido ao canal principal ser relativamente profundo, causando uma diminuição da velocidade no final da vazante. Devido à chegada da água nas regiões entremarés, é gerado um forte gradiente de pressão em função da deformação da onda de maré, até que os manguezais estejam completamente cheios, diminuindo então esse gradiente. Quando a maré vai retornando, em direção ao mar, o gradiente vai novamente aumentando, já que a onda se propaga mais rapidamente do que a água que escoar dos manguezais, fazendo com que o tempo de enchente seja maior que o de vazante ocasionado pelo atraso na troca de enchente para vazante. Sendo assim as velocidades serão maiores quando o nível da água é menor, tanto para vazante quanto para enchente, quando as correntes fluem principalmente nos canais principais (BLANTON; ANDRADE, 2001). Nos períodos de quadratura, a influência dos manguezais é menor, deixando o estuário com características de estuários rasos, os quais geralmente possuem dominância de enchente (DYER, 1997; RIGO, 2004).



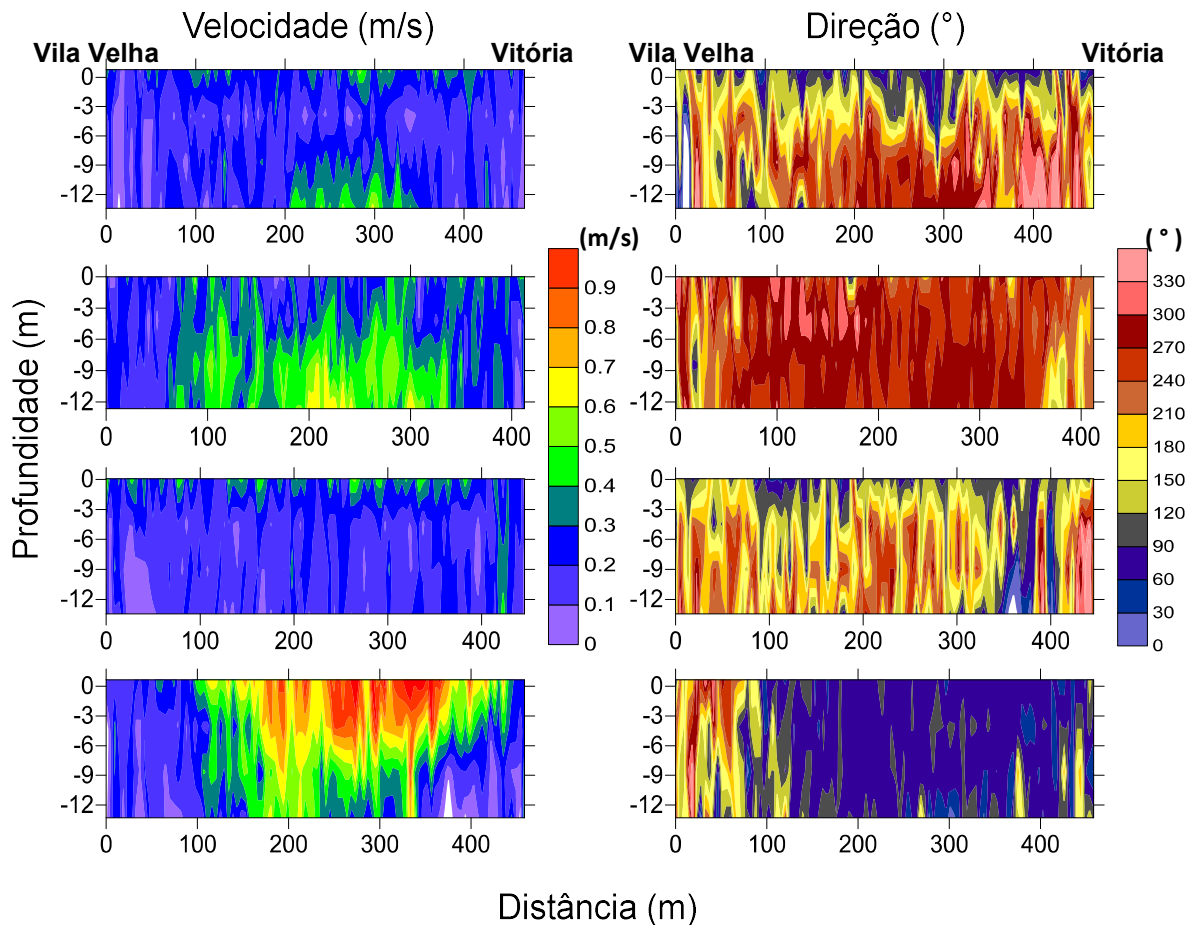
**Figura 2.5:** Velocidade e direção da corrente na seção transversal da desembocadura para o ciclo QS (15 de setembro de 2010). a) Vazante (11:29), b) baixamar (13:21), c) enchente (18:23) e d) preamar (19:41). Valores de direção entre  $30^\circ$  e  $150^\circ$  (tons de azul) indicam a maré saindo do estuário e valores  $210^\circ$  a  $330^\circ$  (tons de vermelho) indicam entrando no estuário.



**gura 2.6:** Velocidade e direção da corrente na seção transversal da desembocadura para o ciclo de QC (29 de novembro de 2010). a) Preamar (9:49), b) vazante (14:20), c) baixamar (16:24) e d) enchente (19:18). Valores de direção entre 30° e 150° (tons de azul) indicam a maré saindo do estuário e valores 210° a 330° (tons de vermelho) indicam entrando no estuário.



**Figura 2.7:** Velocidade e direção da corrente na seção transversal da desembocadura para o ciclo SS (22 de setembro de 2010). a) Baixamar (08:51), b) enchente (11:49), c) preamar (15:11) e d) vazante (17:47). Valores de direção entre  $30^\circ$  e  $150^\circ$  (tons de azul) indicam a maré saindo do estuário e valores  $210^\circ$  a  $330^\circ$  (tons de vermelho) indicam entrando no estuário.



**Figura 2.8:** Velocidade e direção da corrente na seção transversal da desembocadura para o ciclo SC (03 de dezembro de 2010). a) Baixamar (7:39), b) enchente (10:54), c) preamar (14:13) e d) vazante (16:52). Valores de direção entre 30° e 150° (tons de azul) indicam a maré saindo do estuário e valores 210° a 330° (tons de vermelho) indicam entrando no estuário.

Santiago (2007) analisando as correntes deste estuário considerou a região de acesso ao porto de Vitória regida predominantemente pela maré e Barros (2002) concluiu que pode haver uma redução dessa influência nos momentos de quadratura. Isso confirma o que indicou a estratificação, considerando a maré como agente principal na desembocadura do estuário da Baía de Vitória, exceto em períodos chuvoso com maré de quadratura, quando o gradiente vertical de densidade desempenha um papel maior.

Corroborando com o aqui encontrado, Chacaltana *et al* (2003) através de modelagens na região perceberam a intensificação das correntes quando as áreas de manguezais foram consideradas, indicando a importância do volume de água armazenado na região de inundação do manguezal para a hidrodinâmica da região. Além disso, Rigo e Chacaltana (2006) avaliaram em 50% a diferença da intensidade das correntes quando não se considera tais áreas em modelagens quando

comparados a dados experimentais, podendo-se desenvolver uma assimetria de enchente quando as áreas não foram consideradas.

Além das maiores velocidades, em momentos de sizígia percebe-se uma relativa lateralidade entre enchente e vazante. A maré enchente apresenta maiores velocidades na parte Sul da desembocadura e, a vazante na parte Norte (Figuras 2.7 e 2.8), corroborando com o padrão encontrado através de modelagens por Santiago (2007). Outro ponto que corrobora este comportamento é o que foi descrito anteriormente, onde a salinidade e temperatura têm maior variação vertical em T2 em momento de enchente, e em T1 na vazante (Figuras 2.1 a 2.4).

Comparando-se as marés de sizígia e quadratura (2.5 a 2.8), percebe-se que nas sizíguas (Figuras 2.7 e 2.8) mostraram tanto a enchente quanto a vazante ocupando quase todo o canal, enquanto que na quadratura, a enchente é preferencialmente pelo fundo e a vazante na superfície apresentando a circulação por densidade como foi descrito anteriormente (Figuras 2.7 e 2.8). Sabe-se que o maior volume de água é trocado no canal principal, porém existe um fluxo residual que é trocado nas bordas (VALLE-LEVINSON et al., 1998). Isso acontece pela formação de zonas de convergência produzida pela interação entre o fluxo de maré interagindo com a batimetria, podendo formar um forte gradiente de densidade, sendo proporcionais a amplitude da maré e a declividade das bordas do canal (UNCLES, 2002). Este fato é bem percebido durante a sizígia nas marés vazantes, onde o fluxo principal é em direção ao mar e nas laterais ocorre o fluxo residual em direção à montante do estuário (Figuras 2.7 e 2.8).

Kim e Voulgaris (2008) estudando a baía de Winyah, na Carolina do Sul (EUA) encontraram um padrão de fluxo residual da maré dividido horizontalmente em duas seções. Enquanto o forte fluxo à montante domina o canal principal, na borda o fluxo é em direção a desembocadura do sistema. Por outro lado, Valle-Levinson e colaboradores (2009) encontraram dois padrões, que se diferenciam entre momentos de sizígia e quadratura, onde no primeiro caso, o fluxo residual no canal é em direção ao mar e nas bordas à montante do canal. Já na quadratura, o inverso ocorre, sendo o fluxo no canal em direção à montante e nas bordas em direção à desembocadura.

O fluxo residual em estuários é resultado da competição entre dois processos: o bombeamento da maré (*tidal pumping*) e a circulação gravitacional. O primeiro (*tidal*

*pumping*) causa um fluxo em direção ao continente na camada superior e um fluxo em direção ao mar na camada inferior, proporcional a  $\langle a.u/h \rangle$  onde  $a$  é a amplitude da maré,  $u$  é a velocidade na superfície e  $h$  é a profundidade do canal, durante um ou mais ciclos de maré, sendo mais efetivos em estuários rasos onde a relação  $a/h$  é maior. Sendo assim, o transporte residual é em direção ao continente em áreas rasas e em direção ao mar em canais profundos, como foi visto para o período de sizígia e quadratura do período seco (Tabela 2.1). No segundo processo (circulação gravitacional), ocorre o inverso, o fluxo residual em direção ao mar é na camada superficial e em direção ao continente no fundo, induzido pelo gradiente de pressão proporcional à profundidade causado pelo gradiente de densidade. Dessa forma, o fluxo é frequentemente em direção ao continente em canais profundos e em direção à desembocadura em canais rasos. Neste caso, insere-se o período de quadratura do período chuvoso (Tabela 2.1). (PRITCHARD, 1952; WONG, 1994; LI; O'DONNELL, 1997; LI *et al.*, 1998; BLANTON; ANDRADE 2001).

### 2.3.3 CLASSIFICAÇÃO DA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE VITÓRIA

Várias são as tentativas de classificação da estrutura salina de um estuário, porém de acordo com Dyer (1997) a melhor classificação é aquela que é baseada não somente na distribuição da salinidade, mas, também nas características do fluxo. Neste contexto, o diagrama de classificação proposto por Hansen e Rattray (1966), baseado nos pioneiros Ippen e Harleman (1961) e Harleman e Abraham (1966), os quais assumem condições estacionárias da velocidade e estuários estreitos, leva em consideração, além da estrutura de salinidade, a dissipação de energia, ganho de energia potencial da coluna d'água, características estacionárias da velocidade na superfície, velocidade gerada pela descarga fluvial e circulação gravitacional. Dessa forma, essa se torna a melhor classificação, embora com suas limitações, para a classificação dos estuários (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002; SIEGLE, 2009).

Além de todas estas considerações, o diagrama é de fácil construção e interpretação levando em conta apenas dois parâmetros: o **parâmetro de estratificação** foi definido por Hansen e Rattray (1966) pela razão adimensional  $\delta S / \bar{S}$ , onde  $\delta S = S_f - S_s$  é a diferença entre os valores estacionários da salinidade de fundo ( $S_f$ ) e de superfície ( $S_s$ ) e  $\bar{S}$  é o valor estacionário da salinidade média na coluna de



água; e o **parâmetro de circulação** que é uma medida da circulação gravitacional e é determinado pela razão  $u_s/u_f$  onde  $u_s$  é o valor da corrente residual na superfície e  $u_f$  é a corrente gerada pela descarga fluvial. Em casos onde a descarga fluvial não é adequadamente conhecida, em vez de  $u_f$  utiliza-se o valor médio (no espaço e no tempo) da velocidade na coluna d'água  $\langle \bar{u} \rangle$ , definida por  $[\langle \bar{u} \rangle = (1/h) \int (1/\Delta t) \int (u dt) dz]$ , com  $\Delta t$  igual a um ou mais períodos de maré (MIRANDA; MESQUITA; FRANÇA, 1995). Os valores desses parâmetros calculados para os quatro ciclos estão apresentados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3:** Parâmetros de circulação e estratificação durante os ciclos. QS = Quadratura no período seco; SS = Sizígia no período seco; QC = Quadratura no período chuvoso; SC = Sizígia no período chuvoso.

	QS (15/09/10)	SS (22/09/10)	QC (29/11/10)	SC (03/12/10)
Us/Uf	4.653	1.369	3.804	1.993
$\delta S / S$	0.092	0.013	0.150	0.057

De acordo com os autores do diagrama, a relação entre os dois parâmetros possibilita a interpretação física dos movimentos e processos de mistura relacionados a estes, possibilitando a classificação do estuário em quatro tipos:

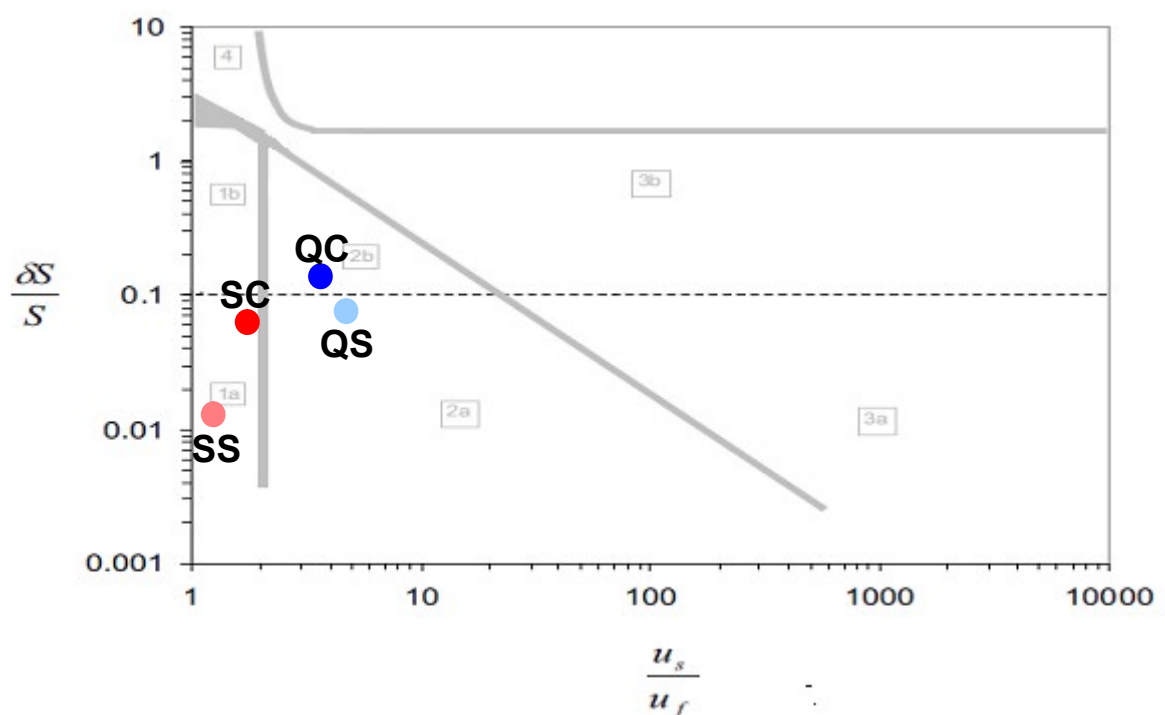
**Tipo 1** – Caracteriza regimes onde o fluxo resultante se dá em direção à desembocadura do estuário em todas as profundidades e o transporte de sal estuário acima é dado por difusão turbulenta. Subdivide-se em: 1a - fracamente estratificado (coincide com o estuário lateralmente homogêneo) e 1b - onde a estratificação de salinidade é moderada, mas próximo ao fundo não se observa fluxo resultante estuário acima.

**Tipo 2** – Estuários parcialmente misturados, ou seja, regimes onde ocorre a inversão do fluxo resultante na coluna d'água. O transporte de sal estuário acima é igualmente ocasionado por difusão turbulenta e advecção. A subdivisão em 2a e 2b também ocorre, com este último (2b) tendendo a apresentar uma estratificação vertical mais evidente que o primeiro.

**Tipo 3** – O transporte de sal estuário acima ocorre quase exclusivamente pelo processo advectivo, como é característica dos fjords.

**Tipo 4** – Este tipo tem estratificação de salinidade máxima e corresponde aos estuários de cunha salina.

Os valores encontrados (Tabela 2.3) foram plotados no diagrama (Figura 2.9), onde os pontos em tons de vermelho representam os ciclos de sizígia e os de azul, os de quadratura. E os mais escuros representam o período chuvoso e os claros o período seco.



**Figura 2.9:** Classificação do estuário de acordo com o diagrama de estratificação e circulação proposto por Hansen e Rattray, 1966. **Tipo 1** – bem misturado: 1a) lateralmente homogêneo; **Tipo 2** – parcialmente misturado: 1b) com estratificação mais evidente que 1b; **Tipo 3** – fjords; **Tipo 4** – cunha salina.

Dessa forma, a desembocadura do estuário da baía de Vitória pode ser classificada como bem misturada e lateralmente homogênea no período de sizígia e na quadratura como parcialmente misturado com uma estratificação mais evidente no período chuvoso. Este padrão coincide com a classificação proposta por Neves e colaboradores (no prelo) para uma porção mais à montante do estuário, e com o que foi descrito acima para os perfis de salinidade e corrente, bem como o que foi encontrado nos cálculos do número de Richardson em camada.

Sendo assim, no período de quadratura, o estuário apresenta um fluxo residual bidirecional devido à circulação gravitacional, característica de um estuário parcialmente misturado, que é um movimento em duas dimensões responsável pelo efeito advectivo e pelos transportes de sal estuário abaixo na camada superior e estuário acima, na inferior (MIRANDA, 2002). Devido a isso, a estratificação tem intensidade suficiente para inibir a atuação da turbulência gerada pelo fundo, ao longo da coluna d'água, gerando pequeno movimento na haloclina. Neste caso tanto os gradientes barotrópicos e baroclínicos influenciam na mistura, devido ao fato de se oporem e, cada um possuir maior força na maré enchente e vazante, respectivamente, bem como o entranhamento que é o fator mais importante na estofa. Quando a estratificação vai diminuindo, existe um domínio do componente barotrópico, gerando uma mistura vertical relativamente mais intensa, permitindo o alcance da turbulência gerada pelo cisalhamento no fundo na porção superior da coluna d'água. As diferenças de salinidade entre a superfície e o fundo diminuem, exceto na estofa, principalmente de enchente, quando a estratificação pode novamente aparecer, devido ao processo de entranhamento. Porém no restante do ciclo, os processos advectivos tendem a dominar (DYER, 1995).

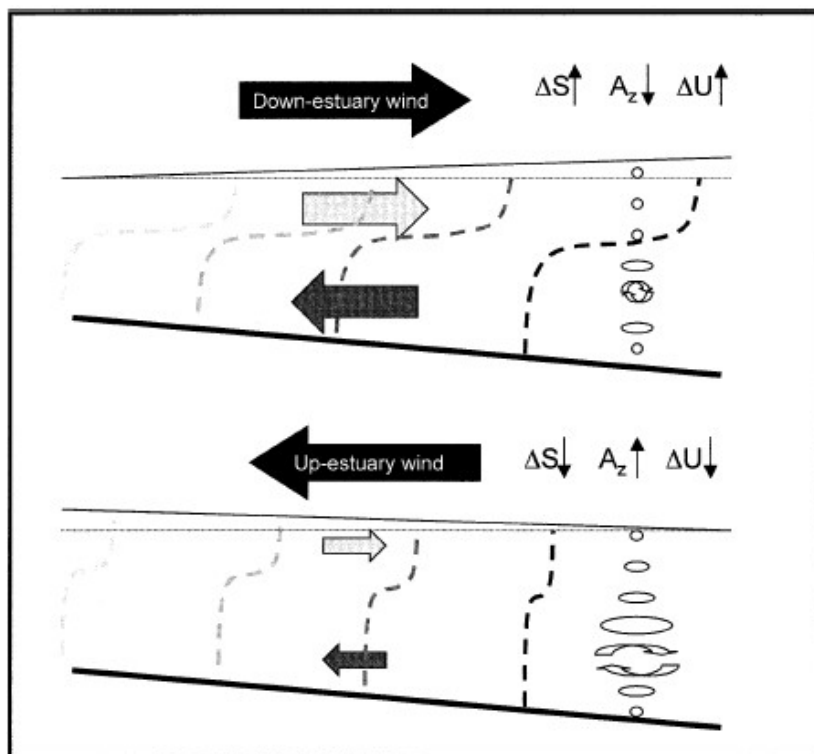
Características dos estuários bem misturados descrevem os processos atuantes no período de sizígia, já que possuem uma larga trajetória do movimento de maré com grande cisalhamento de velocidade, tanto na direção vertical, quanto na horizontal (DYER, 1997). Este cisalhamento é capaz de estender-se por toda a coluna d'água, gerando a turbulência e provocando mistura, já que a estratificação não existe. Kjerfve (1986) classificou o NORTH SEA INLET SYSTEM como tipo 1a de acordo com a classificação acima. Segundo o autor essa mistura foi possível devido à limitada entrada de água doce no sistema, o que resulta em uma circulação gravitacional ausente e estratificação extremamente fraca.

### *2.3.4 – A INFLUÊNCIA DO VENTO NA CIRCULAÇÃO*

O vento é uma das forçantes que podem atuar na circulação estuarina (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Mas entender como é a sua atuação dentro de um estuário não é uma coisa simples, devido a diversas outras variáveis que também influenciam este ambiente. Sabe-se, porém, que o vento tem uma grande habilidade de influenciar a circulação interagindo com o gradiente longitudinal de densidade e

também de criar ou destruir a estratificação através da advecção horizontal. Porém, na maioria das modelagens de hidrodinâmica estuarina, o vento é quase sempre tratado somente como uma fonte de energia cinética que promove a mistura (SCULLY; FRIEDRICH; BRUBAKER, 2005).

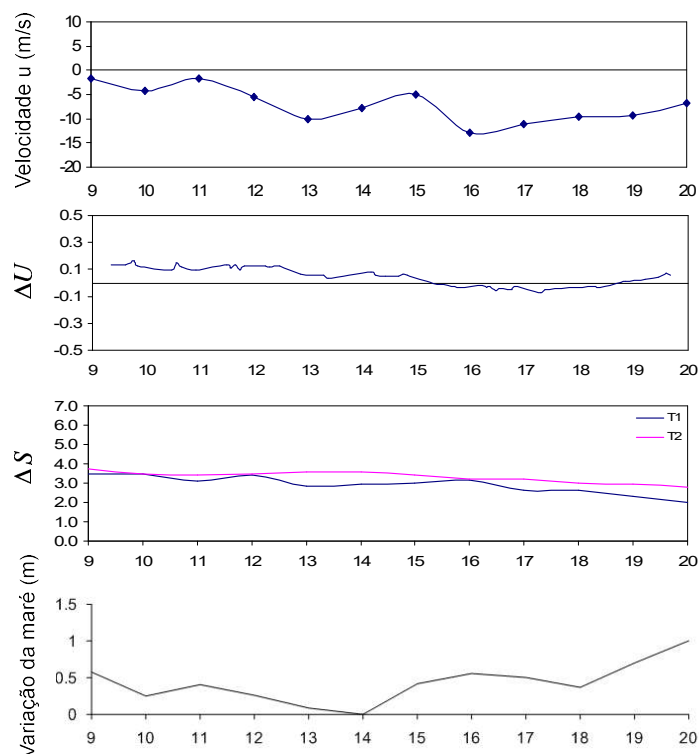
Geyer (1997) demonstrou que ventos em direção ao mar aumentam o fluxo neste sentido, reduzindo o gradiente longitudinal de salinidade e a estratificação vertical em estuários rasos. Scully, Friedrichs e Brubaker (2005) demonstraram que durante períodos de ventos energéticos em estuários parcialmente misturados, o vento ao longo do canal é o mecanismo dominante na circulação estuarina exercendo o principal papel na estratificação e desestratificação. Segundo estes autores existem uma correlação inversa entre a troca de fluxos (*Exchange flows* =  $\Delta U$ : positivo, coincide com circulação por densidade) e a componente longitudinal (leste-oeste) do vento. Dessa forma, eles mostram um claro padrão onde ventos estuários abaixo aumentam a circulação e como consequência, a estratificação vertical de densidade. Quando a direção do vento é estuário acima, o inverso acontece (Figura 2.10).



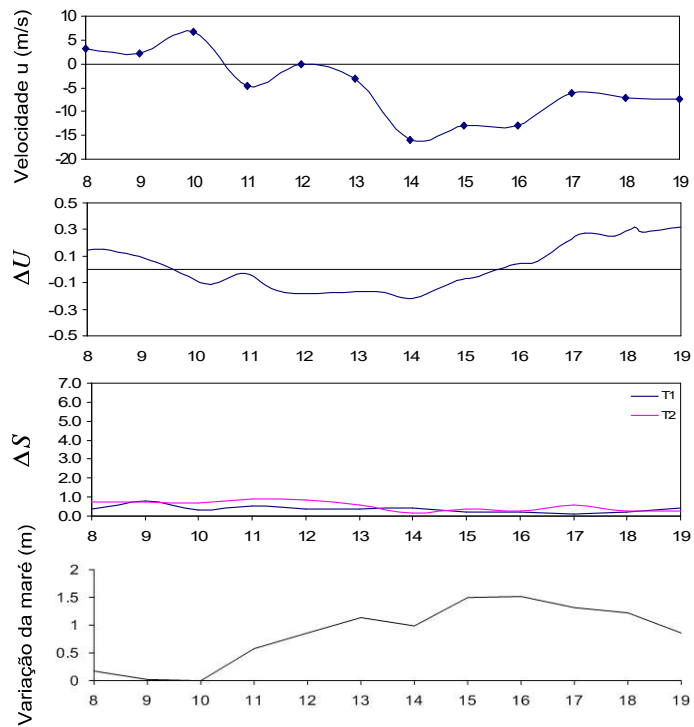
**Figura 2.10:** Modelo de influência do vento na circulação estuarina e no perfil vertical de estratificação. **Fonte:** SCULLY, FRIEDRICH, BRUBAKER, (2005).

As Figuras 2.11 a 2.14 mostram a variação temporal da maré e dos parâmetros  $\Delta U$ ,  $\Delta S$  e a componente longitudinal do vento (valores positivos indicam ventos estuário abaixo). A partir da análise dessas Figuras, percebe-se que o vento é quase sempre em direção ao continente, com velocidades moderada a alta, além da presença da brisa marinha existente na região (REIS Jr., et al 2002), com exceção do período de 8:00 as 10:30 no ciclo SS, onde é em direção ao mar.

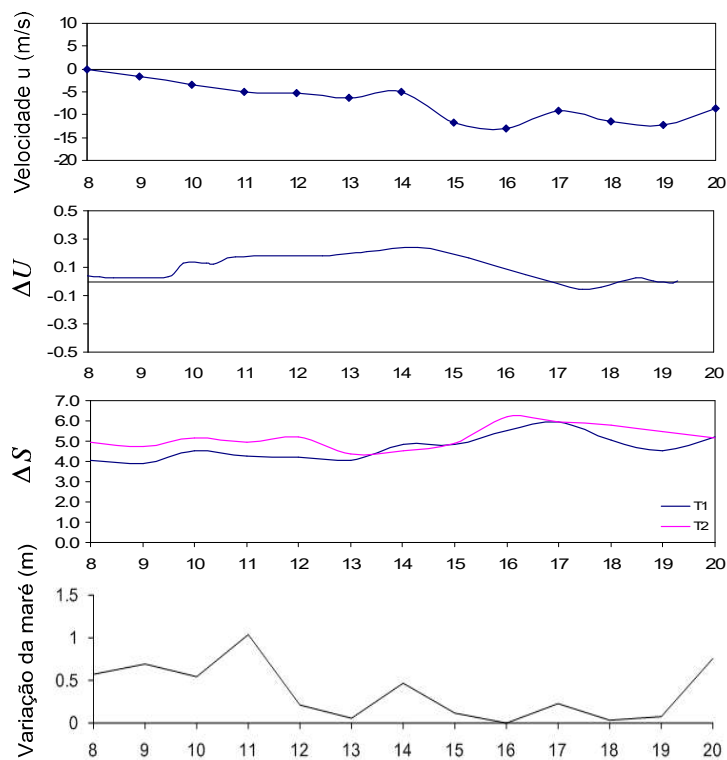
De acordo com o modelo citado (Figura 2.10), uma vez que o vento flui sempre nesta direção e aumentando ao longo do dia, deveria existir uma diminuição em  $\Delta S$  e  $\Delta U$  como consequência, mas isso não é observado. Ao contrário, onde a troca de fluxo ( $\Delta U$ ) aumenta nos momentos de vazante e baixamar, e diminui no período de enchente e preamar em todos os ciclos, independentemente da situação do vento. Já a estratificação vertical ( $\Delta S$ ) tende a aumentar nos momentos de baixamar e preamar e diminuir nos momentos de enchente para os ciclos, também independentemente do vento. Não há evidência de influência determinante do vento na circulação neste trecho do estuário durante os ciclos estudados.



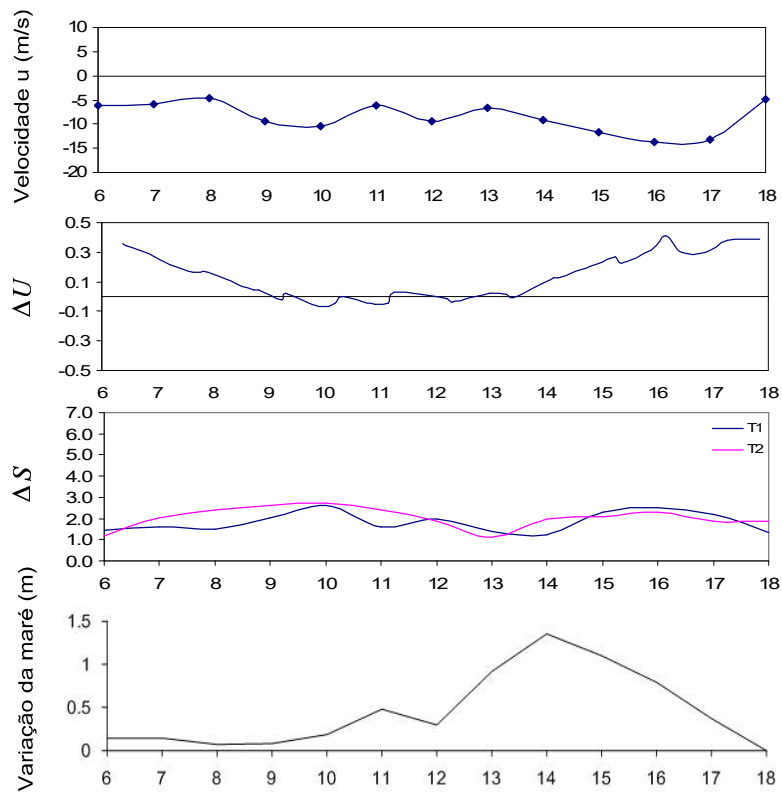
**Figura 2.11:** Variação temporal da velocidade longitudinal do vento (a), da circulação estuarina (b), da estratificação vertical (c) e da variação da maré (d) para o ciclo QS (15/09/2010).



**Figura 2.12:** Variação temporal da velocidade longitudinal do vento (a), da circulação estuarina (b), da estratificação vertical (c) e da variação da maré (d) para o ciclo SS (22/09/2010).

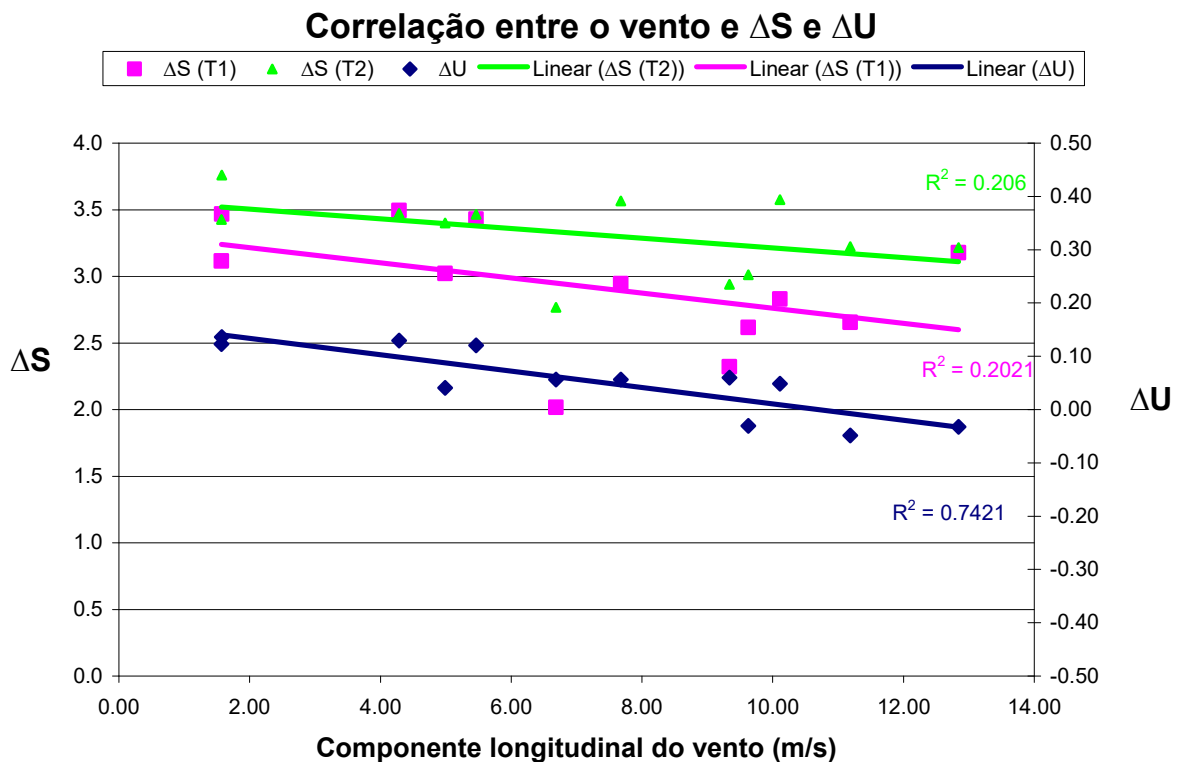


**Figura 2.13:** Variação temporal da velocidade longitudinal do vento (a), da circulação estuarina (b), da estratificação vertical (c) e da variação da maré (d) para o ciclo QC (29/11/2010).



**Figura 2.14:** Variação temporal da velocidade longitudinal do vento (a), da circulação estuarina (b), da estratificação vertical (c) e da variação da maré (d) para o ciclo SC (03/12/2010).

Porém, percebeu-se uma correlação entre a velocidade do vento e  $\Delta U$  no ciclo de QS (Figura 2.15) onde um valor de  $R^2=0,74$  de coeficiente de determinação foi encontrado, ou seja, quando a intensidade do vento aumenta, a circulação estuarina diminui. Por outro lado, essa correlação com a estratificação não foi tão pronunciada, ficando em torno de  $R^2=0,2$ , mostrando que o vento não teve capacidade de atuar na circulação, ficando apenas com o papel secundário, atuando como fonte de energia atuante nas correntes. Neste caso, o vento só teve força para atuar, pois os outros processos que regem a circulação neste estuário não estavam proeminentes, ou seja, um período de quadratura, com baixas velocidades de correntes e na estação seca, com baixa vazão fluvial.



**Figura 2.15:** Correlação entre as variáveis propostas no modelo e a componente longitudinal do vento para o ciclo QS.

De acordo com Geyer (1997) variações de curto prazo na força do vento devidos aos ciclos de brisas marinhas também influenciam na estrutura da salinidade, porém isto não foi percebido para região embora as magnitudes do vento sejam altas. Schettini, Carvalho e Trucollo (1999) estudando a região da Enseada de Armação de Itapocory em Santa Catarina encontraram o padrão de correntes obedecendo mais diretamente o regime de ventos que a oscilação da maré, já que a região apresenta uma brisa marinha atuante. Porém, as velocidades de correntes são geralmente inferiores a 0,1 m/s, o que não acontece de um modo geral para a desembocadura da Baía de Vitória.

Efeitos do vento são difíceis de quantificar devido às ondas, além de depender não somente da velocidade do vento, mas da sua duração, pista, profundidade da água e a rugosidade da superfície da água (CARTER, 2002). Santiago (2007) considerou, em seu trabalho, o vento desprezível na região da Baía de Vitória, por haver pouca pista para o vento predominante na região, que é de Nordeste. Bernardes e Miranda (2001) em estudos no sul do sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape e no



Canal Bertioga, com a primeira região alcançando 22m de profundidade e a segunda 15m, encontraram a maré e a descarga de água doce como principais forçantes da circulação, e o vento somente com uma influência secundária.

Neste estudo, o vento não apresentou uma influência direta na circulação estuarina, com exceção da influência de forma secundária no ciclo de quadratura no período seco. Porém, de acordo com Dyer (1997) medidas feitas em um ou poucos ciclos são improváveis de serem representativas. Dessa forma, é necessário que seja feita uma melhor avaliação da influência do vento na hidrodinâmica desta região.

### 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A desembocadura do estuário da baía de Vitória tendeu a apresentar uma estratificação parcial nos períodos de quadratura e pouca estratificação no período de sizígia, onde a turbulência é efetiva para gerar a mistura. Porém, com efeito do aumento da entrada de água doce no sistema que ocorre no período chuvoso, gera uma tendência à estratificação, provocada pelo desenvolvimento de uma haloclina, impedindo a eficácia da fricção do fundo na sua efetividade para gerar mistura, mesmo nos períodos de sizígia, embora com menor intensidade.

Este padrão foi mostrado tanto pela análise da estratificação através da salinidade e o número de Richardson em camada, quanto pelas correntes. Sendo assim, essa região pode ser classificada pelo diagrama de circulação-estratificação como do tipo 1a nos períodos de Sizígia e 2a no período de quadratura seco e 2b no período de quadratura chuvoso.

O padrão de circulação neste trecho do estuário é influenciado principalmente pela maré, com pequena influência da descarga fluvial, uma vez que a chegada de água doce no sistema é pequena. O vento, apesar de apresentar-se em altas velocidades, tem um papel secundário nos processos de mistura estuarina, apenas quando a influência dos outros processos é pequena.

## **CAPÍTULO 3 – FLUXO DE PROPRIEDADES (ÁGUA, SAL E MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO) NA DESEMBOCADURA DA BAÍA DE VITÓRIA, ES.**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

O cálculo dos fluxos longitudinais de sal e material particulado em suspensão é a forma mais adequada para analisar grandes quantidades de dados hidrográficos estuarinos (MEDEIROS; KJERFVE, 2005), uma vez que torna possível melhor visualização da resultante do transporte.

Medidas de fluxos de sedimento particulado em suspensão (MPS) são segundo Medeiros e Kjerfve (2005), um meio útil para analisar processos hidrodinâmicos, os quais servem para elucidar o processo físico atuante no estuário. Dessa forma, através de estudos do comportamento do material particulado em suspensão, se pode conhecer o seu tempo de residência no estuário, a atuação da corrente de maré no transporte de sedimentos, entre outros (DYER, 1997), ou seja, a determinação de sua origem (marinha ou fluvial), e/ou a direção para a qual ele será transportado, é de fundamental importância em regiões portuárias, como é o caso da Baía de Vitória, já que esse sedimento poderá se depositar, interferindo nos canais de navegação.

Especulações são feitas quanto a esse transporte, também devido ao tipo de sedimento encontrado nestes ambientes, que são geralmente lamosos com elevado teor orgânicos, permitindo que outras substâncias, eventualmente substâncias tóxicas, se adsorvam a eles, e então sendo transportados de um local para outro.

Como o curso do rio é sempre em direção à desembocadura, têm-se uma idéia que estuários são sempre exportadores de materiais, porém, nem sempre isto ocorre. Estes ambientes agem como um filtro, retendo grande parte das substâncias provenientes da bacia de drenagem e da região costeira adjacente.

Alem disso, inúmeras são as variáveis que podem influenciar o transporte de material em suspensão tais como, correntes, variações sazonais (através de variações na descarga fluvial), variações da amplitude da maré entre a quadratura e

sizígia, a presença de manguezais nas planícies de marés, utilização das áreas para navegação e portos, entre outros. Isto torna, a análise desse transporte extremamente complexa, evidenciando que longas séries de dados sejam as mais adequadas para entendimento do processo.

Sendo assim, este capítulo tem como objetivo avaliar os fluxos do material particulado em suspensão e sal em quatro ciclos de maré, a fim de possibilitar uma comparação entre eles, bem como correlacioná-los as correntes residuais contribuindo no conhecimento do transporte sedimentar da desembocadura da baía de Vitória – ES.

### 3.2 METODOLOGIA

Foram realizados 4 campanhas de coleta de dados (Tabela 3.1), sendo duas na estação seca e duas em estação chuvosa. Para cada estação foram obtidos dados de um ciclo de maré de sizígia e um ciclo de maré de quadratura. Dessa forma, os ciclos de quadratura na estação seca serão considerados QS, os de sizígia na mesma estação SS, já para estação chuvosa, os ciclos de sizígia serão representados por SC e quadratura por QC.

Tabela 3.1: Campanhas realizadas.

	Seca	Chuvosa
Quadratura	15-set-10	29-nov-10
Sizígia	22-set-10	03-dez-10

Em cada campanha, foram coletadas amostras de água (500 ml) a cada hora (13 amostragens) com auxílio de uma garrafa de Van dorn em dois pontos ao longo do transecto (T1 e T2), e em três profundidades (superfície, meio e fundo totalizando 39 amostras por ciclo), ficando armazenadas em ambiente escuro até o dia seguinte, quando foi realizada a filtragem.

No mesmo instante em que as amostras foram coletadas, foram feitas perfilagens na coluna d'água com um CTD OBS3A da *Campbell*. A partir da salinidade e temperatura, obtiveram-se os valores de massa específica, os quais foram calculados utilizando a equação de estado da água do mar à pressão atmosférica  $\rho = \rho(S, T)$ .

As amostras foram filtradas, com auxílio de uma bomba a vácuo, em filtros GF/F com poros de 0,45 micrômetros previamente pesados. Posteriormente, estes filtros contendo o material em suspensão foram secos em estufa por 24 horas a temperatura de 40°C, e novamente pesados. Pela diferença do peso antes e depois da filtragem, foi obtido o peso do MPS.

Estes filtros ainda foram submetidos à queima da matéria orgânica na mufla a 550°C por 5 horas. Quando retirados da mufla, permaneceram em um dessecador até que esfriassem para novamente serem pesados obtendo-se o teor de matéria orgânica.

Foram ainda realizadas medições de velocidade e direção de corrente, de 20 em 20 minutos, utilizando um ADP (*Acoustic Doppler Profiler River Surveyor* M9 SONTEK/YSI de 3 a 0,5 KHz., que gera um perfil de velocidade em três direções através do sistema *doppler* acústico (SONTEK, 2009), mostrando a magnitude e direção das correntes, que foram posteriormente decompostas no eixo  $O_{xy}$ , dando origem às componentes longitudinais (leste-oeste) e transversais (norte-sul) em relação ao canal. A partir destes dados, cálculos de área da seção transversal e vazão instantânea puderam ser obtidos através do software do equipamento (*River Surveyor Live*).

Os fluxos foram obtidos como descrito por Miranda e Castro (1996) e Miranda e colaboradores (2002). O fluxo médio de sal ( $F_s$ ) ( $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) é a média do fluxo instantâneo ( $M_s$ ) em um ou mais ciclos de maré:

$$F_s = \frac{1}{T} \int_0^T M_s dt = \langle \overline{\rho u S h} \rangle$$

Onde,  $\overline{\rho}$  é a massa específica ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $\overline{u}$  é a velocidade (m/s) e  $\overline{S}$  é a salinidade, médias na coluna d'água, e  $h$  é a profundidade (m).

Para o fluxo de MPS a mesma relação pode ser considerada (DYER, 1995; Dyer, 1997). De acordo com Siegle *et al* (2009) deve-se excluir a massa específica e utilizar a concentração na mesma unidade métrica da velocidade do fluxo. Sendo assim, o fluxo de MPS ( $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) pode ser descrito por:

$$F_{MPS} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{MPS} dt = \langle \overline{u C h} \rangle$$

Onde,  $\overline{C}$  é a concentração média na coluna d'água de MPS ( $\text{Kg/m}^3$ ).

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1 ASSIMETRIA DA MARÉ

Para entender os fluxos residuais, é necessário um conhecimento do residual da maré, que é obtido pelo cálculo da assimetria da maré. Esta assimetria é resposta do tempo de duração e pelas velocidades longitudinais nos momentos de enchente e vazante. Mantovanelli e colaboradores (2004) para retratar a assimetria durante um ciclo de maré e associá-la aos fluxos residuais, utilizaram o índice de assimetria ( $AI_{DV}$ ). Este índice adimensional foi baseado nos parâmetros propostos por Lincoln e Fitzgerald (1998) e é representado pela soma das assimetrias de duração ( $A_D$ ) e velocidade ( $A_V$ ), onde

$$AI_{DV} = A_D + A_V$$

A assimetria de duração é descrita pela diferença entre o tempo de vazante ( $t_v$ ) e o tempo de enchente ( $t_e$ ) dividido pela somatória dos dois.

$$A_D = (t_e - t_v)/(t_v + t_e)$$

E a assimetria de velocidade é a diferença entre a velocidade longitudinal média na coluna d'água na vazante ( $\overline{u}_v$ ) e na enchente ( $\overline{u}_e$ ), também dividido pelo somatório das duas.

$$A_V = (\overline{u}_v - |\overline{u}_e|)/(\overline{u}_v + |\overline{u}_e|)$$

Sendo assim, quando:

$AI_{DV} = 0$ , a onda de maré é simétrica para duração e velocidade;

$AI_{DV} > 0$ , a circulação residual e o transporte de água são direcionados para vazante;

$AI_{DV} < 0$ , a circulação residual e o transporte de água são direcionados para enchente;

Os resultados dessa análise estão expostos na Tabela 3.2, para os ciclos de maré estudados.

**Tabela 3.2:** Assimetria de duração ( $A_D$ ), tempo ( $A_v$ ) e residual ( $AI_{DV}$ ) para os quatro campos realizados.

	QUAD/SECO (15/09/10)	QUAD/CHUVA (29/11/10)	SIZ/SECO (22/09/10)	SIZ/CHUVA (03/12/10)
$A_D$	0,24	0,21	-0,30	-0,08
$A_v$	-0,12	-0,12	0,20	0,12
$AI_{DV}$	0,12	0,09	<b>-0,10</b>	0,04

Analisando a Tabela 3.2, verifica-se uma assimetria positiva (em direção ao mar) na maioria dos ciclos, exceto para o ciclo de sizígia no período seco, onde a assimetria foi em direção ao continente. Porém, este foi o único ciclo que a maré não atingiu os mesmos níveis de baixa-mar e preamar, podendo não ter representado todo o ciclo de vazante, visto que o final da vazante não atingiu o mesmo nível de baixamar anterior (Figura 3.3-a) mostrando uma assimetria de duração muito maior (-0,30), embora tenha a maior assimetria de velocidade positiva em comparação aos outros ciclos (0,20) (Tabela 3.2). Garel e colaboradores (2009) observaram uma assimetria em direção ao mar no ciclo de sizígia em momentos de baixa descarga fluvial. Segundo o autor, isso se deve à difusão turbulenta como processo dominante, dando origem a um estuário bem misturado, como ocorre nesta parte do estuário para este ciclo.

Além disso, percebe-se que os ciclos de quadratura tenderam a ter uma assimetria de duração em direção ao mar e de velocidade em direção ao continente, isso quer dizer que teve vazantes mais longas com maiores velocidades durante o período de enchente. O oposto ocorre para os ciclos de sizígia, onde as velocidades foram maiores em direção ao mar com maior tempo de enchente.

Com relação à variação entre os períodos seco e chuvoso, nota-se uma maior assimetria nos primeiros, sendo que no período chuvoso, tende a ser um pouco mais simétrico, principalmente no período de sizígia, onde o índice aproximou-se de zero.

### 3.3.2 VARIAÇÃO TEMPORAL E CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA DO MPS

As concentrações de MPS foram baixas, variando entre 0 e 55 mg/l (Figuras 3.1 a 3.4). Os valores médios foram maiores no período seco tanto de quadratura quanto



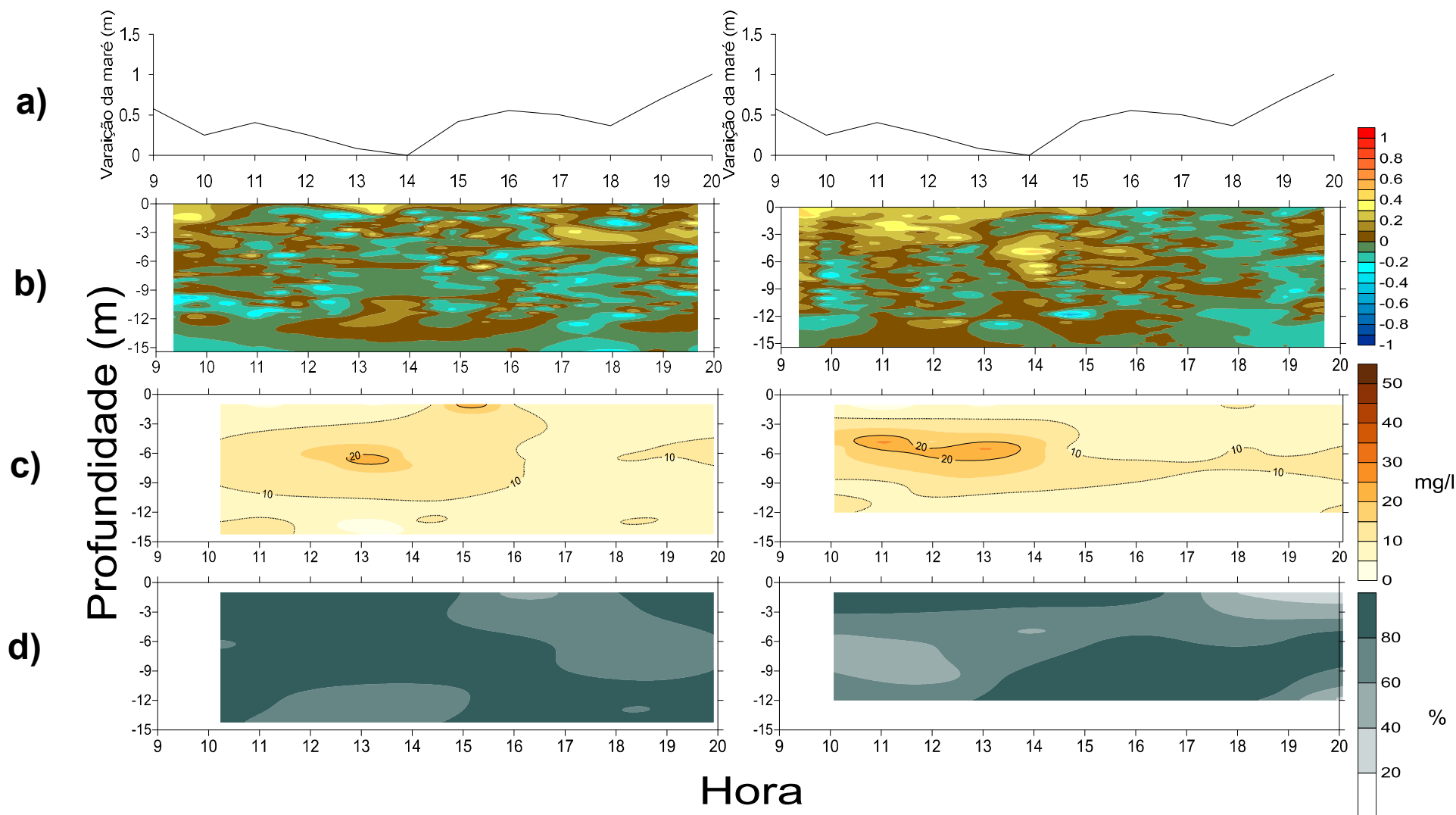
de sizígia com valores 9,48 e 25,05, respectivamente, em comparação ao período chuvoso que apresentou a concentração em torno de 6mg/l (Tabela 3.3). Esse resultado foi similar ao encontrado por Medeiros e Kjerfve (2005) para o estuário de Itamaracá que também apresentou baixas concentrações de MPS, 5-23 mg/l na estação chuvosa e as maiores na estação seca 21-39 mg/l. De acordo com os autores, o fato das concentrações serem significativamente menores na estação chuvosa, sugere que a carga de sedimento fluvial é pequena e também eficientemente filtrada pelos manguezais adjacentes. Por outro lado, a maior concentração na estação seca indica aumento das atividades biológicas e mobilização dos sedimentos. Da mesma forma, na Baía de Winyah, as maiores concentrações de MPS também estão associadas ao período seco, indicando que em momentos de baixa descarga fluvial existe uma maior ressuspensão dos sedimentos de fundo (GONI; VOULGARIS; KIM, 2009).

**Tabela 3.3:** Médias no ciclo para os pontos T1, T2 e para toda a seção transversal, da concentração do material particulado em suspensão (MPS) e da matéria orgânica (MO) e o percentual de material orgânico no material particulado.

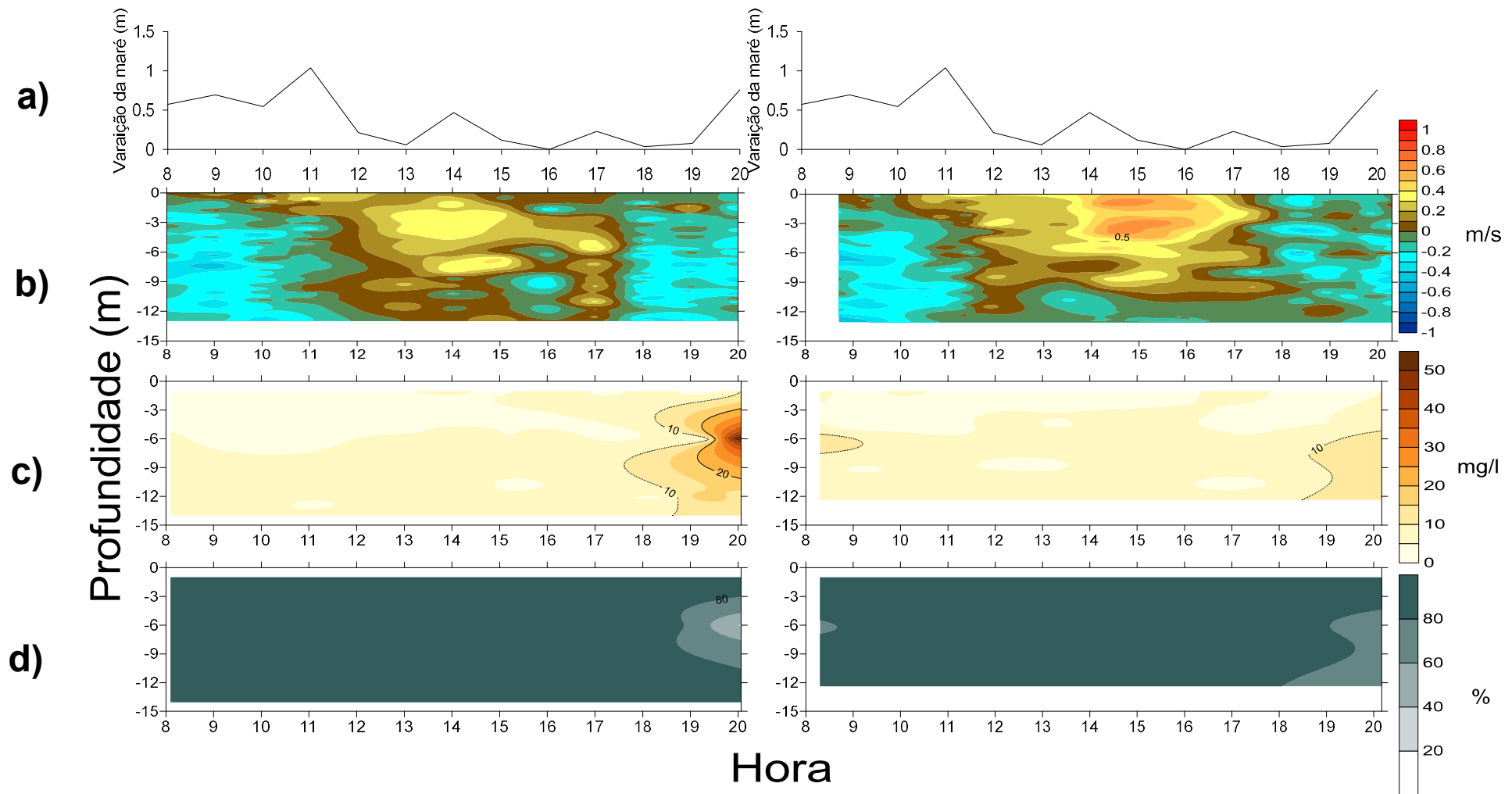
		QUAD/SECO (15/09/10)	QUAD/CHUVA (29/11/10)	SIZ/SECO (22/09/10)	SIZ/CHUVA (03/12/10)
<b>MPS</b> (mg/l)	T1	9,63	5,96	25,79	7,05
	T2	9,33	7,24	24,30	5,16
	Seção	<b>9,48</b>	6,60	<b>25,05</b>	6,10
<b>MO</b> (mg/l)	T1	7,21	5,96	11,82	6,57
	T2	7,52	7,17	12,08	5,76
	Seção	<b>7,37</b>	6,57	<b>11,95</b>	5,87
<b>MO</b> (%)	T1	74,87	100,00	45,83	93,19
	T2	80,60	99,03	49,71	100,00
	Seção	77,69	<b>99,47</b>	47,70	<b>96,15</b>

Além disso, estes autores (*op. cit*) e Kitheka; Ongwenyi; Mavuti, (2003) encontraram uma correlação entre o teor orgânico e a descarga fluvial, já que as maiores porcentagens (6%) foram em períodos de maior vazão fluvial e vice-versa. Embora as porcentagens entre o presente estudo sejam significativamente diferentes das encontradas na Baía de Winyah, a mesma correlação pode ser feita, onde as maiores porcentagens de teor orgânico são encontradas no período chuvoso, 99,47% e 96,15% para os ciclos de quadratura e sizígia respectivamente (Tabela 3.3). Mesmo que estes valores representando as maiores porcentagens, a concentração do teor orgânico no material particulado foi extremamente alta ficando no período chuvoso acima de 90% e no período seco acima de 40%, embora na quadratura os valores fossem superiores a 70% para este período.

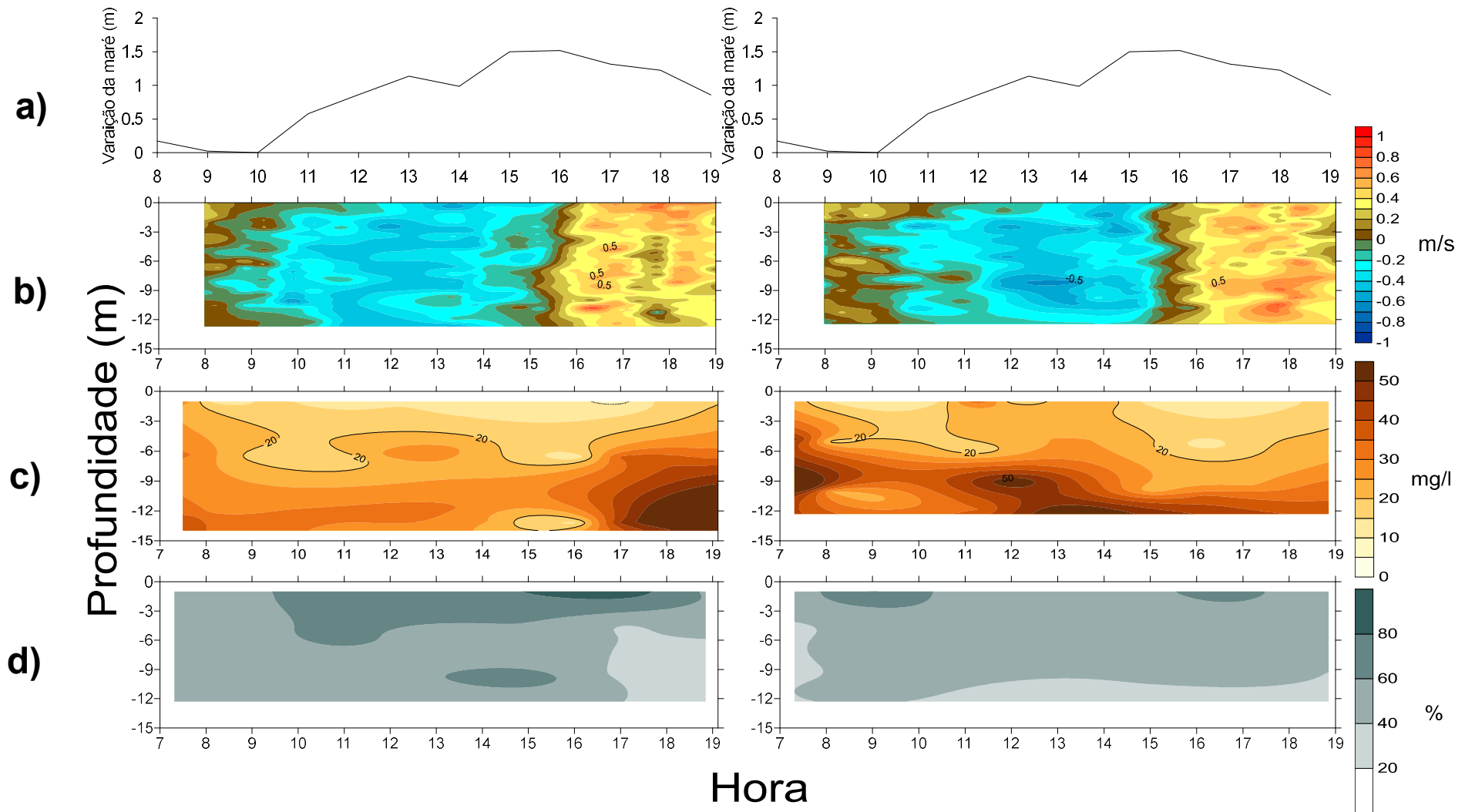
A variação temporal, nos pontos T1 e T2, das concentrações do MPS, MO, correntes longitudinais e a variação da maré, estão apresentadas nas Figuras 3.1 à 3.4. É importante ressaltar que o ponto T1 encontra-se na margem Norte do canal (Vitória) e o T2 encontra-se na margem sul (Vila Velha).



**Figura 3.1:** Variação temporal da corrente longitudinal e do MPS para o ciclo QS no dia 15/09/2010. (a) – Variação da altura da maré; (b) – Corrente longitudinal (m/s) – valores positivos indicam correntes em direção ao oceano; (c) Concentração de MPS (mg/l); (d) Teor orgânico do MPS (%). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e da direita T1 (Vitória).



**Figura 3.2:** Variação temporal da corrente longitudinal e do MPS para o ciclo QC no dia 29/11/2010. . (a) – Variação da altura da maré; (b) – Corrente longitudinal (m/s) – valores positivos indicam correntes em direção ao oceano; (c) Concentração de MPS (mg/l); (d) Teor orgânico do MPS (%). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e da direita T1 (Vitória).



**Figura 3.3:** Variação temporal da corrente longitudinal e do MPS para o ciclo SS no dia 22/09/2010. . (a) – Variação da altura da maré; (b) – Corrente longitudinal (m/s) – valores positivos indicam correntes em direção ao oceano; (c) Concentração de MPS (mg/l); (d) Teor orgânico do MPS (%). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e da direita T1 (Vitória).

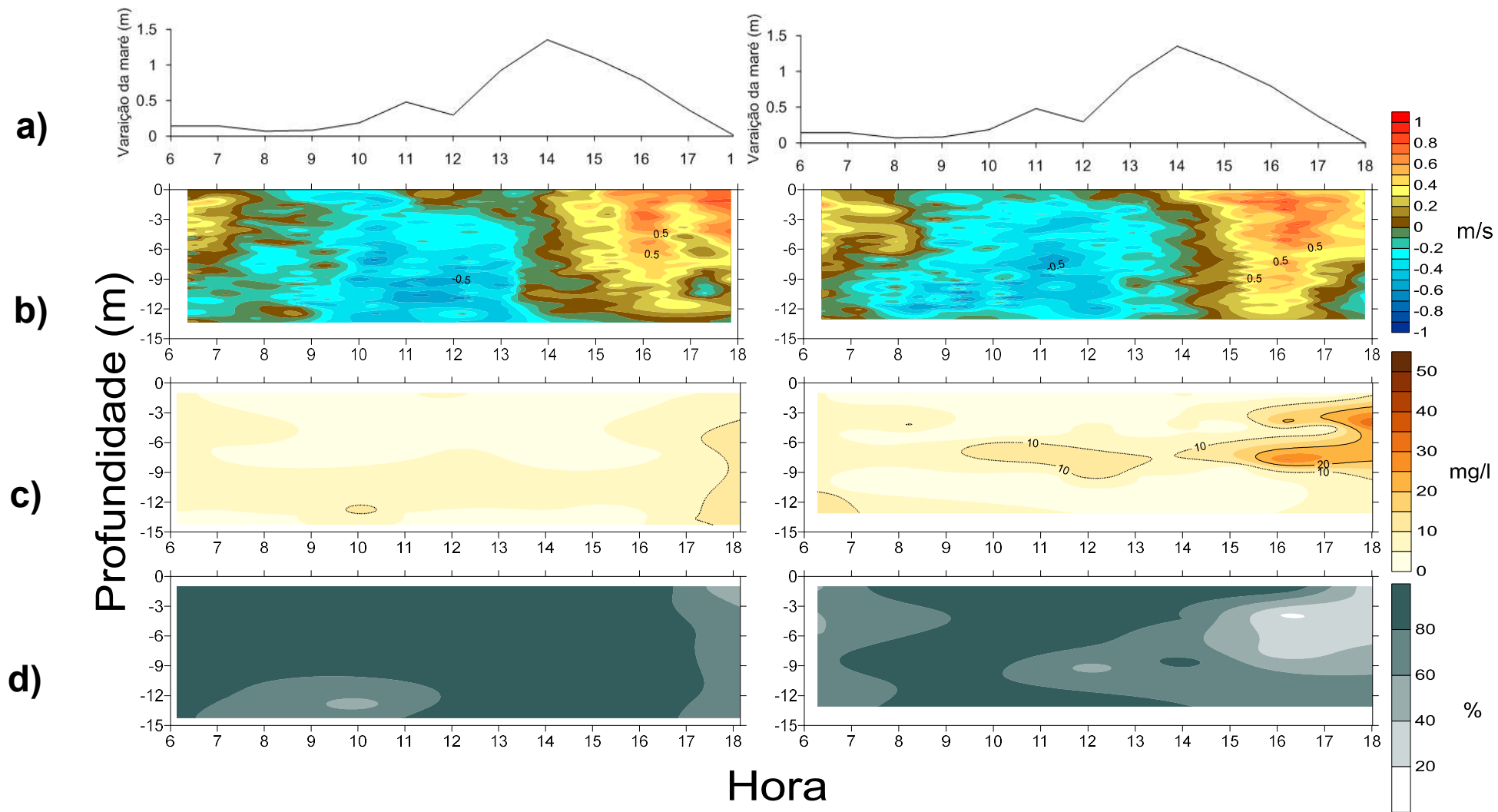


Figura 3.4: Variação temporal da corrente longitudinal e do MPS para o ciclo SC no dia 03/11/2010. . (a) – Variação da altura da maré; (b) – Corrente longitudinal (m/s) – valores positivos indicam correntes em direção ao oceano; (c) Concentração de MPS (mg/l); (d) Teor orgânico do MPS (%). A coluna da esquerda representa o ponto T2 (Vila Velha) e da direita T1 (Vitória).

Maiores concentrações de MPS e MO, de um modo geral, ocorreram nos períodos de maré baixa, ou seja, no final da vazante e início da enchente (Figuras 3.1c, 3.2c, 3.3c e 3.4c). Kitheka, Ongwenyi e Mavuti (2003) encontraram o mesmo padrão, sugerindo que as maiores concentrações na enchente estão relacionadas à entrada de água com maior turbidez e durante a vazante, atribuíram à ressuspensão do sedimento do fundo. Porém de acordo com as Figuras 3.1 a 3.4 percebe-se que os picos que aconteceram na vazante estão no meio da coluna d'água indicando material proveniente das partes superiores do estuário e os de enchente, no fundo, indicando uma ressuspensão, sendo então, o oposto ao encontrado por estes autores.

Quando as maiores concentrações ocorrem na enchente observa-se, uma corrente longitudinal mais forte para montante junto ao fundo, fazendo com que o MPS fique direcionado para dentro do estuário. O mesmo não acontece na SC (Figura 4.4b), cujo material está vindo da porção superior do estuário, já que a corrente é em direção ao mar praticamente em toda a coluna d'água. Isto está em acordo com o que Furukawa e Wolanski (1996) e Furukawa, Wolanski e Mueller (1997), encontraram em um manguezal altamente vegetado na Austrália, onde as maiores concentrações de MPS geralmente ocorrem na enchente. (KITHEKA; ONGWENYI; MAVUTI, 2003)

Relações entre as concentrações de MPS também tem sido feitas com variações da vazão. Geralmente em períodos de maiores vazões permitem maiores concentrações de MPS na coluna d'água. No entanto, essa relação é alterada em função dos impactos antrópicos na bacia de drenagem, como por exemplo, alterações hidrológicas advindas do impacto de barragens (Medeiros et al, 2011). Como o principal rio que deságua no estuário da baía de Vitória possui uma vazão controlada devido à estação de captação de água no baixo curso do rio, pouca relação evidente deve existir entre as vazões e as concentrações. Essa alteração da relação entre a vazão e as concentrações existe devido à pequena vazão fluvial natural do sistema, já que em locais onde a vazão é maior, o impacto pode tornar-se insignificante, como ocorre para o Rio Tana, no Kenia (KITHEKA; OBIERO; NTHENGE, 2005), onde as vazões não mudaram muito após a construção das barragens.

Diversos autores mostram forte correlação entre as velocidades da corrente e as concentrações de MPS (CAPO et al, 2009, KITHEKA; OBIERO; NTHENGE, 2005, ALVAREZ; JONES, 2004), entre outros. Os momentos de sizígia estão associados à maior concentração do material particulado em suspensão estando este fato relacionado ao aumento das velocidades das correntes possibilitando uma maior capacidade de remobilização do fundo e conseqüentemente liberação de material para a coluna d'água. Por outro lado, nos momentos de quadratura, quando as velocidades são menores, menor concentração de material em suspensão é percebida. De fato, isso também pode ser verificado, de certa forma, no período de seca, porém nos períodos chuvosos, as concentrações são similares entre os períodos de sizígia e quadratura (Tabela 3.2). Isto pode estar relacionado à variação da altura da maré entre quadratura e sizígia, onde no período chuvoso estudado, foi pequena, em torno de 30 cm (Figura 3.4a e 3.2a).

Por outro lado, uma não relação entre as velocidades e concentrações de MPS está ligada ao ciclo de erosão e deposição que ocorre nos estuários. De acordo com Capo e colaboradores (2009) quando a duração dos mecanismos de deposição e erosão é significativamente diferente da duração da maré, esses processos necessitarão de um tempo para alcançar a coluna d'água. Dessa forma, o pico da concentração de MPS pode ocorrer em velocidades decrescentes, algum tempo depois do momento em que velocidade crítica de cisalhamento do fundo (*threshold*) foi alcançada, isto é o efeito da histerese, que é a tendência de um material ou sistema conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou.

De acordo com Dyer (1995) o MPS normalmente responde com defasagem ao fluxo, não sendo considerado conservativo. Se não existisse essa defasagem, a direção do transporte residual seria em direção residual resultante da maré. Essa defasagem entre a corrente e a concentração do MPS pode produzir um residual do material em suspensão mesmo quando não houver um fluxo residual de água (DYER, 1997). Diversos processos podem gerar tal defasagem como descrito por DYER (1995):

**a) defasagem pela velocidade crítica para o movimento (*threshold lag*):** é necessário que a velocidade atinja certo valor para que o sedimento entre em movimento. Dessa forma, em baixas velocidades não haverá ressuspensão, portanto, não haverá material sendo lançado na coluna d'água. Por outro lado, quando a velocidade já está diminuindo, ainda haverá algum material em suspensão



em função da velocidade. Essa defasagem explica que mesmo em baixas velocidades, possa haver altas concentrações de MPS.

**b) defasagem na erosão (*erosion lag*):** significa que haverá muito mais disponibilização de material para a coluna em velocidades maiores, ou seja, a taxa de erosão é menor em baixas velocidades.

**c) defasagem da ação da corrente (*scour lag*):** é causada pela diferença no tempo entre erosão e deposição. Quando o material é erodido do fundo, ele é levado pela corrente estuário abaixo ou acima, de acordo com o fluxo dominante, mesmo que estejam em velocidades menores àquelas quando foram erodidos. Quando a turbulência não é mais capaz de mantê-lo na coluna, então irá depositar-se em outro local. Isso explica os picos de concentrações que ocorrem em meia coluna nos momentos de vazante nos períodos de sizígia chuvoso (Figura 3.4) e quadratura seco (Figura 3.1).

**d) defasagem de deposição (*settling lag*):** é de certa forma uma consequência da defasagem da ação da corrente, onde a deposição acontece com um atraso em relação à erosão. Como a deposição geralmente acontece nos momentos de estofa, esta defasagem irá ser muito importante na direção dos fluxos, a partir de uma análise da direção dos fluxos naquele momento, ou seja, se ocorre mais deposição na estofa de baixamar, haverá uma tendência de o fluxo ser em direção ao mar. Por outro lado, se ocorrer maior deposição na estofa de preamar, os fluxos tenderão a ser em direção ao continente.

Nos períodos de quadratura, ocorre a defasagem por velocidade crítica onde as maiores correntes ocorrem na enchente, quando provavelmente atingem a velocidade limite e conseguem remobilizar o sedimento. Porém, as maiores concentrações são vistas na vazante, pois ainda haveria material sendo levado pela corrente. (Figuras 3.1 e 3.2).

Nos ciclos de sizígia, não é possível notar um padrão, mas o período chuvoso tem um comportamento como o da quadratura, exceto para a velocidade crítica, já que as maiores velocidades de corrente são encontradas na vazante, fazendo com que existam altas concentrações neste momento da maré. Já o ciclo de sizígia do período seco, não ocorre a defasagem da velocidade crítica, uma vez que as velocidades junto ao fundo estão sempre altas, exceto nos momentos de estofa.

Porém logo após esse momento o sedimento é ressuspendido para a coluna d'água (Figuras 3.3 e 3.4). Podendo a menor porcentagem de material orgânico (Tabela 3.2), indicar uma remobilização de sedimentos de camadas menos superficiais.

Muitos desses processos agem simultaneamente sendo difíceis de separar. Se o fundo é facilmente erodido as concentrações na coluna d'água serão maiores, por outro lado, se o MPS deposita rapidamente quando a corrente diminui, então haverá muita variação na concentração durante o ciclo. Dessa forma, a dinâmica do MPS controla a magnitude e tempo do pico da concentração máxima do MPS.

### 3.3.3 FLUXOS DE SAL, ÁGUA E MPS

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram os fluxos instantâneos ao longo do ciclo da maré, bem como sua relação com a vazão momentânea para os ciclos de quadratura e sizígia respectivamente. Não houve um padrão claro na variação dos fluxos instantâneos nos ciclos. O que se pode observar é que houve uma maior troca de fluxos de sal e MPS na sizígia onde o prisma de maré é maior, como pode ser visto pelas maiores vazões. Porém, apresentando os menores residuais nos períodos de quadratura seco e sizígia chuvoso. De um modo geral, houve uma forte relação entre os fluxos de sal e MPS com o fluxo de água, como observado por Restrepo e Kjerfve (2000).

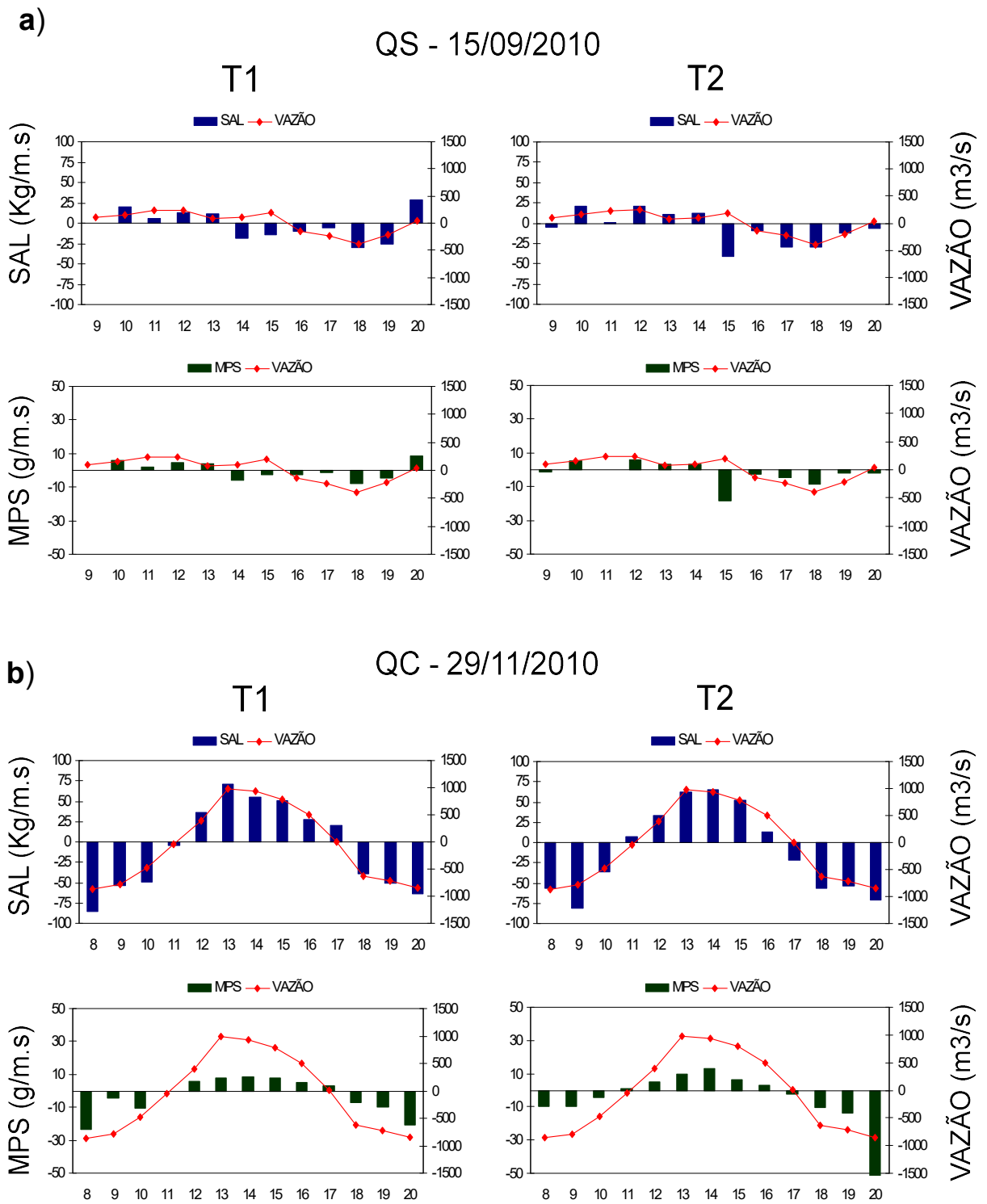
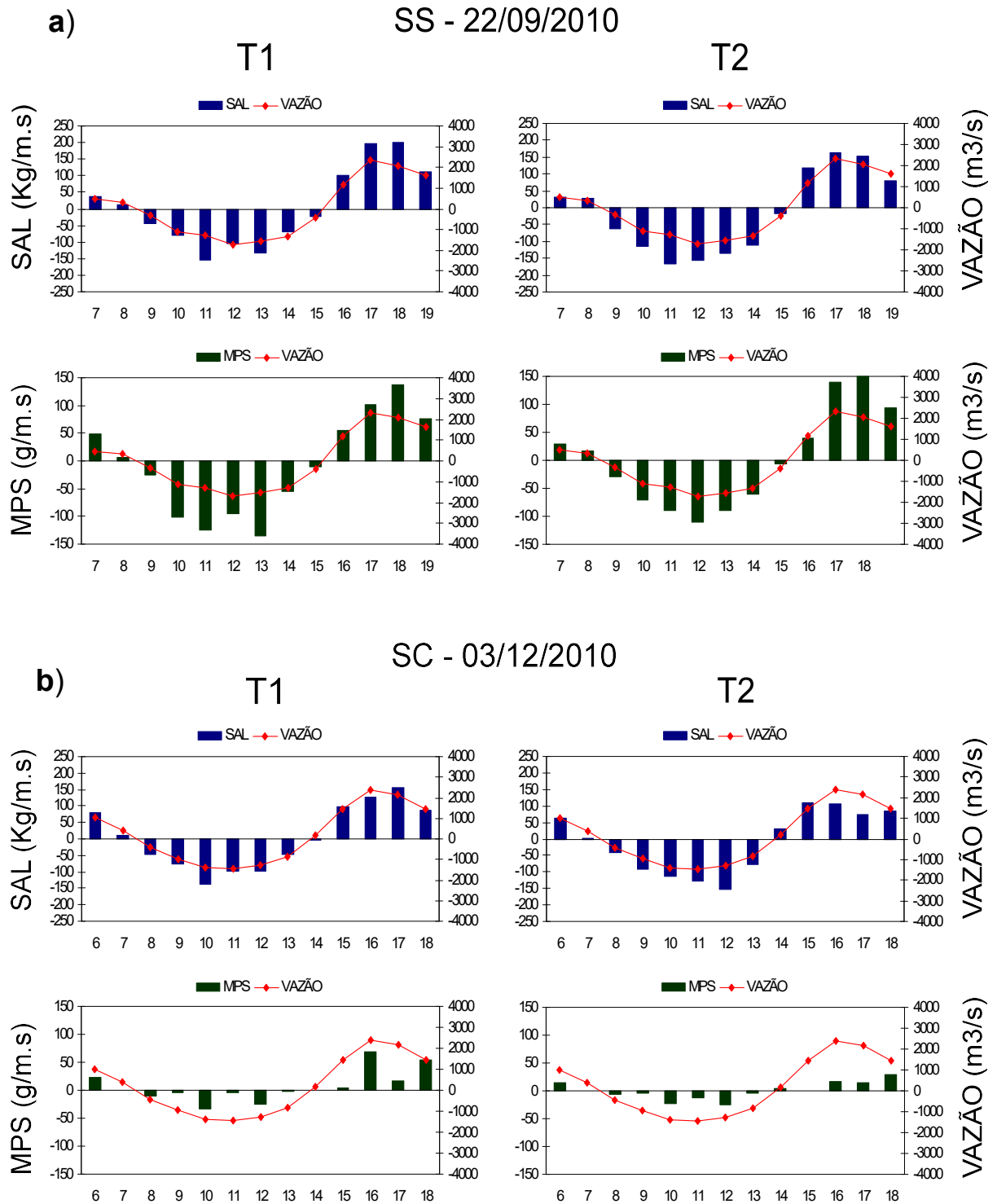


Figura 3.5: Fluxos instantâneos de sal e MPS para os ciclos de quadratura: a) período seco; b) período chuvoso.



**Figura 3.6:** Fluxos instantâneos de sal e MPS para os ciclos de sizígia: a) período seco; b) período chuvoso.

A Tabela 3.4 mostra o fluxo residual de cada ciclo e para cada ponto da seção transversal. Como se pode observar, nos momentos de quadratura, houve sempre

importação tanto de sal quanto de MPS. Por outro lado, nos ciclos de sizígia, houve importação de sal em T2 e exportação em T1, porém com o residual na seção, direcionado para dentro do estuário (Tabela 3.2 e Figura 3.7). Isso se deve ao fato de as correntes de enchente terem maiores velocidades em T2 e as de vazante, em T1.

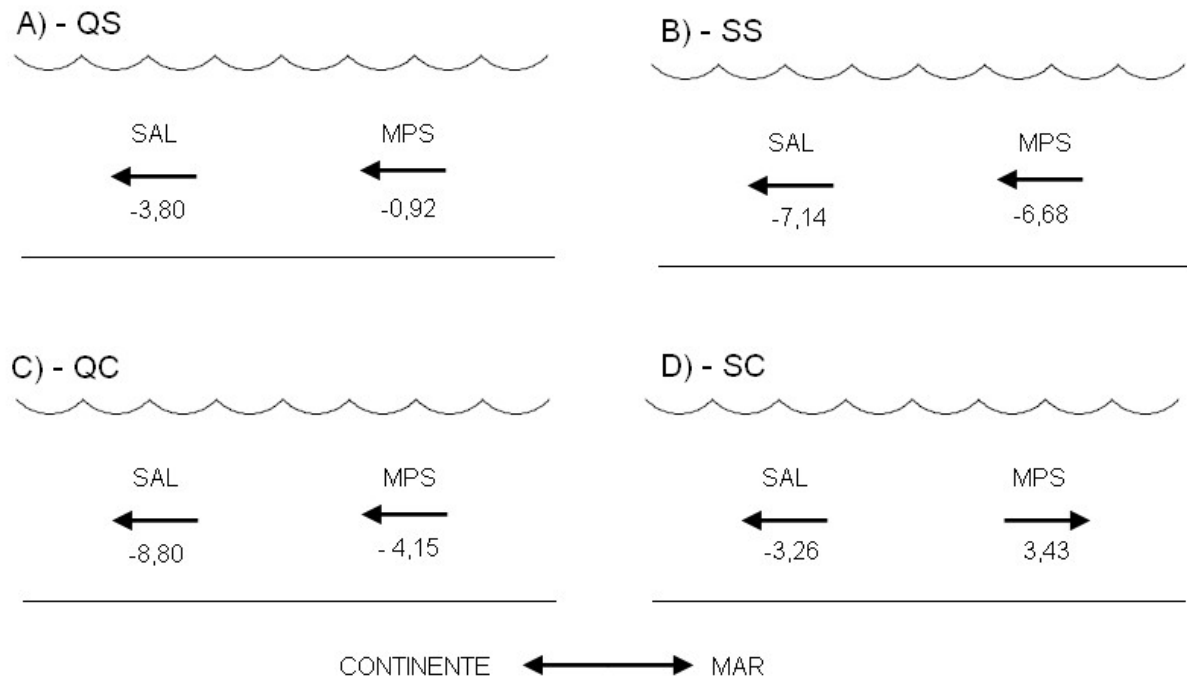
**Tabela 3.4:** Fluxos residuais de sal (Kg/m.s), MPS (g/m.s) para os pontos T1 e T2 e água para a seção transversal. Valores positivos indicam fluxos em direção ao oceano (representados pela cor azul).

CICLO	SAL		MPS		ÁGUA (vazão)
	T1	T2	T1	T2	
QS (15/09/10)	-2,16	-5,45	-0,03	-1,81	18,39
QC (29/11/10)	-6,62	-10,97	-3,00	-5,29	-106,10
SS (22/09/10)	0,83	-15,10	-14,30	0,94	235,32
SC (03/12/10)	3,78	-10,29	6,50	0,35	88,46

O comportamento do fluxo de MPS nos ciclos de sizígia não seguiu um padrão como o de sal. No período seco, ao contrário do sal, houve uma importação em T1 e exportação em T2, porém também com o residual direcionados para dentro do estuário. Já no período chuvoso houve somente exportação (Tabela 3.2 e Figura 3.7). Medeiros e Kjerfve (2005) encontraram uma tendência à importação de sal e MPS, com exceção dos ciclos de Sizígia em períodos com maior vazão fluvial para o estuário de Itamaracá. De acordo com os autores, a origem da importação dessas propriedades é o bombeamento da maré (*tidal pumping*). Esse processo ocorre devido à assimetria da maré, a qual faz com que o fluxo de MPS seja maior na maré enchente que na vazante. Com o aumento da assimetria da maré à montante a influência do rio torna-se mais importante na amplificação das velocidades da maré vazante, dessa forma, o MPS é bombeado da desembocadura para o interior do estuário. Este processo dá origem à zona de turbidez máxima (ZTM) em um local próximo à zona de intrusão salina (DYER, 1995).

O fato é que o bombeamento da maré é mais efetivo em momentos de baixa vazão fluvial causando um movimento estuário acima, mesmo que o residual da água seja em direção ao mar (CAPO et al, 2009). Quando eventos de cheia são mais significantes, o residual do transporte de MPS é em direção a desembocadura. Diversos autores encontraram que o bombeamento da maré é o processo predominante para a importação de sedimentos (CAPO et al, 2009; MEDEIROS;

KJERFVE, 2005; GAREL et al, 2009; GONI; VOULGARIS; KIM, 2009; FONSECA, 2009). Esse processo explica o fluxo residual de sal em todos os ciclos e o fluxo residual de MPS, com exceção do ciclo de sizígia chuvoso que foi em direção ao mar (Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Fluxos residuais na seção transversal de MPS (g/m.s) e Sal (Kg/m.s) para os ciclos a) quadratura seco; b) sizígia seco; c) quadratura chuvoso; d) sizígia chuvoso.

Outro fator que favorece a importação de material é a presença dos manguezais à montante do estuário. Estudos de fluxos de material em suspensão realizados em outras áreas mostram que os manguezais bem vegetados normalmente aprisionam sedimentos durante a enchente, não havendo uma exportação significativa durante a vazante (WOLANSKI; RIDD, 1986; KITHEKA; ONGWENYI; MAVUTI, 2003).

Uma possível explicação para a ocorrência da exportação de MPS na maré de sizígia do período chuvoso deve-se ao aumento da advecção fluvial (DYER, 1995), proporcionando um movimento residual desse material em direção ao mar, concordando com a assimetria da maré neste ciclo, onde o tempo de enchente foi quase o mesmo do tempo de vazante (Tabela 3.2), porém as velocidades na vazante foram muito superiores às de enchente. No caso da quadratura para este mesmo período, o tempo de enchente foi muito superior, fazendo com que mais

material entrasse do que saísse. De acordo com Mantovanelli *et al.* (2004) quanto mais assimétrica é a maré, mais ela irá contribuir para o transporte em um estuário. Neste caso, sendo a maré quase simétrica ( $Al_{DV}=0,04$ ), a descarga fluvial pode ter uma atuação maior, transportando o MPS estuário abaixo.

De certa forma, estabelecer relações claras entre o fluxo e o balanço geral de sedimentos é uma tarefa extremamente difícil devido aos erros existentes nas medidas dos fluxos. Porém a maioria dos estudos mostra importação de MPS nos estuário misturados e parcialmente misturados (DYER, 1997).

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A desembocadura do estuário da baía de Vitória tendeu a apresentar baixas concentrações de MPS, com maiores valores ocorrendo no período seco. Grande parte desse material em suspensão é orgânico, chegando a 100% em alguns momentos de maior vazão fluvial, com as menores porcentagens em torno de 40%. Além disso, as maiores concentrações de MPS e MO ocorreram em torno da baixamar.

Verificou-se uma assimetria da maré positiva (em direção ao mar) para os ciclos estudados, exceto no período de sizígia da estação seca. Porém esta assimetria não refletiu nos fluxos de MPS, o qual se apresentou de modo não-conservativo, estando submetidos aos processos de dinâmica sedimentar existentes em estuários, os quais dão origem à defasagem do material em suspensão em relação ao fluxo.

Porém observou-se estreita relação entre a vazão momentânea e os fluxos de MPS e sal. Sendo assim, houve uma importação de sal em todos os ciclos e importação de MPS para 3 ciclos, indicando o bombeamento da maré como processo dominante nos fluxos de propriedades seção estudada.



## **CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A desembocadura da baía de Vitória foi classificada a partir do diagrama de estratificação e circulação como bem misturada nos momentos de sizígia, onde a estratificação foi praticamente ausente. O processo predominante é a difusão turbulenta, o qual foi o responsável pela disponibilização do MPS em toda a coluna d'água. Isso foi verificado principalmente no período seco, onde ocorreram as maiores concentrações de MPS.

No período da quadratura, por outro lado, o estuário foi classificado como parcialmente misturado, embora a difusão turbulenta ainda seja o processo dominante nestes ciclos, houve uma tendência de estratificação propiciada pelo aparecimento da circulação gravitacional, que pode ser vista principalmente no período chuvoso, com essa estratificação relacionada ao aumento da vazão fluvial. Além disso, o menor alcance da maré no manguezal pode ter influenciado as menores concentrações de MPS na coluna d'água para o mesmo período sazonal.

De um modo geral, a dinâmica de MPS na desembocadura da Baía de Vitória não segue de forma restrita a hidrodinâmica do estuário. Esta dinâmica estaria muito mais ligada aos processos relacionados à defasagem pela velocidade crítica para o movimento, fazendo com que o MPS não apresente um comportamento conservativo. O mesmo pode ser dito para o transporte do sal.

Dessa forma, embora a assimetria residual encontrada para o estuário seja predominantemente positiva, ou seja, em direção à desembocadura, na maioria dos ciclos para o MPS e em todos os ciclos para o sal houve uma importação.

Devido à baixa vazão fluvial do sistema mesmo no período chuvoso (aproximadamente  $50\text{m}^3/\text{s}$ ), o fluxo do rio tem pouca competência para trazer o material da bacia, porém, acrescenta água no sistema, dessa forma diminuindo a concentração do material em suspensão, o que explica as menores concentrações de MPS no período chuvoso. Porém, maiores concentrações de matéria orgânica no MPS são percebidas neste período, mostrando uma relação indireta entre a concentração do MPS e o teor orgânico. Além disso, esse pequeno aporte de água

doce também propicia uma maior atuação da maré tanto para o transporte quanto para os processos de mistura, fato comprovado pela variação da salinidade e temperatura que apresentaram forte correlação com a maré. Com relação ao transporte de MPS, a maré foi considerada o mecanismo principal através do processo do bombeamento levando o material para dentro do estuário, mesmo nos momentos de quadratura quando a circulação gravitacional esteve presente.

Além da maré e vazão fluvial, outra variável que geralmente influencia os estuários é o vento. Porém, para os ciclos estudados, este não teve forte correlação com a circulação, tendo um efeito secundário no ciclo de quadratura para o período seco, uma vez que nem a maré nem a vazão fluvial foram muito atuantes.

Em suma, a desembocadura do estuário da baía de Vitória apresenta-se como misturado a parcialmente misturado, dominado pela maré, com assimetria de vazante nos períodos de sizígia e de enchente na quadratura, atuando como importador de MPS e sal.

Cabe ressaltar que este foi o primeiro estudo com medições *in situ* de balanço de MPS e sal no estuário e que seguem abaixo sugestões para trabalhos futuros:

- Medições com séries temporais mais longas podem mostrar melhor o padrão do balanço do material em suspensão já que seria possível fazer um acompanhamento de fato do fluxo, bem como uma análise das correntes de maré e suas variações dentro de um ciclo lunar (sizígia/quadratura);
- Uma investigação mais ampla, abordando todo o estuário com coletas em diferentes pontos para se ter ideia do quanto fica retido na parte superior do estuário, bem como uma avaliação do desenvolvimento e deslocamento de uma possível zona de turbidez máxima, já que é possível que boa parte do material que entra no estuário fique retida nesta região;
- Estudos qualitativos da matéria orgânica, o que poderia elucidar a origem desse material, de forma a elaborar a melhor gestão para a entrada desse aporte dentro do estuário, já que os valores orgânicos são extremamente altos neste ambiente, podendo ter uma origem de efluentes domésticos.
- Outra opção seria a investigação da granulometria contida neste MPS, pois através da mesma, poderia ser possível uma calibração de equipamentos acústicos e óticos,

podendo dessa forma auxiliar na calibração, e então diminuindo o esforço amostral, aumentando a quantidade dos resultados.

Como a área de estudo tem utilização diversa, diferentes tipos de estudos devem ser feitos para um conhecimento do ambiente, uma vez que inúmeras são as variáveis que influenciam o mesmo.

## CAPÍTULO 5 – REFERÊNCIAS

ALVAREZ, L. G.; JONES, S. E. (2004). Short-term observations of suspended particulate matter in a macrotidal inverse estuary: The Upper Gulf of California. **Journal of coastal research**, 20(3):645-654.

BARROS, G. C. (2002). Identificação dos processos físicos na hidrodinâmica das águas do entorno da ilha de Vitória – ES. **Dissertação de mestrado**. Programa de pós-graduação em engenharia ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.

BERNADES, M. E. C.; MIRANDA, L. B. (2001). Circulação estacionária e estratificação de sal em canais estuarinos: simulação com modelos analíticos. **Rev. Bras. Oceanogr.**, 49(1/2):115-132.

BLANTON, J. O.; ANDRADE, F. A. (2001). Distortion of tidal currents and lateral transfer of salt in a shallow coastal plain estuary (O estuário do Mira, Portugal). **Estuaries**, 24(3):467-480.

CAPO, S.; BRENON, I.; SOTTOLICHIO, A. CASTAING, P.; LE GOUVEN, P. (2009). Tidal sediment transport versus freshwater flood events in the Konkouré estuary, Republic of Guinea. **Journal of African Earth Sciences**, 55:52-57.

CARTER, R. W. G. **Coastal environments**: An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. London: Academic press., 2002.

CHACALTANA, J. A.; MARQUES, A. C.; RIGO, D. (2003) Modelagem computacional da Baía de Vitória (ES) considerando a área do manguezal. **22º Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental**. Joinville, Santa Catarina: 2003.

CHACALTANA, J. T. A.; MARQUES, A. C.; RIGO, D.; PACHECO, C. G. (2003) Influência do manguezal no padrão de escoamento do sistema estuarino da Ilha de Vitória – ES. Semana Estadual de Meio Ambiente (SESMA), 5: Vitória, 2003. **Anais...** Vitória, 2003.

DALMASCHIO, R. G. **Análise da vazão e descarga sólida na região de transição entre o estuário e o rio Santa Maria da Vitória – ES, Brasil**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Programa de Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

DYER, K.R., 1982. Localized mixing of low salinity patches in a partially mixed estuary (Southampton Water, England). In: **Estuarine Comparisons**, Academic Press, Inc, pp. 21-36.

DYER, K. R. Sediment transport processes in estuaries. Cap. 14 In: PERILLO, G. M. E. (ed.). **Geomorphology and sedimentology of estuaries**: Developments in sedimentology 53. Amsterdam: Elsevier science, 1995.

DYER, K. R. **Estuaries: a physical introduction**. 2. ed. - Chichester: John Wiley & Sons, 1997.

- FONSECA, L. V. (2009). Capacidade de retenção de fósforo e material particulado em suspensão por manguezal de área impactada por efluentes da carcinicultura. **Dissertação de Mestrado** – Programa de pós-graduação em ciências marinhas tropicais do Instituto Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará.
- FURUKAWA, K.; WOLANSKI, E. (1996). Sedimentation in mangrove forests. **Mangroves and Salt Marshes**, 1(1):3-10.
- FURUKAWA, K.; WOLANSKI, E.; MUELLER, H. (1997). Currents and sediment transport in mangrove forest. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 44:301-310.
- GAREL, E.; PINTO, L.; SANTOS, A.; RERREIRA, Ó. (2009). Tidal and river discharge forcing upon water and sediment circulation at a rock-bound estuary (Guadiana estuary, Portugal). **Estuarine and Shelf Science**, 84:269-281.
- GAZE, F. N. **Tempo de Residência na Baía do Espírito Santo**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.
- GENZ, F. (2006). Avaliação dos efeitos da barragem pedra do cavalo sobre a circulação estuarina do rio Paraguaçu e Baía de Iguape. **Tese de doutorado**. Programa de pós-graduação em geologia da Universidade Federal da Bahia.
- GEYER, W. R. (1997). Influence of winds on dynamics and flushing of shallow estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 44:713-722.
- GONI, M. A.; VOULGARIS, G.; KIM, Y. H. (2009) Composition and fluxes of particulate organic matter in a temperate esuary (Winyah Bay, South Carolina, USA) under contrasting physical forcings. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 85:273:291.
- HANSEN, D. V.; RATTRAY, M. (1966). New dimensions in estuarine classification. **Limnol. Oceanog.**,11:319-326.
- HARLEMAN, D. R. F.; IPPEN, A. T. (1966). The turbulent diffusion and convection of saline water in an idealized estuary. **IASH Commitee Surface Water**, 51:362-378.
- IPPEN, A. T.; HARLEMAN, D. R. F. (1961). One dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries. **Comitee on tidal hydraulics waterway experiment station**, Corps of engineers US Army, Vicksburg, Mississipi. Technical Bulletin, Nº 5, 120p.
- KIM, Y. H.; VOUGARIS, G. (2008). Lateral circulation and suspended sediment transport in a curved estuarine channel: Winyah Bay, SC, USA. **Journal of geophysical research**, 133:1-15.
- KITHEKA, J. U.; ONGWENYI, G.S.; MAVUTI, K. M. (2003). Fluxes and exchange of suspended sediment in tidal inlets draining a degraded mangrove forest in Kenya. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 56:655-667.
- KITHEKA, J. U.; OBIERO, M. NTHENGE, P. (2005). River discharge, sediment transport and exchange in the Tana Estuary, Kenya. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 63:455-468.

- KJERFVE, B. (1986). Circulation and salt flux in a well-mixed estuary. In.: **Physics of shallow estuaries and bays**. KREEKE, J. V. de (ed.). Spring-Verlag: Berlin, 280pp.
- LI, C.; O'DONNELL, J. (1997). Tidally driven residual circulation in shallow estuaries with lateral depth variations. **Journal of Geophysical Research** 102:27915-27929.
- LI, C.; VALLE-LEVINSON, A; WONG, K. C.; LWIZA, K. M. (1998). Separating baroclinic flow from tidally induced flow in estuaries. **Journal of Geophysical Research**, 103:10405–10417.
- LIMA, G.M.P. (2007). Caracterização sedimentológica e dos padrões de circulação e mistura do estuário do Rio Jacuípe – Litoral do estado da Bahia. **Dissertação de mestrado** – Programa de pós-graduação em geologia da Universidade Federal da Bahia.
- LINCOLN, J. M.; FITZGERALD, D. M.; (1988). Tidal distortions and flood dominance at five small tidal inlets in southern Maine. **Marine Geology** 82:133-148.
- MANTOVANELLI, A; MARONE, E.; da SILVA, E. T.; LAUTERT, L. F.; KLINGENFUSS, M.S.; PRATA Jr., V. P.; NOERNBERG, M. A.; KNOPPERS, B. A.; ÂNGULO, R.J., (2004). Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 59:523-537.
- MEDEIROS, C.; KJERFVE, B. (2005). Longitudinal salt and sediment fluxes in a tropical estuary: Itamaracá, Brazil. **Journal of coastal research**, 21(4):751-758.
- MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B. SOUZA, W. F. L.; OLIVEIRA, E. N. (2011). Aporte de material em suspensão no baixo Rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, 15(1):42-53.
- MIRANDA, L. B. de; CASTRO, B. M.; (1996). On the salt transport in the Cananéia Sea during a spring tide experiment. **Revista brasileira de oceanografia**, 44(2):12-33.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002.
- MIRANDA, L. B.; MESQUITA, A. R.; FRANÇA, C. A. S. (1995). Estudos da circulação e dos processos de mistura no extremos sul do mar de Cananéia: condições de dezembro de 1991. **Boletim do Instituto de Oceanografia**, 43(2):153-164.
- MOURA, M. G.; QUARESMA, V. S.; BASTOS, A. C.; VERONEZ Jr., P. (2011). Field observations of SPM using ADV, ADP and OBS in a shallow estuarine system with low SPM concentration: Bay, SE Brazil. **Ocean Dynamics**, 61:273-283.
- NEVES, R. C.; BASTOS, A. C. **Processos hidrodinâmicos e de ressuspensão na Baía de Vitória e na Baía do Espírito Santo**. Programa Institucional de Iniciação Científica Jornada de Iniciação Científica: 2009/2010, Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Espírito Santo: 2010.

- NEVES, R. ; QUARESMA, V. S.; BASTOS, A. C.; RUANO, J. (No prelo). Transporte sedimentar em baías costeiras: estudo de caso nas Baías de Vitória e Espírito Santo-ES-Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**.
- NICHOLS, M. M.; BIGGS, R. B. Estuaries. Cap. 2. In: DAVIES Jr., R. A. **Coastal Sedimentary Environments**. 2 ed. New York: Springer-Verlag, 1985.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.
- PEREIRA, M. D.; SIEGLE, E.; MIRANDA, L. B. de; SCHETTINI, C. A. F. (2010). Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: estuário de Caravelas (BA). **Revista Brasileira de Geofísica**, 28(3):427-444.
- REIS Jr., C. N.; SILVEIRA, A. B.; SANTOS, J. M.; CHACALTANA, J. T. A. (2002). Reconstrução do campo de ventos tridimensional sobre Regiões de topografia. **IX Congresso brasileiro de engenharias e ciências térmicas**. Paper CIT02-0537.
- RESTREPO, J. D.; KJERFVE, B. (2000). Water and sediment discharges from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Rio San Juan. **Journal of Geology**. 108(1):17-33).
- RIGO, D. (2004). Análise do escoamento em regiões estuarinas com manguezais – medições e modelagem na Baía de Vitória, ES. **Tese de doutorado** – Programa de pós-graduação de engenharia oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- RIGO, D.; CHACALTANA, J. T. A. (2006). Computacional modelling of mangrove effects on the hydrodynamics of Vitoria Bay, Espírito Santo – Brazil. **Journal of coastal research**, Special Issue 39:1543 – 1545.
- SANTIAGO, D. I. (2007). Aplicação de um modelo lagrangeano de trajetória de partículas para a modelagem da dispersão no canal de acesso ao Porto de Vitória. **Dissertação de mestrado** – Programa de pós-graduação em engenharia ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.
- SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J.L.B. (1999). Caracterização hidrodinâmica do estuário do rio Cubatão, Joinville. **Notas tec. Facimar**, 3:87-97.
- SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, J. B. L.; TRUCOLLO E. C. (1999). Aspectos hidrodinâmicos da Enseada da Armação de Itapocoroy, SC. **Notas tec. Facimar** 3:99-109.
- SCHETTINI, C. A. F.; MIRANDA, L. B. (2010). Circulation and suspended particulate matter transport in a tidally dominated estuary: Caravelas estuary, Bahia, Brazil. **Brazilian journal of oceanography**, 58(1):1-11.
- SIEGLE, E.; SCHETTINI, C. A. F.; KLEIN, A. H. F.; TOLDO Jr., E. E. (2009). Hydrodynamics and suspended sediment transport in the Camboriú estuary – Brazil: pre jetty conditions. **Brazilian journal oceanography**, 57(2):123-135.

SCULLY, M. E.; FRIEDRICH, C.; BRUBAKES, J. (2005). Control of estuarine stratification and mixing by wind-induced straining of the estuarine density field. **Estuaries**, 28(3):321-326.

SONTEK, (2009). **RiverSurveyor S5/M9: Manual do Sistema**. SonTek/YSI9940 Summers Ridge Road San Diego, CA 92121.

PRITCHARD, D. W. 1952. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake estuarine system. **Journal of Marine Research**, 11:106–123.

UNCLES, R.J., (2002). Estuarine physical processes research: some recent studies and progress. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 55:829-856.

VALLE-LEVINSON, A.; TRASVIÑA, G. G. V. A.; DURAZO, A. J. S.; MEHTA, A. J. (2009). Residual Exchange flows in subtropical estuaries. **Estuaries and coasts**, v.32, p.54-67.

VERONEZ JÚNIOR, P.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S. (2009). Morfologia e distribuição sedimentar em um sistema estuarino tropical: Baía de Vitória, ES. **Revista Brasileira de Geofísica**, 27:1-16.

WELLS, J. T. Tide-dominated estuaries and tidal rivers. Cap. 6. In: PERILLO, G. M. E. (ed.). **Geomorphology and sedimentology of estuaries**: Developments in sedimentology 53. Amsterdam: Elsevier science, 1995.

WOLANSKI, E.; RIDD, P. (1986). Tidal mixing and trapping in mangrove swamps. **Estuarine, coastal and shelf science**, 23:759-771.

WONG, K. C. (1994). On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary. **Journal of Geophysical Research**, 99:14209–14222.

ZEM, R. C. (2008). Hidrodinâmica e fluxo de material particulado em suspensão na Região estuarina da Baía de Paranaguá – PR. **Dissertação de mestrado**, programa de pós-graduação em geologia e geofísica marinha da Universidade Federal Fluminense.