



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
MESTRADO EM METEOROLOGIA

Rodolfo Marcelo Gonçalves Souza

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E ESTIMATIVA DO TRANSPORTE DE  
SAL NO ESTUÁRIO DO RIO SÃO FRANCISCO - ALAGOAS

Maceió/AL  
2015

Rodolfo Marcelo Gonçalves Souza

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E ESTIMATIVA DO TRANSPORTE DE  
SAL NO ESTUÁRIO DO RIO SÃO FRANCISCO - ALAGOAS

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Alagoas, como exigência parcial para a obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo

Maceió/AL  
2015

Universidade Federal de Alagoas  
Biblioteca Central  
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário:

G635c Souza, Rodolfo Marcelo Gonçalves

Caracterização hidrodinâmica e estimativa do transporte de sal no estuário do Rio São Francisco – Alagoas / Rodolfo Marcelo Gonçalves Souza, 2015.  
58 fl.

Orientador: Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo  
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Alagoas – Instituto de Ciências Atmosféricas de Alagoas, Maceió, 2015.

1. Transporte de sal. 2. Estuário. 3. Rio São Francisco.

CDD 627.124  
CDU

Rodolfo Marcelo Gonçalves Souza

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E ESTIMATIVA DO TRANSPORTE DE SAL  
NO ESTUÁRIO DO RIO SÃO FRANCISCO – ALAGOAS

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Alagoas, como exigência parcial para a obtenção do grau de Mestre em Meteorologia, sob a orientação do Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo.

Data de aprovação:

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo  
Universidade Federal de Alagoas

---

Paulo Ricardo Petter Medeiros  
Universidade Federal de Alagoas

---

Carlos Augusto França Schettini  
Universidade Federal de Pernambuco

*A minha esposa Luana, meu filho Mateus, meus familiares e amigos que conquistei.*

## AGRADECIMENTOS

Para iniciar, agradeço a Deus por tantas dádivas derramadas em minha vida e na da minha família.

Ao meu professor e orientador, hoje, meu grande amigo, Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo, pela paciência e incentivo imensurável e por haver criado condições para a viabilização deste trabalho, despertando ainda mais o interesse acerca de estuários e toda a Oceanografia Física;

À minha amada esposa, Luana Souza, amiga, confidente, e incentivadora de todos os meus sonhos, além de ter me presenteado, no período da construção desta obra, com Mateus, meu filho.

Aos meus pais e ao meu irmão por todo o amor, incentivo e incansável estímulo para crescer sempre.

Aos meus grandes amigos, os quais hoje chamo de irmãos, Mauro Bernasconi e Marshall Victor, pelas noites de estudo, por todo o ensinamento e paciência e em nome de todos os amigos que aqui conquistei.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores, funcionários e colegas do Instituto de Ciências Atmosféricas da UFAL, que contribuíram no meu aprendizado.

*Quando disserem que não pode ou que não tem capacidade, duvide dos outros e acredite em você!  
Pois Deus é maior e o fará capaz de conquistar qualquer coisa que tu almejas”.*

*Rodrigo Paixão*

## RESUMO

O Rio São Francisco é extremamente importante em níveis nacionais e regionais devido a seus recursos hídricos para fins múltiplos. O estuário do São Francisco tem um papel importante em ambos os aspectos ecológicos e socioeconômicos em escala local. O estuário está localizado na divisa dos estados de Sergipe e Alagoas, na seção Baixo São Francisco, entre as coordenadas 10°25 'S e 36°23' W. Este estudo tem como objetivo caracterizar a circulação e transporte de sal e intrusão salina no estuário do rio São Francisco. A análise de propriedades termohalinas e correntes amostradas em uma estação de ancoragem no canal principal do estuário foi feita comparando dois ciclos consecutivos de maré de quadratura e maré de sizígia. A ADCP foi montada e utilizada para medir os perfis de correntes verticais e aumentada com profundidade de condutividade de temperatura (CTD), lançada a partir da superfície para baixo, a cada 30 minutos e as condições de vento foram medidas por uma estação meteorológica. As estações ao longo do canal também foram ocupadas durante a maré de quadratura e alta da maré morta para estimar o montante de incursão da cunha salina ao longo do canal do rio. A cunha salina penetrou mais durante a maré de quadratura chegando a 8,0 km, em comparação com ~6,8 km maré de sizígia. Essa baixa excursão de água salina foi associada com alta corrente de maré gerada por ventos do sudeste, o que reduziu a força da água do rio à jusante empurrando a água salgada para os alcances superiores do estuário. Esses resultados associados à alta coluna de estabilidade vertical de água ( $Ri_L > 20$ ) revelaram que o mecanismo de condução para a circulação da mistura no estuário foi equilibrada, principalmente pela descarga de água doce e a maré forçante, associadas à circulação gravitacional. O aumento das correntes residuais do estuário durante as condições de maré de quadratura foi resultado de fortes ventos e indica a tendência de transporte de sal para um equilíbrio na maré de quadratura.

Palavras-chave: Rio São Francisco. Salinidade. Temperatura. Cunha Salina. Transportes e Sal. Estuário.

## ABSTRACT

The São Francisco River is extremely important at national and regional levels due to its multi-purpose water resources. The São Francisco estuary plays an important role on both ecological and socio-economic aspects at local scale. The estuary is located at the border of the states of Sergipe and Alagoas, in the Lower São Francisco section, between the coordinates 10°25' S and 36°23' W. This study aims to characterize the circulation and salt transport, and saline intrusion during in the São Francisco river estuary. Analysis of thermohaline properties and currents sampled at an anchor station in the estuary main channel was made in terms of two consecutive spring-neap tidal cycles in the summer season. A side mounted ADCP was utilized to measure vertical current profiles and was augmented with conductivity-temperature-depth (CTD) casts from surface to bottom every 30 min, and wind conditions were measured by a weather station. Along-channel stations were also occupied during spring and neap high slack water to estimate the upstream saline water incursion along the river channel. Saline waters penetrated further upstream during the neap high slack water reaching ~ 8.0 km, compared to ~ 6.8 km in the spring high slack water. Such low excursion in salinity water was associated with high tidal current generated by southeast winds, which reduced the downstream river water strength pushing the salt water toward the estuary upper reaches. These results, associated with the high water column vertical stability ( $Ri_L > 20$ ) revealed that the driving mechanism for the estuary circulation and mixing was mainly balanced by the fresh water discharge and the tidal forcing associated with the gravitational circulation. The increase in the up-estuary residual currents during the neap tide conditions was result of strong winds, and indicates the tendency of salt transport towards a balance in the neap tide.

**Keywords:** San Francisco River. Salinity. Temperature. Cunha Salina. Transport and Sal. Estuary.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seção longitudinal de um sistema estuarino indicando: as zonas de Maré do Rio (ZR), de Mistura (ZM) e a Costeira (ZC) (MIRANDA, 2002). .....	18
Figura 2: Diagrama esquemático de um estuário tipo cunha salina (MIRANDA, 2002). .....	20
Figura 3: Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação num estuário tipo parcialmente misturado (de acordo com Pritchard, 1989). .....	20
Figura 4: Distribuição da salinidade e da circulação num estuário verticalmente homogêneo, mas com ligeira estratificação lateral. ....	21
Figura 5: Subdivisões da bacia do Rio São Francisco.....	24
Figura 6: ANA/GEF/PNUMA/OEA .....	25
Figura 7: Mapa da área de estudo, foz do rio São Francisco.....	25
Figura 8: Sonda Multiparamétrica YSI 6600 .....	28
Figura 9: Guincho manual utilizado para descer a sonda multiparamétrica. ....	28
Figura 10: Display YSI acoplado a sonda multiparamétrica. ....	29
Figura 11: Visualização dos dados da sonda multiparamétrica para controle de qualidade durante o processo de amostragem.....	29
Figura 12: ADCP sincronizado com notebook para avaliação das amostras. ....	30
Figura 13: Visualização dos dados do ADCP para controle de qualidade durante o processo de amostragem. ....	30
Figura 14: Mesa de trabalho utilizada para programação dos instrumentos. ....	31
Figura 15: Estação meteorológica fixada na haste da embarcação. ....	31
Figura 16: Os dados de vento eram coletados e armazenados simultaneamente. ....	32
Figura 17: Localização das Estações de coleta .....	33
Figura 18: Variação das vazões durante o período das campanhas. ....	38
Figura 19: Variação da maré nos dias 18 e 19/02/2014. ....	39
Figura 20: Velocidade e direção do vento durante as campanhas de sizígia nos dias 18 e 19/02/14... ..	39
Figura 21: Distribuição vertical das salinidades em circunstância de maré de sizígia na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 18/02/2014 as 06:30h até as 07:30h do dia 19/02/2014. ....	40

Figura 22: Distribuição vertical das salinidades em circunstância de maré de sizígia na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 18/02/2014 as 6:30 até as 07:30 do dia 19/02/2014. ....	41
Figura 23: Variação temporal da salinidade.....	41
Figura 24: Perfil médio temporal da salinidade .....	42
Figura 25: Nível da superfície livre e salinidade média na coluna de água .....	43
Figura 26: Distribuição longitudinal da salinidade de todos os perfis no estofo de maré sizígia do dia 18-19/02/2014. ....	44
Figura 27: Distribuição longitudinal da temperatura de todos os perfis no estofo de maré sizígia do dia 18-19/02/2014. ....	44
Figura 28: Perfil médio temporal do componente longitudinal da velocidade.....	45
Figura 29: Variação temporal dos perfis de velocidade. ....	46
Figura 30: Perfil médio temporal do componente longitudinal da velocidade.....	46
Figura 31: Nível de superfície livre e velocidade média na coluna de água. ....	47
Figura 32: Variação da maré nos dias 25 e 26/02/2014. (Gerado a partir da Maré prevista para o porto de Maceió, DHN da Marinha do Brasil). ....	48
Figura 33: Velocidade e direção do vento durante as campanhas de maré de quadratura nos dias 25 e 26/02/2014.....	48
Figura 34: Distribuição vertical das salinidades em circunstância de maré de quadratura na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 25/02/2014 as 15:30h até as 16:30h do dia 26/02/201 ..... 49	49
Figura 35: Distribuição vertical das temperaturas em circunstância de maré de quadratura na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 25/02/2014 as 15:30h até as 16:30h do dia 26/02/20 ..... 50	50
Figura 36: Distribuição longitudinal da salinidade de todos os perfis no estofo de maré quadratura do dia 25-26/02/2014. ....	51
Figura 37: Distribuição longitudinal da temperatura de todos os perfis no estofo de maré quadratura do dia 25-26/02/2014. ....	51
Figura 38: Variação temporal de salinidade (Quadratura) .....	52
Figura 39: Perfil Médio Temporal da Salinidade.....	52
Figura 40: Nível da superfície livre e salinidade média na coluna de água. ....	53
Figura 41: Variação temporal dos perfis da velocidade .....	54
Figura 42: Variação temporal dos perfis da velocidade .....	54
Figura 43: Perfil médio temporal do componente longitudinal da velocidade .....	55
Figura 44: Nível da superfície livre e velocidade média na coluna de água .....	56

Figura 45: Figura 39: Diagrama Estratificação – Circulação (Sizígia).....	57
Figura 46: Diagrama Estratificação – Circulação (Quadratura).....	57
Figura 47: Número de Richardson por camada, (Ri)L (Sizígia). ....	58
Figura 48: Número de Richardson por Camada, (Ri)L (Quadratura). ....	59
Figura 49: Valores dos componentes do transporte do sal (Sizígia). ....	60
Figura 50: Valores dos componentes do transporte de sal (Quadratura).....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de Maré para o Porto de Maceió/AL.....	32
Tabela 2: Coordenadas geográficas das estações de coleta.....	34
Tabela 3: Principais usinas hidroelétricas, localização e volume de armazenamento das barragens no Rio São Francisco. ....	37

# Sumário

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1 ESTUÁRIO</b> .....	18
1.1 – CLASSIFICAÇÃO DE ESTUÁRIO DE ACORDO COM A ESTRATIFICAÇÃO DE SALINIDADE.....	19
<b>1.1.1 – Cunha Salina</b> .....	19
<b>1.1.2 – Moderadamente ou Parcialmente Misturado</b> .....	20
<b>1.1.3 – Verticalmente Bem Misturado</b> .....	21
1.2 – FORMA DE PERFIS VERTICAIS .....	22
1.3 – TEMPERATURA DA ÁGUA.....	22
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	24
2.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	24
2.2 – REGIME DE MARÉ.....	26
2.3 - EQUIPAMENTOS E ATIVIDADES EXECUTADAS .....	27
<b>2.3.1- Medição da variação temporal do perfil salino e da temperatura</b> .....	32
<b>2.3.2 - Medição da distribuição longitudinal da salinidade e temperatura</b> .....	33
<b>2.3.3- Medição da variação temporal da velocidade da corrente</b> .....	34
2.4- METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DOS MAPAS .....	34
2.5 – TRANSPORTE DE SAL .....	35
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
3.1 – EFEITOS DAS BARRAGENS NO RIO SÃO FRANCISCO .....	37
3.2- VAZÕES DURANTE O PERÍODO ESTUDADO .....	37
3.3 - CAMPANHA DE SIZÍGIA .....	38
<b>3.3.1 - Oscilação da maré e ventos</b> .....	38
<b>3.3.2 - Parâmetros hidrográficos</b> .....	39
<b>3.3.3 - Componente longitudinal da velocidade</b> .....	44
3.4 - CAMPANHA DE QUADRATURA .....	47

<b>3.4.1 - Oscilação da maré e ventos .....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.2 - Parâmetros hidrográficos.....</b>	<b>49</b>
<b>3.4.3 - Componente longitudinal da velocidade .....</b>	<b>53</b>
<b>3.5 – MISTURA E TRANSPORTE DE SAL.....</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

## INTRODUÇÃO

A Bacia do Rio São Francisco está localizada entre as latitudes de 7° S e 21° S, e as longitudes de 35° W e 47° W. A área da Bacia representa 7,5% do território nacional, sendo 83% da área distribuída entre os estados de Minas Gerais e Bahia, 16% nos Estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe, e o restante 1% nos Estados de Goiás e Distrito Federal, segunda a Agência Nacional das Águas (ANA).

De acordo com a ANA, o rio São Francisco é o mais importante da bacia, com uma extensão de 2700km. Atravessa a longa depressão encravada no Planalto Atlântico e as chapadas do Brasil Central, segue a orientação sul-norte até aproximadamente a cidade da Barra, dirigindo-se então para nordeste, até atingir a cidade de Cabrobó, quando inflete para sudeste, desembocando no Oceano Atlântico.

Os estuários constituem-se numa importante região de transição entre ambientes terrestres e marinhos, sendo os rios, perante os estuários, a principal via de transporte dos produtos da denudação dos continentes em direção as águas costeiras (Garrels & Makenzie, 1971).

No rio São Francisco há diversas obras de engenharia relacionadas à geração de energia elétrica, ao abastecimento d'água, a navegação e à proteção contra enchentes. As obras mais frequentes são as barragens, que alteram o regime hidrológico, modificando a vazão líquida e sólida à jusante, por reterem grande parte dos sedimentos.

A região do baixo São Francisco tem sofrido significantes mudanças em sua morfologia devido à regularização de seu fluxo. Atualmente, em consequência do grande número de bancos de areia existentes ao longo do curso do rio, a navegação está difícil e somente é possível com pequenos barcos.

A regularização do rio com o controle da vazão eliminou fortes correntezas das enchentes, reduzindo assim a potencialidade cíclica do rio transportar sedimentos. A redução do transporte de sedimentos pelo rio tem gerado assoreamentos que dificultam a navegação e alteram os nichos e produzem um déficit de sedimento no delta para a deriva litorânea, o que está produzindo uma acelerada erosão em algumas praias próximas a foz do Rio São Francisco.

As modificações no padrão de descarga do rio devido a regularização da vazão pelas barragens na região à montante da sua foz, têm ocasionado alterações nas condições hidrodinâmicas reinantes no estuário do rio São Francisco. Tais mudanças refletem na circulação interna das correntes e grau de mistura através da maior presença de águas costeiras penetrando através do canal principal do rio. Além disso, alterações hidrodinâmicas das correntes fazem modificar o regime biológico causando modificação na vida marinha existente

no ecossistema do estuário do São Francisco, observado pelo aparecimento e desaparecimento de algumas espécies de peixes dentro da região estuarina.

Tendo em vista que a principal fonte de renda da população ribeirinha é a pesca, a população vem sendo diretamente afetada pela redução da produção pesqueira. Esta redução foi ocasionada pelo controle da vazão do rio, eliminando o ciclo anual de enchentes no baixo São Francisco, o que contribuiu para o isolamento das lagoas marginais, as quais, anteriormente, serviam como berçários para os peixes, que eram levados para os leitos em períodos de maré alta

Considerando as eminentes transformações a qual esta região está sofrendo, e a importância do rio na qualidade e desenvolvimento socioeconômico, o presente estudo tem como objetivo caracterizar o estuário do rio São Francisco através de sua hidrodinâmica e calcular a estimativa do transporte de sal.

## 1 ESTUÁRIO

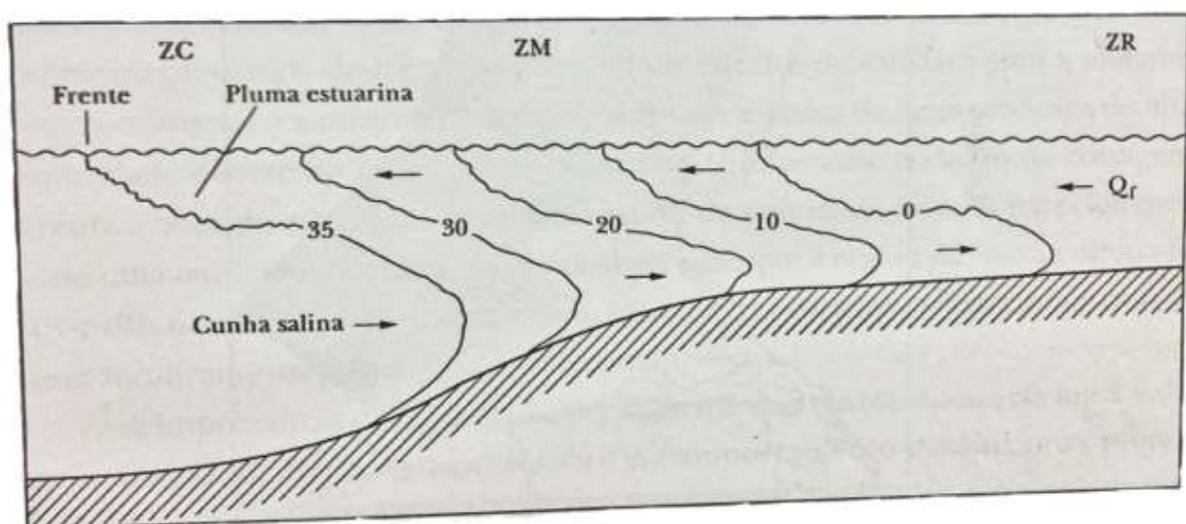
Um estuário pode ser definido de várias maneiras e de acordo com o ponto de vista imediato. Entretanto, essas definições devem abranger as características e processos essenciais, bem como o contexto no qual o estuário está inserido, permitindo a aplicação de critérios adequados à classificação.

Segundo Miranda (2002), uma das definições comumente adotada na área de Oceanografia Física é a clássica definição de Pritchard (1955) e Cameron (1963): “Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental” (PRITCHARD, 1955; CAMERON, 1963).

Para um ambiente simples, como o vale de um rio inundado pela maré (denominado também de canal estuarino), as zonas ZR, ZM e ZC estão esquematicamente mostradas na Figura 1. Na ZM há uma acentuada variação longitudinal e vertical de salinidade, pois, nessa parte do estuário, a água do mar é diluída pela descarga fluvial e a configuração de isohalinas, que tem a forma de cunha, denominada cunha salina.

Na transição entre as zonas de mistura (ZM) e a região costeira adjacente (ZC) está localizada a entrada ou boca do estuário e, a partir dessa região, na plataforma continental, observa-se a zona costeira (ZC), formada pela pluma estuarina que se delimita com a massa de água de origem oceânica por uma frente.

**Figura 1:** Seção longitudinal de um sistema estuarino indicando: as zonas de Maré do Rio (ZR), de Mistura (ZM) e a Costeira (ZC) (MIRANDA, 2002).



Fonte: MIRANDA, 2002

## 1.1 – CLASSIFICAÇÃO DE ESTUÁRIO DE ACORDO COM A ESTRATIFICAÇÃO DE SALINIDADE

Segundo Miranda (2002) esse critério de classificação leva em conta os termos dominantes da forma estacionária da equação de conservação de sal, que estabelece o balanço entre advecção e difusão.

A salinidade é um importante fator ecológico no ambiente estuarino, em razão do estresse osmótico que provoca nos organismos. Em condições naturais, o tipo e a extensão da intrusão salina em um ambiente estuarino, dependem de forçantes oceanográficas (marés, ondas e ventos), da geomorfologia do estuário e do fluxo fluvial (MIRANDA et al, 2014).

Sendo assim, de acordo com a estratificação vertical de salinidade, temos os seguintes tipos de estuários: Cunha Salina, Moderadamente ou Parcialmente Misturado, Verticalmente Bem Misturado, Lateralmente Estratificado e Bem Misturado. A transição entre os diversos tipos depende da descarga do rio, da amplitude de maré, do componente baroclínico e de características geométricas como razão largura/profundidade.

### 1.1.1 – Cunha Salina

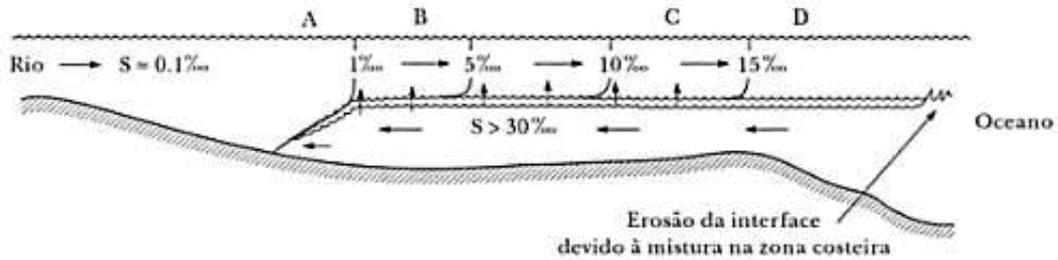
Os estuários do tipo cunha salina são típicos de regiões de micromaré e de lugares que predominam condições de grande descarga fluvial. Portanto, são estuários denominados pela descarga fluvial e pelo processo de entranhamento, que é responsável pelo aumento de salinidade da camada superficial e a mistura por difusão turbulenta é desprezível. Devido às variações da descarga fluvial de maré, a cunha salina não se mantém estacionária, movendo-se lentamente, buscando sempre uma posição de equilíbrio em resposta às variações da descarga fluvial e de maré (STOMMEL, 1953).

Com o movimento contínuo-estuário abaixo na camada superficial, que poderá ser defletido pela Força de Coriolis, o cisalhamento da velocidade na interface gera tensão interfacial de atrito que, pelo processo de entranhamento, transporta parcelas de água do mar para a parte superior.

Esse tipo de estuário é mostrado esquematicamente na Figura 2. A continuidade de massa é preservada pelo movimento de pequena intensidade da cunha salina, para substituir a parcela de água do mar, que é advectada estuário abaixo, na camada superficial. Esse processo adiciona, ao longo do estuário, volumes de água à camada de superfície, e a salinidade e o transporte de volume aumentam, em direção à boca do estuário. A profundidade de movimento nulo na

interface dos movimentos em sentidos opostos, localiza-se geralmente na haloclina e a profundidade da camada pouco salina superficial, que é controlada pelo número de Froud interfacial crítico (STOMMEL, 1953; FARMER, 1952).

**Figura 2:** Diagrama esquemático de um estuário tipo cunha salina (MIRANDA, 2002).

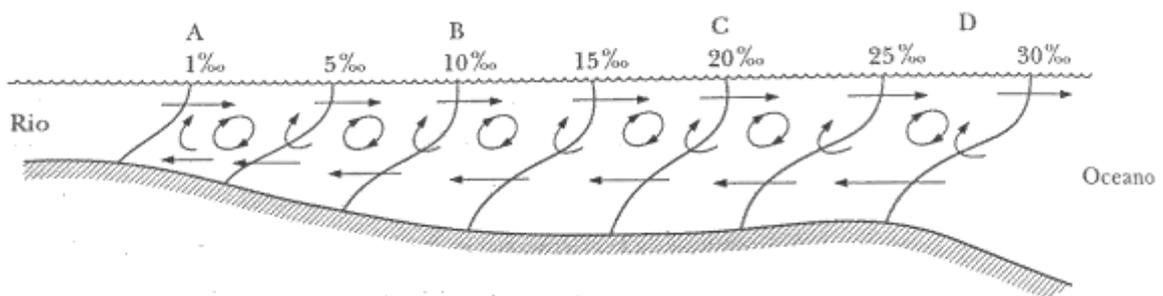


Fonte: MIRANDA, 2002.

### 1.1.2 – Moderadamente ou Parcialmente Misturado

Com a co-oscilação da maré, todo volume de água do interior do estuário é agitado periodicamente. Isso ocorre mesmo para pequena altura de maré; entretanto, somente para pequenos valores de vazão de fluxo ( $<1$ ) a agitação será suficientemente intensa para ocasionar erosão mais intensa da haloclina. Estuários com gradientes verticais moderados de salinidade são denominados parcialmente misturados (Figura 3).

**Figura 3: Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação num estuário tipo parcialmente misturado**



Fonte: PRITCHARD, 1989.

A energia da maré envolvida nesse processo deve ser suficientemente grande para realizar o trabalho, tanto contra o atrito nos limites geométricos do estuário, quanto contra a ação

estabilizadora do empuxo, produzindo turbulência interna. Os vórtices turbulentos gerados terão a sua energia dissipada, realizando trabalho contra as forças estabilizadoras de empuxo, ocasionando a erosão dos gradientes verticais de salinidade por meio da mistura entre a água doce e a água do mar (PRITCHARD, 1955).

Em consequência, a energia potencial da coluna de água aumenta, devido ao aumento da salinidade (densidade) da camada superficial. Para que a camada acima da haloclina transporte um volume de água igual ao descarregado, o rio deve aumentar consideravelmente. Simultaneamente, o transporte de água do mar do estuário acima nas camadas mais profundas, também aumenta, desenvolvendo um movimento em duas camadas e de sentidos opostos.

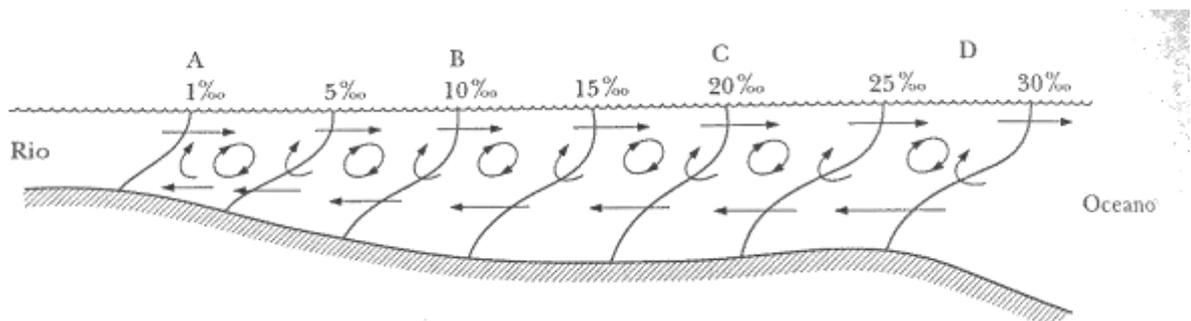
### 1.1.3 – Verticalmente Bem Misturado

Este tipo de estuário forma-se, em geral, em canais rasos e estreitos, forçados por descarga fluvial pequena. Se este sistema estiver localizado numa região com altura de maré moderada ou grande, o cisalhamento das correntes no fundo produzirá turbulência, cujo fluxo para o interior será suficientemente intenso para a completa erosão da haloclina.

Como em condições naturais, estes estuários apresentam, em geral, pequena estratificação vertical de salinidade, o fluxo vertical é desprezível e o processo de mistura ocorre, principalmente, na direção longitudinal (DYER, 1973).

Quando o estuário apresenta a razão Largura/Profundidade relativamente grande, a força de Coriolis pode gerar estratificação lateral de salinidade, caracterizando um estuário *Lateralmente Estratificado*.

**Figura 4:** Distribuição da salinidade e da circulação num estuário verticalmente homogêneo, mas com ligeira estratificação lateral.



Fonte: Miranda, 2002.

Em canais estuarinos estreitos, o cisalhamento lateral poderá ser suficientemente intenso para gerar condições homogêneas lateralmente. A salinidade pode aumentar gradativamente estuário abaixo e o movimento médio está orientado nesta direção em todas as profundidades o que caracteriza um estuário *Bem Misturado*

## 1.2 – FORMA DE PERFIS VERTICAIS

Os perfis verticais das propriedades hidrográficas e da velocidade da corrente devem ser discretizadas em um número finito de profundidades, muitas vezes, equidistantes, entre a superfície e o fundo. Essa discretização pode ser feita por métodos de interpolação gráfica ou numérica, sendo, este último, preferível para minimizar erros, quanto ao número de perfis a serem utilizados.

A superposição dos movimentos gerados pela maré, vento e descarga fluvial introduzem dificuldades no tratamento de dados experimentais, indicando a conveniência de médias no espaço e no tempo (DYER, 1997).

Para obter os valores médios dessas propriedades e a circulação resultante, é necessário reduzi-las adequadamente para:

- Facilitar a análise dos dados;
- Obter valores para classificar o estuário;
- Confirmar e aferir os resultados teóricos gerados por modelos analíticos e numéricos;
- Calcular os componentes advectivos e difusivos do transporte de sal e da concentração de propriedades.

Na determinação de perfis verticais médios de velocidade, de propriedades hidrográficas, químicas e concentração de materiais em suspensão, deve-se considerar que a profundidade local é função da posição e do tempo.

## 1.3 – TEMPERATURA DA ÁGUA

O ambiente estuarino é um ecossistema caracterizado, principalmente, pelas flutuações de dois fatores primários: a salinidade e a temperatura (WILSON, 1994). A temperatura da água nas regiões temperadas e polares é um dos fatores que mais influencia na produtividade dos

ecossistemas. Nas regiões tropicais seu efeito é menos intenso. Nessas regiões, a amplitude térmica é pequena e ocorre de forma gradativa (PASSAVANTE, FEITOSA, 2004).

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa compreende a bacia do Rio São Francisco que inclui, principalmente, a região do baixo São Francisco, onde está localizado o estuário do São Francisco, nos quais foram coletados os dados para correlação do atual comportamento hidrodinâmico e quantificação do balanço de sal.

Fundamental pelo volume de água transportada para o Semiárido, a Região Hidrográfica do São Francisco abrange 521 municípios em seis estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás, além do Distrito Federal. Com 2.700 km, o Rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais e escoar no sentido Sul-Norte pelos estados de Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para o Sudeste, chegando ao Oceano Atlântico, na divisa entre Alagoas e Sergipe. Devido à sua extensão e aos diferentes ambientes que percorre, a região está dividida em Alto, Médio, Sub-Médio e Baixo São Francisco.

A área de drenagem (638.576 Km<sup>2</sup>) ocupa 8% do território nacional e sua cobertura vegetal contempla fragmentos de Cerrado no Alto e Médio, Caatinga no Médio e Submédio e de Mata Atlântica no Alto São Francisco, principalmente nas cabeceiras. A bacia concentra a maior quantidade e diversidade de peixes de água doce da região Nordeste. A vazão natural média anual do Rio São Francisco é de 2.846 metros cúbicos por segundo, mas, ao longo do ano, pode variar entre 1.077m<sup>3</sup>/s e 5.290m<sup>3</sup>/s (ANA).

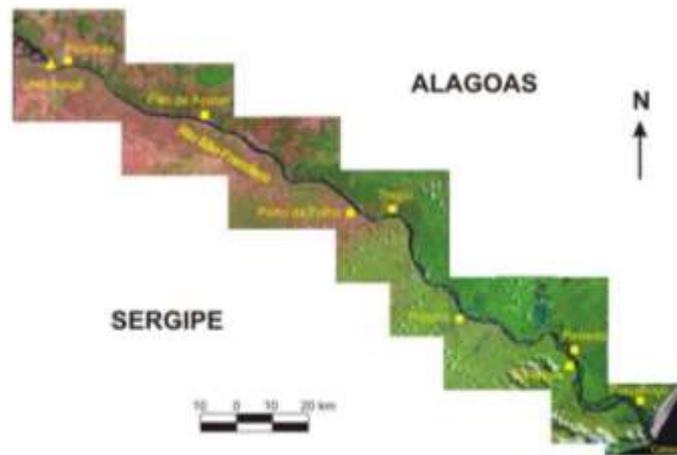
**Figura 5:** Subdivisões da bacia do Rio São Francisco



Fonte: Agencia Nacional de Água, [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br).

A região de estudo fica à jusante do município de Piaçabuçu, que dista da capital Maceió, cerca de 140 km. É uma cidade ribeirinha ao rio São Francisco, onde retira maior parte do seu Produto Interno Bruto (PIB). É sabido que cidades com estas características, retiram do rio a riqueza que movimenta a economia local, oriunda da pesca. A cidade também oferece suporte turístico para visitação à foz do rio, o que tem sido dificultado pela baixa do nível do rio, trazendo dificuldades para navegação.

**Figura 6:** Região do baixo São Francisco



Fonte: ANA/GEF/PNUMA/OEA

O estuário se estende até quase 75 km da foz e as inversões do sentido das correntes de marés podem ocorrer até 40 km e a penetração de massas de água do Oceano até 8 km, à jusante da cidade de Piaçabuçu/ AL (OLIVEIRA et al, 2008).

**Figura 7:** Mapa da área de estudo, foz do rio São Francisco.



Fonte: Mapa da base elaborado a partir do Google Earth.

Segundo Cavalcante (2001), os afluentes mais importantes situam-se na margem esquerda do Alto e do Médio São Francisco, em territórios do estado de Minas Gerais e Bahia. Essa característica se deve à existência de grandes áreas de formação sedimentar naquelas regiões, permitindo maior infiltração das chuvas.

A bacia do São Francisco compõe-se de quatro setores:

- a) Curso superior – Alto São Francisco compreende as nascentes dos rios a 1.428m de altitude até a cidade de Pirapora (MG) a 470m;
- b) Médio São Francisco – que se inicia em Pirapora e segue até Remanso (BA), na altitude de 385m;
- c) Curso sub-médio, de remanso até Paulo Afonso (160m de altitude);
- d) Baixo São Francisco, de Paulo Afonso até a sua foz no Oceano Atlântico.

Segundo Medeiros et al (2014), o clima na bacia hidrográfica varia de tropical úmido a semiárido.

## 2.2 – REGIME DE MARÉ

Segundo Cavalcante (2001), as marés na região do Rio São Francisco apresentam um regime semidiurno com amplitude média de Sizígia em torno de 2,2 metros. Nas regiões

adjacentes à foz, a corrente superficial é, predominantemente, dirigida para Sudoeste (SSW), induzidas pelos ventos do Nordeste (NE), que também formam ondas que incidem em um ângulo agudo, em relação à linha de praia e geram corrente de deriva litorânea Sul.

### 2.3 - EQUIPAMENTOS E ATIVIDADES EXECUTADAS

A coleta dos dados relevantes à pesquisa ocorreu nos dias 17 e 18 de fevereiro de 2014, o que correspondeu à campanha de verão, onde sua maré era de Sizígia, e nos dias 25 e 26 do mesmo mês, concentrando os estudos na maré de quadratura. Em ambos os casos, as coletas foram feitas através de dois ciclos completos, ou seja, 25 horas.

Utilizando o GPS Garmin GPS Map 76CSx, foram determinadas 17 estações de coleta de dados, partindo do município de Piaçabuçu/AL, acompanhando até a foz do Rio, procurando seguir sempre o canal principal, a fim de definir a distribuição longitudinal da salinidade.

Para melhor organização, as 17 estações de coletas foram chamadas de estações (EF1 até EF17), onde o procedimento seria repetido nas duas situações: Sizígia e Quadratura. Para a elaboração da variação temporal do perfil salino, foi realizada com o barco fundeado, a uma distância cerca de 50 metros da margem, na estação ESF0 (Estação São Francisco “0”), durante coletas contínuas por um período de 25 horas, realizando perfilhamentos verticais com CTD a cada 30 minutos.

As profundidades das estações de coleta foram medidas através do sensor Sonar Digital HawkEye H22PX; a salinidade e temperatura medidas com sonda multiparamétrica YSI 6600 (Figura 8). As medições com a sonda multiparamétrica foram executadas utilizando guincho hidrométrico, com lastro de 25 Kg, em razão da grande velocidade da correnteza.

**Figura 8:** Sonda Multiparamétrica YSI 6600



Fonte: O autor.

A sonda estava localizada na popa da embarcação atrelada a um sistema de guincho, onde se podia controlar velocidade de descida e conferir a profundidade no medidor do guincho, juntamente ao *display*. O controle da velocidade é imprescindível para garantir que o cabo não folgue e desça sempre teso, para que não ocorram informações irreais.

Foi adotado um sistema de poita, com gramatura passando dos 10 quilos, para que a sonda descesse o mais vertical possível.

**Figura 9:** Guincho manual utilizado para descer a sonda multiparamétrica.



Fonte: O autor.

Os dados coletados pela sonda foram armazenados de duas formas: uma no próprio *display* do equipamento, assim como na memória da própria sonda. A fim de haver maior controle no armazenamento dos dados, eram descarregados os dados no *notebook* para garantir que ambas as memórias estivessem sempre livres para receber novos dados, impossibilitando possíveis perdas.

**Figura 10:** Display YSI acoplado a sonda multiparamétrica.



Fonte: O autor.

**Figura 11:** Visualização dos dados da sonda multiparamétrica para controle de qualidade durante o processo de amostragem.



Fonte: O autor.

A velocidade e direção da corrente foram determinadas com ADCP Sontek River Surveyor de 1500 MHz. O ADCP e a sonda multiparamétrica foram operados utilizando-se notebook HP.

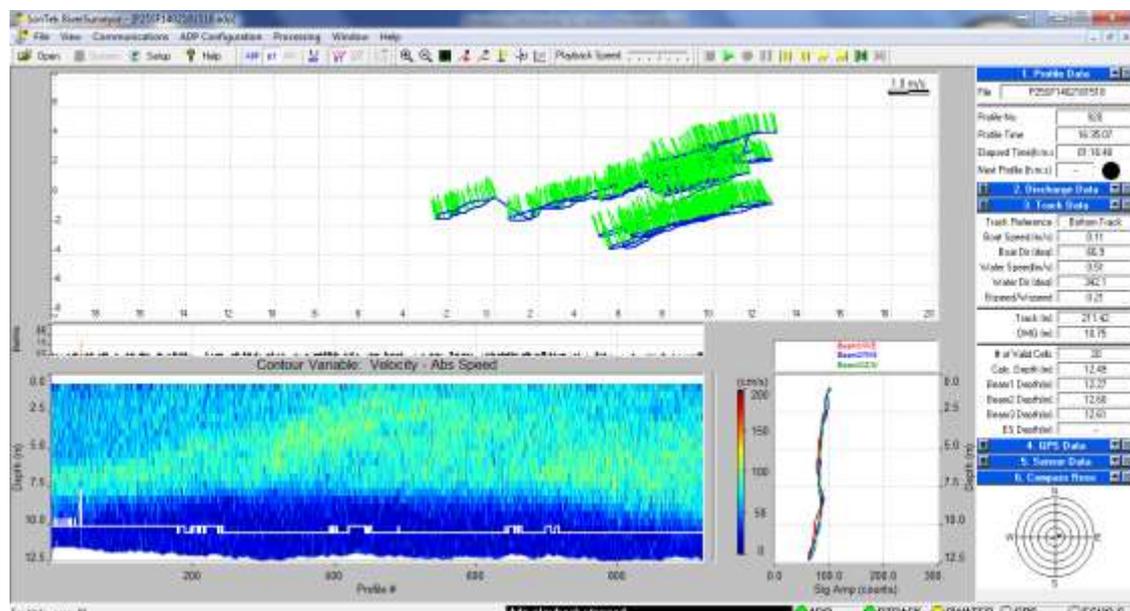
**Figura 12:** ADCP sincronizado com notebook para avaliação das amostras.



Fonte: O autor.

Os dados coletados pelo ADCP eram sempre conferidos, para avaliar o desempenho e garantir a manutenção do fornecimento de energia através de baterias elétricas. O equipamento era ligado diretamente ao *notebook*, sendo utilizado um *software* de mesma natureza, para acompanhar o levantamento. Tais dados eram armazenados conforme as datas de coletas para diferenciar no pós-tratamento dos dados.

**Figura 13:** Visualização dos dados do ADCP para controle de qualidade durante o processo de amostragem.



Fonte: O autor.

**Figura 14:** Mesa de trabalho utilizada para programação dos instrumentos.



Fonte: O autor.

A velocidade e direção do vento foram determinadas através da estação meteorológica: Weather Station model PB200 - AIRMAR Technology, instalada no mastro no topo da embarcação. As amostragens foram realizadas utilizando o barco tipo traineira Vespúcio.

**Figura 15:** Estação meteorológica fixada na haste da embarcação.



Fonte: O autor.

**Figura 16:** Os dados de vento eram coletados e armazenados simultaneamente.



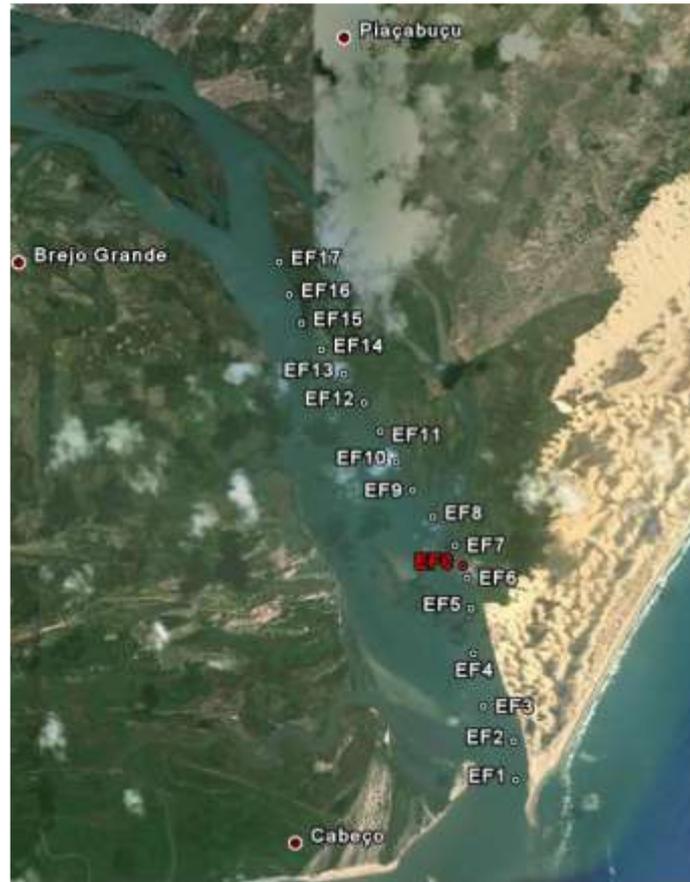
Fonte: O autor.

### 2.3.1- Medição da variação temporal do perfil salino e da temperatura

**Tabela 1:** Dados de Maré para o Porto de Maceió/AL

	17.Fev.2014	18.Fev.2014	25.Fev.2014	26.Fev.2014
04:17	2.0	04:53	2.0	04:21 0.7
10:23	0.3	10:54	0.3	10:32 1.6
16:30	2.1	17:02	2.1	16:54 0.7
22:47	0.2	23:17	0.3	23:19 1.7
MARÉ DE SIZÍGIA			MARÉ DE QUADRATURA	

**Figura 17:** Localização das Estações de coleta



Fonte: Base Google Earth.

Para garantir a confiabilidade dos dados, fez-se necessário o fundeio do barco numa região onde a profundidade seria adequada para os dois levantamentos (Sizígia e Quadratura), localização determinada previamente, com ajuda de um sonar.

### **2.3.2 - Medição da distribuição longitudinal da salinidade e temperatura**

Após a determinação do canal principal, onde também foi fundeada a embarcação, determinou-se, em sua continuidade, as 17 estações de coleta dos dados de temperatura e salinidade. Dadas as estações, configurou-se as coletas para cada ponto, correspondendo às estações ESF1 até a ESF17. As coletas foram realizadas no período de preamar das marés de sizíguas e quadratura.

**Tabela 2:** Coordenadas geográficas das estações de coleta

ESTAÇÃO	PROF. (m)	LATITUDE	LONGITUDE	DIST. FOZ (m)
ESF0	10	10°28'17"	36°24'01"	
ESF1	8,5	10°30'02"	36°23'35"	0
ESF2	10,5	10°29'43"	36°23'36"	572
ESF3	10,5	10°29'26"	36°23'51"	1253
ESF4	10,2	10°29'00"	36°23'56"	2063
ESF5	12,1	10°28'38"	36°23'57"	2744
ESF6	14,5	10°28'23"	36°23'59"	3220
ESF7	11,5	10°28'07"	36°24'05"	3738
ESF8	5,5	10°27'53"	36°24'16"	4283
ESF9	6,5	10°27'40"	36°24'26"	4793
ESF10	7,5	10°27'26"	36°24'34"	5291
ESF11	7,6	10°27'11"	36°24'42"	5794
ESF12	6,5	10°26'57"	36°24'50"	6310
ESF13	4,5	10°26'43"	36°25'00"	6814
ESF14	4,3	10°26'31"	36°25'11"	7315
ESF15	3,5	10°26'18"	36°25'21"	7814
ESF16	3,5	10°26'04"	36°25'27"	8307
ESF17	5,5	10°25'48"	36°25'32"	8810

### 2.3.3- Medição da variação temporal da velocidade da corrente

As medições das correntes foram realizadas a cerca de 50 metros da margem esquerda do Rio São Francisco, próximo a sua foz, no mesmo local onde o barco ficou fundeado - ESF0 (Estação São Francisco "0"). Esse local foi definido para que garantisse a profundidade adequada para a coleta dos dados, ou seja, no canal principal deste rio.

O intervalo de amostragem ao longo da coluna d'água foi de 0,5 m da superfície ao fundo, coletados num intervalo de 5 segundos, durante um período contínuo de 25 horas.

## 2.4- METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO DOS MAPAS

A partir dos dados coletados, posteriormente tabulados, retirados os erros e organizados no programa Microsoft Excel, utilizou-se o software Surfer, na versão 9, desenvolvido pela

Golden Software Inc., na plataforma Windows, que pode ser utilizado para cálculo e confecção de mapas e de variáveis a partir de dados regularmente distribuídos.

Foi definida a malha de interpolação, os limites máximos e mínimos e o espaçamento dos números de linhas e colunas. Aplicou-se o método *Kriging*, método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de elementos regionalizadas e, a partir deste, foram gerados mapas de distribuição da salinidade e temperatura.

## 2.5 – TRANSPORTE DE SAL

Com base em princípios físicos, considerando um estuário lateralmente homogêneo, o transporte advectivo e instantâneo de massa de sal, por unidade da secção transversal perpendicular ao movimento longitudinal, pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$\mathbf{Ms} = \int_0^h \rho \mathbf{US} \, dz = \bar{\rho} \overline{\mathbf{US}h} \quad (3.1)$$

Onde  $\rho$ ,  $U$  e  $S$  indicam a densidade, o componente longitudinal de velocidade e a salinidade, respectivamente. A barra sobre as variáveis denota o valor médio ao longo da coluna de água,  $h$ . No Sistema Internacional (SI) o transporte de massa de sal é dado em  $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

O transporte de massa de sal, sem o efeito periódico da maré, é obtido pela média no tempo, durante um ou mais ciclos completos de maré ( $T$ ),

$$\mathbf{T}s = \rho \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{M}_S \, dt = \rho \langle \overline{\mathbf{US}h} \rangle \quad (3.2)$$

Onde, de acordo com a notação utilizada, os sinais  $\langle \rangle$  denotam a média no tempo. Nessa equação a densidade  $\rho$  foi considerada constante durante o intervalo de tempo ( $T$ ).

Para um canal estuarino, somente uma parte do transporte de sal é calculado pela equação (3.2). Para separar as parcelas do transporte de sal, geradas pelos componentes barotrópico (maré) e baroclínico (gradiente de salinidade), os valores instantâneos da salinidade e do componente longitudinal da velocidade são decompostos em quatro componentes e a profundidade local em duas (Bowden, 1963; Fischer, 1976; Hunkins, 1981; Kjerfve, 1986; Dyer, 1997).

Nesse caso, essa decomposição pode ser expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t) = \mathbf{U}_a(\mathbf{x}) + \mathbf{U}_t(\mathbf{x}, t) + \mathbf{U}_s(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{U}'(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t) \quad (3.3)$$

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t) = \mathbf{S}_a(\mathbf{x}) + \mathbf{S}_t(\mathbf{x}, t) + \mathbf{S}_s(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{S}'(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t) \quad (3.4)$$

Onde  $U_a = \bar{U}(x) >$ ,  $U_t(x, t) = \bar{U}(x, t) - U_a$ ,  $U_s(x, z) = \langle U(x, t) \rangle - U_a$

e  $U' = U(x, t, z) - U_a - U_t - U_s$ . Expressões equivalentes são válidas para calcular  $S_a, S_t, S_s$  e  $S'$ .

Substituindo as equações (3.4) e (3.5) na equação (3.2) e considerando que  $h(x, t) = \langle h \rangle + h_t(x, t)$ , o transporte advectivo total de sal pode ser decomposto em 32 termos. Tendo-se em vista as definições dadas acima, vários termos se anulam ou podem ser desprezados quando do cálculo das médias no espaço e no tempo (Dyer, 1997; Fischer, 1976; Hunkins, 1981),

$$\langle U_t \rangle = U_s = \langle U' \rangle = U' = 0$$

Desprezando-se outros termos para os quais não há razões físicas para serem esperadas correlações significativas, obtém-se apenas sete termos e o transporte total da salinidade, por unidade de largura da secção transversal durante um ou mais ciclos completos de maré, é dado por:

$$T_S = \bar{\rho} [[U_a h_a + \langle h_t U_t \rangle] S_a + h_a \langle U_t S_t \rangle + h_a \overline{U_s S_s} + h_a \langle \overline{U'_s S'_s} \rangle + \langle U_t S_t h_t \rangle + U_a \langle S_t h_t \rangle] \quad (3.5)$$

Os termos do segundo membro da equação (3.5) foram relacionados, respectivamente, aos seguintes processos e mecanismos físicos: descarga de água doce, aprisionamento topográfico ou transporte de Stokes, bombeamento da maré, circulação gravitacional, efeitos estacionário e não estacionário do vento, e dispersão da maré via correlação tríplice (BOWDEN, 1963; DYER, 1978; FISCHER, 1976; FISCHER et al, 1979; HUNKINS, 1981). O último termo, corresponde à advecção resultante da correlação da maré e da salinidade (KJERFVE, 1986). Detalhes sobre esse procedimento são descritos por Miranda (no prelo).

Este método já foi aplicado para o estudo da variação da contribuição relativa desses termos do transporte de sal em sistemas com diferentes condições de estratificação vertical e foram descritos em vários trabalhos (DYER, 1978; HUNKINS, 1981; LEWIS, 1983; CASTRO, 1996; MIRANDA et al, 1998).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 – EFEITOS DAS BARRAGENS NO RIO SÃO FRANCISCO

A atividade de geração de energia hidroelétrica provocou grandes alterações nas condições naturais do Submédio e Baixo São Francisco, criando um sistema de cascata de barragens e reservatórios ao longo do eixo principal do rio (MEDEIROS et al, 2007/2011).

As diversas barragens construídas provocaram grandes modificações nas vazões interanuais e no aporte de matéria em suspensão no Submédio e Baixo RSF<sup>1</sup>.

Após a conclusão da Usina Hidroelétrica do Xingó (UHE), a vazão foi definitivamente regularizada para o patamar operacional, na média de 2.060 m<sup>3</sup>/s. Os picos de enchentes com altas vazões de 8.000 a 15.000 m<sup>3</sup>/s, que ocorriam naturalmente nos primeiros meses do ano (janeiro a março), foram notavelmente suavizados. A vazão atual é resultado do manejo integrado do sistema de barragens, sendo a barragem de Sobradinho a principal controladora.

**Tabela 3:** Principais usinas hidroelétricas, localização e volume de armazenamento das barragens no Rio São Francisco.

Hidroelétrica	Operação	Setor	Volume (km <sup>3</sup> )	Potência (kW)
Três Marias	1952	Alto	21	387.600
Paulo Afonso I a IV	1955 a 1980	Submédio	0,1	180.00
Sobradinho	1980	Submédio	34	1.050.000
Itaparica	1988	Submédio	10,8	1.500.000
Moxotó	1978	Submédio	1,2	440.000
Xingó	1994	Baixo	3,8	3.000.000

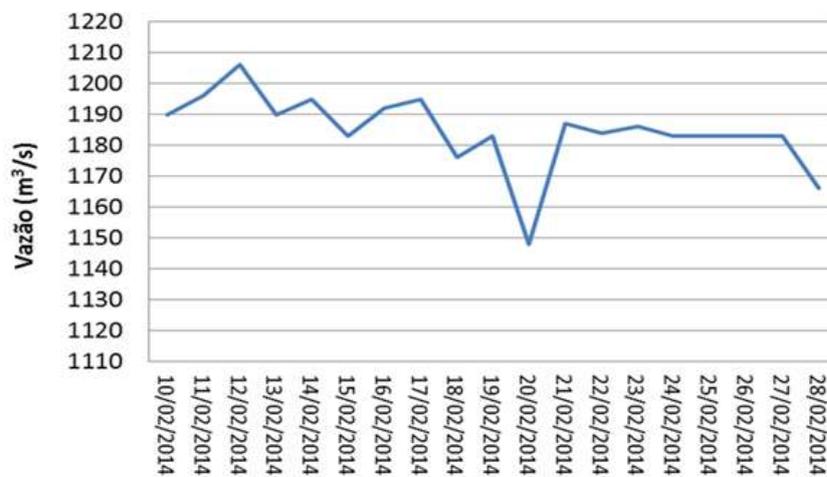
#### 3.2- VAZÕES DURANTE O PERÍODO ESTUDADO

A vazão média anual do Rio São Francisco é de 2.846 m<sup>3</sup>/s, mas, ao longo do ano, pode variar entre 1.077 m<sup>3</sup>/s e 5.290 m<sup>3</sup>/s, segundo a Agência Nacional de Águas. A distribuição da

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.ana.gov.br>

vazão do Rio São Francisco para o período de coleta não indicou grande variação, tendo um valor médio de 1200 m<sup>3</sup>/s, tanto durante as campanhas de maré de Sizígia quanto na maré de Quadratura. As vazões afluentes são determinantes para a intensidade da salinidade no estuário, sendo a vazão, assim, o principal fator controlado pelo homem, que determina a magnitude e extensão da estrutura salina no estuário.

**Figura 18:** Variação das vazões durante o período das campanhas.

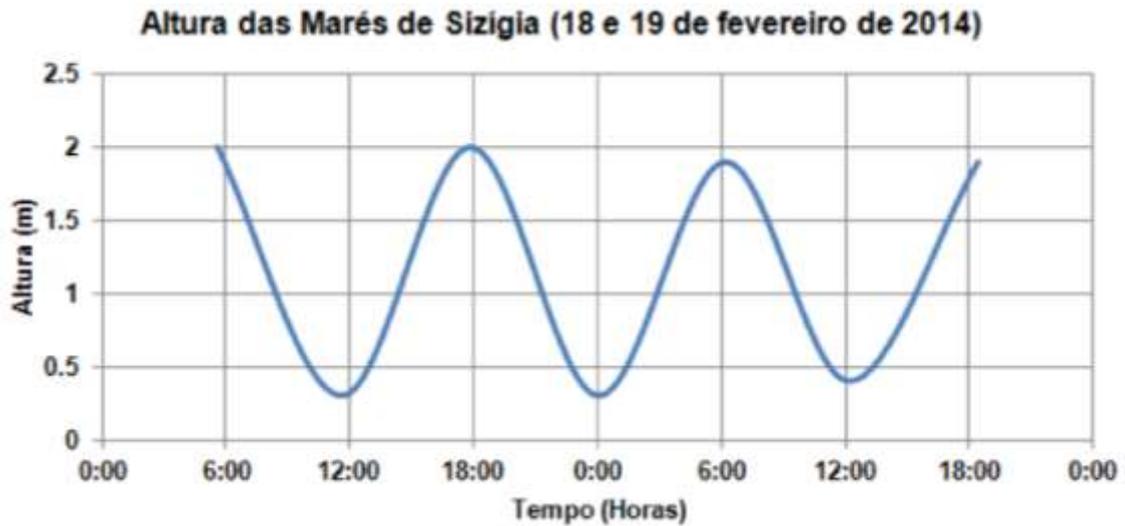


### 3.3 - CAMPANHA DE SIZÍGIA

#### 3.3.1 - Oscilação da maré e ventos

As campanhas de maré durante o período realizado nos dias 18 e 19/02/2014 mostrou amplitude máxima de 1,7 metros (Figura 19). A distribuição longitudinal de salinidade foi realizada na estufa de maré de sizígia.

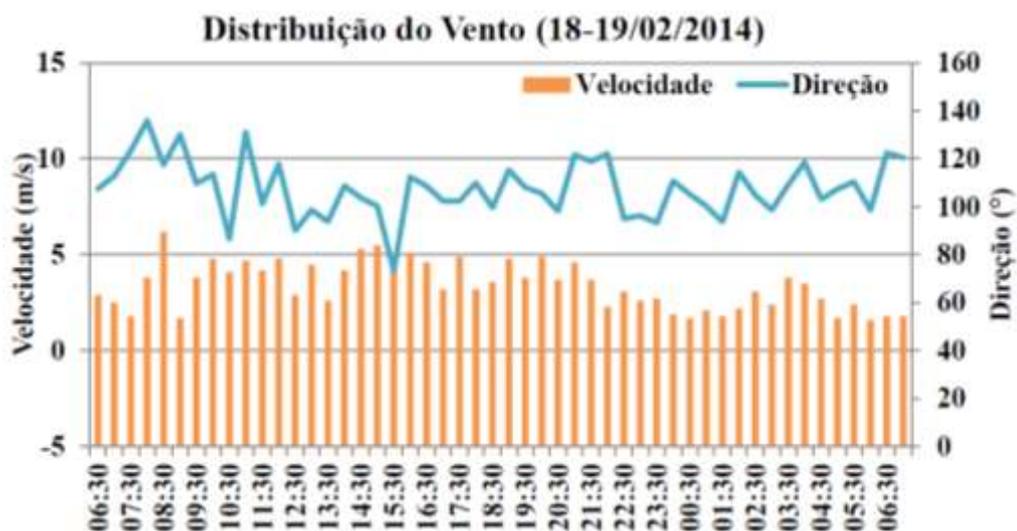
**Figura 19:** Variação da maré nos dias 18 e 19/02/2014.



Fonte: (Gerado a partir da Maré prevista para o porto de Maceió, DHN da Marinha do Brasil).

Os dados de vento para o período de sizígia mostraram uma baixa intensidade com valores oscilando entre 1,7 m/s (mínimo) e 6,2 m/s (máximo), com valores médios em torno de 3,4 m/s. A direção predominante para o quadrante leste (Figura 20), apresenta um padrão característico para o período de verão.

**Figura 20:** Velocidade e direção do vento durante as campanhas de sizígia nos dias 18 e 19/02/14.



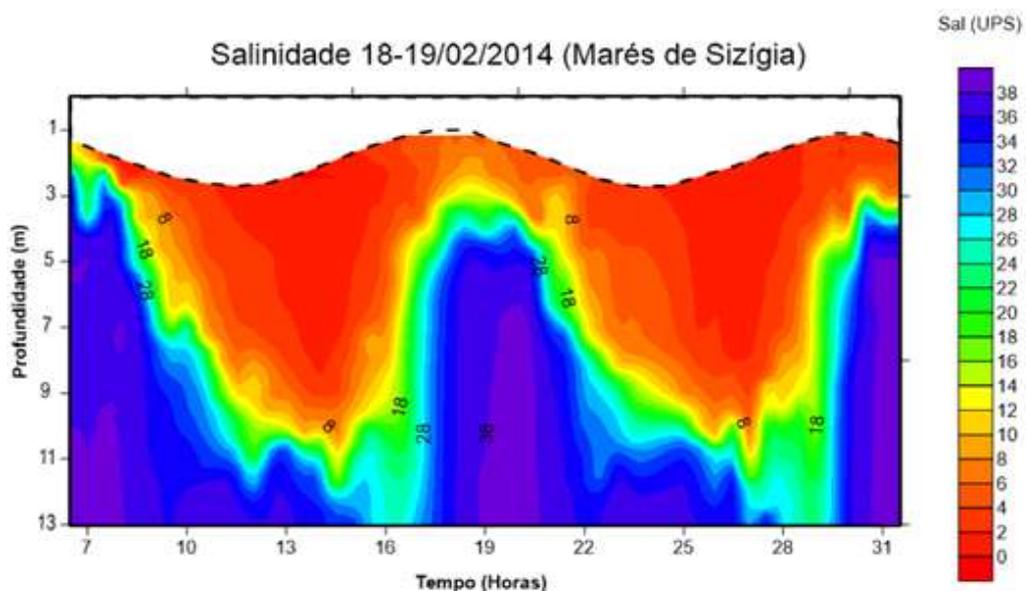
### 3.3.2 - Parâmetros hidrográficos

O ciclo de 25 horas na maré de Sizígia iniciou-se as 06h30min, ainda em condições de maré enchente, com altura em torno de 2,0 metros e, ainda, sob forte estratificação salina do

tipo cunha salina. A salinidade superficial durante as primeiras horas de coleta apresentou valores oscilando entre 4 a 18 ups, atingindo valores acima até de 35 ups, em apenas 2 metros de profundidade, caracterizando uma cunha salina.

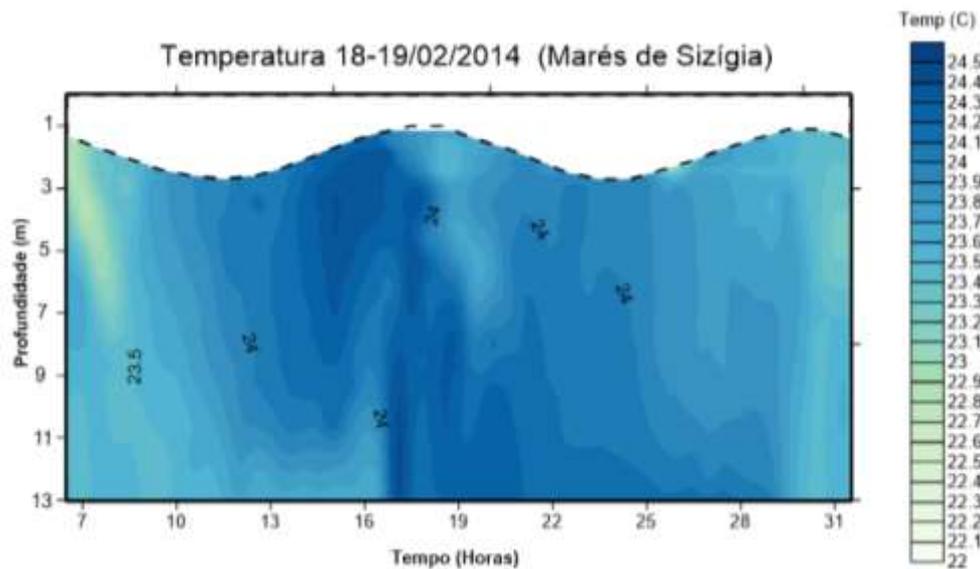
A estratificação do tipo cunha salina manteve-se, ao longo de todo o período de medição, somente alterando o grau de intensidade e posição ao longo da coluna d'água. Este deslocamento da estratificação de salinidade para as camadas mais profundas, esteve presente durante os picos de maré vazante, quando o fluxo da corrente do estuário abaixo transporta águas menos salinas, na direção da foz, levando a estratificação de salinidade para as camadas mais profundas do canal principal.

**Figura 21:** Distribuição vertical das salinidades em circunstância de maré de sizígia na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 18/02/2014 as 06:30h até as 07:30h do dia 19/02/2014.



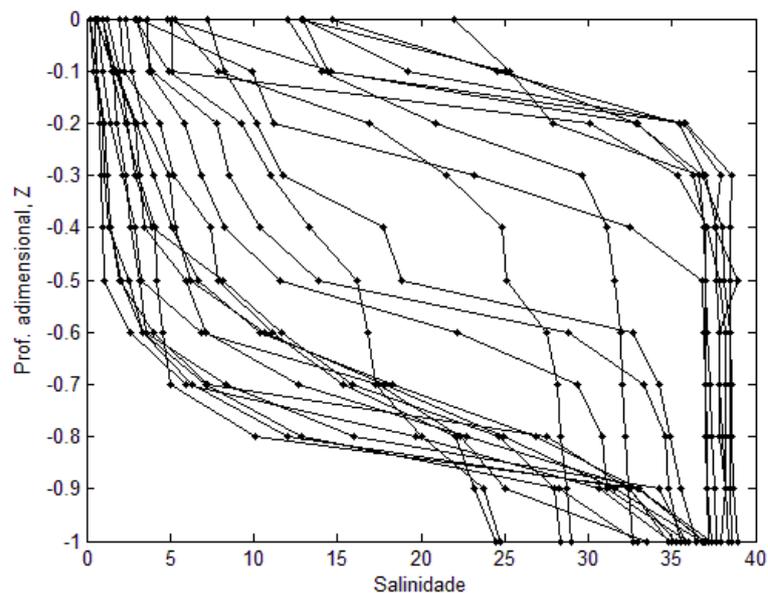
Assim como a salinidade, as medições das temperaturas iniciaram-se no dia 18/02/2014 as 06:30h no mesmo período de 25 horas contínuos até as 07:30 do dia 19/02/2014, a temperatura durante o período da coleta apresentou uma média de 23,85 °C com amplitude térmica de 2,5 °C, havendo oscilações entre 22 a 24,5 °C.

**Figura 22:** Distribuição vertical das salinidades em circunstância de maré de sizígia na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 18/02/2014 as 6:30 até as 07:30 do dia 19/02/2014.



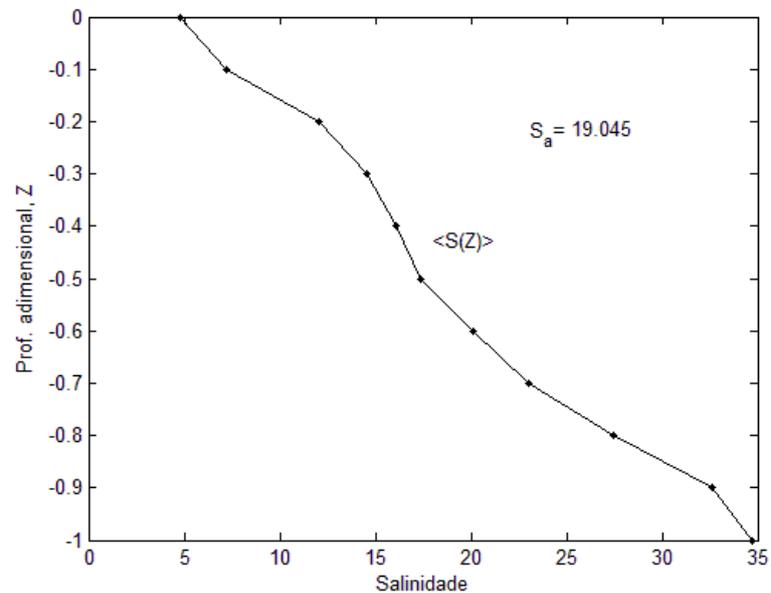
Na figura 23 é possível verificar a variação do sal em relação a maré de enchente e de vazante. A haloclina varia em função das correntes de enchente, onde se concentra o sal de maneira mais estratificado ao fundo. E o mesmo acontece quando a maré está de vazante, onde o sal se concentra nas camadas mais superficiais. Esta estratificação não é tão intensa por conta desse acúmulo de sal tanto no fundo (na enchente), quanto na superfície (na vazante). Observando o gráfico é possível ver um aglomerado nos perfis verticais na vazante, partindo do 0 e confluindo em torno de 25 a 35 no eixo da salinidade; o mesmo ocorre na enchente quando há confluência entre 37 e 40 na salinidade até a superfície.

**Figura 23:** Variação temporal da salinidade.



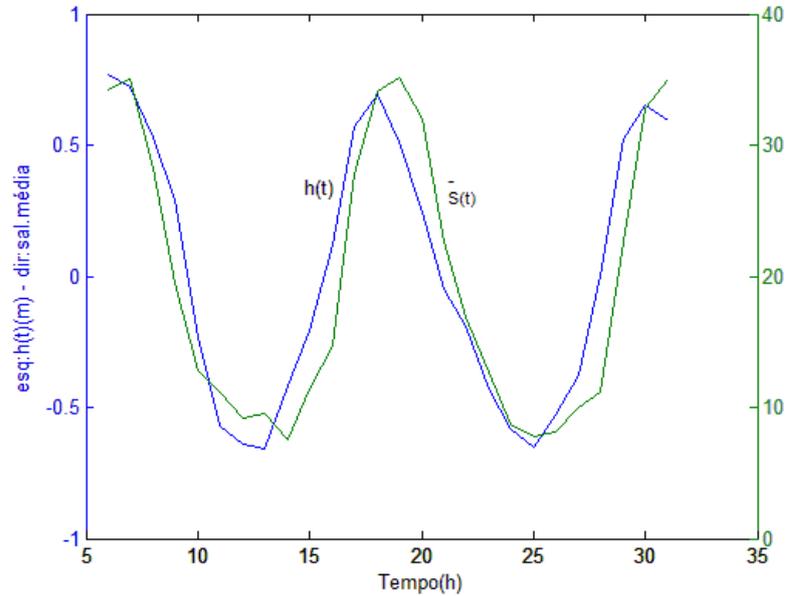
Após a análise de todos os perfis é possível a construção de uma figura que considere uma média geral de todos os perfis com relação a salinidade. A profundidade neste caso é tomada como sendo adimensional. Na Figura 24 percebe-se uma grande quantidade de sal nas camadas mais inferiores. Após a análise, verificou-se que a salinidade encontrada como sendo a média do perfil de 25 horas foi de  $S_a = 19.045$ .

**Figura 24:** Perfil médio temporal da salinidade



Na figura anterior foi possível definir uma média de salinidade em cada profundidade. Diferentemente deste, a figura 25 apesar de também apresentar uma média da salinidade esta não é feita com relação às profundidades, mas sim em toda a coluna de água. Percebe-se quando se compara o comportamento da maré  $h(t)$  e a velocidade média na coluna de água  $v(t)$ , que há um equilíbrio tanto na maré vazante quanto na enchente, o que traduz que ambas estão em fase.

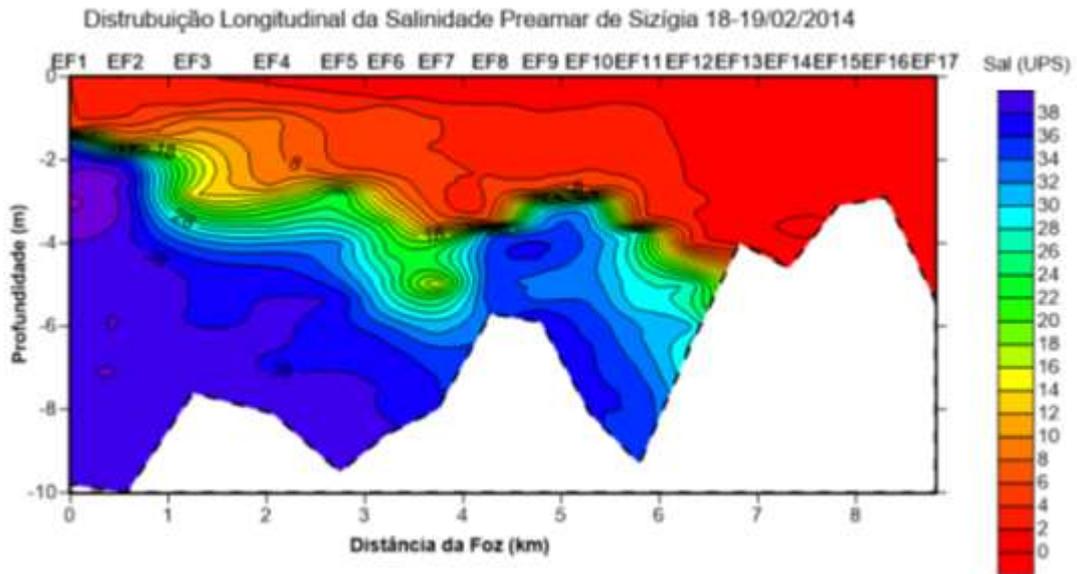
**Figura 25:** Nível da superfície livre e salinidade média na coluna de água



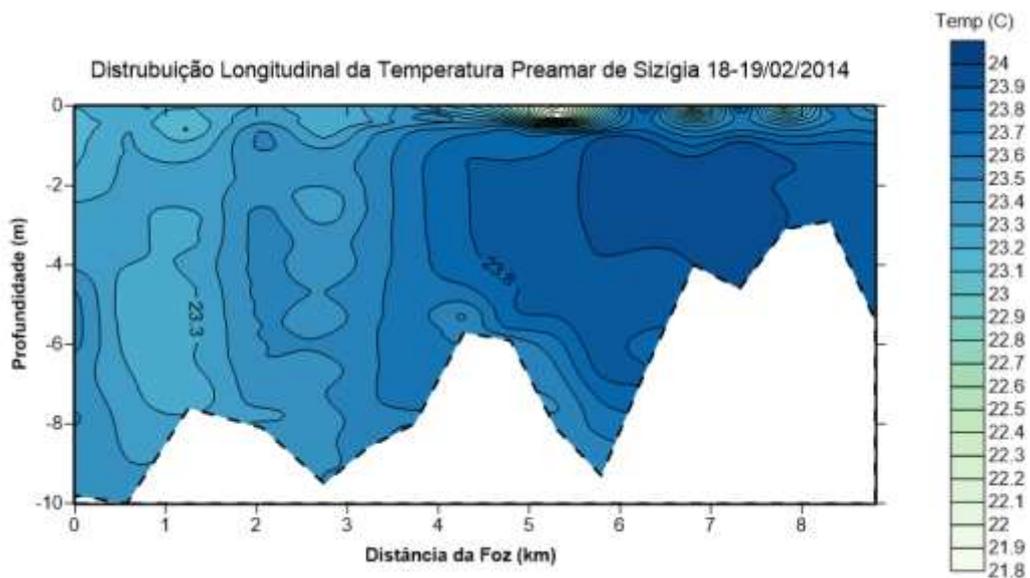
A distribuição longitudinal da salinidade apresentou entre as estações EF1 a EF12 um perfil fortemente estratificado, caracterizando uma cunha salina. Foi observado que a partir da estação EF13 a estratificação tipo cunha salina desaparece, originando uma estrutura salina parcialmente homogênea e as demais estações EF14 até EF17 sem estratificação, dando origem a uma estrutura verticalmente homogênea, ou seja, presença de água doce da superfície ao fundo. No geral foi observado um avanço aproximadamente de 6,8 km da cunha salina em condições de maré de sizígia.

A distribuição longitudinal da temperatura apresentou entre as estações EF1 a EF10 valores entre 23 a 23,4 °C, não havendo oscilações significativas, a partir da estação EF11 verificou-se valores acima de 23,8 °C. Os ventos durante a campanha de sizígia foram de baixa intensidade, não influenciando a distribuição longitudinal da salinidade. Neste caso, o limite da propagação da cunha salina estuário acima foi função somente da intensidade da descarga do rio, e da força de propagação da onda de maré durante o período amostrado.

**Figura 26:** Distribuição longitudinal da salinidade de todos os perfis no estófo de maré sizígia do dia 18-19/02/2014.



**Figura 27:** Distribuição longitudinal da temperatura de todos os perfis no estófo de maré sizígia do dia 18-19/02/2014.



### 3.3.3 - Componente longitudinal da velocidade

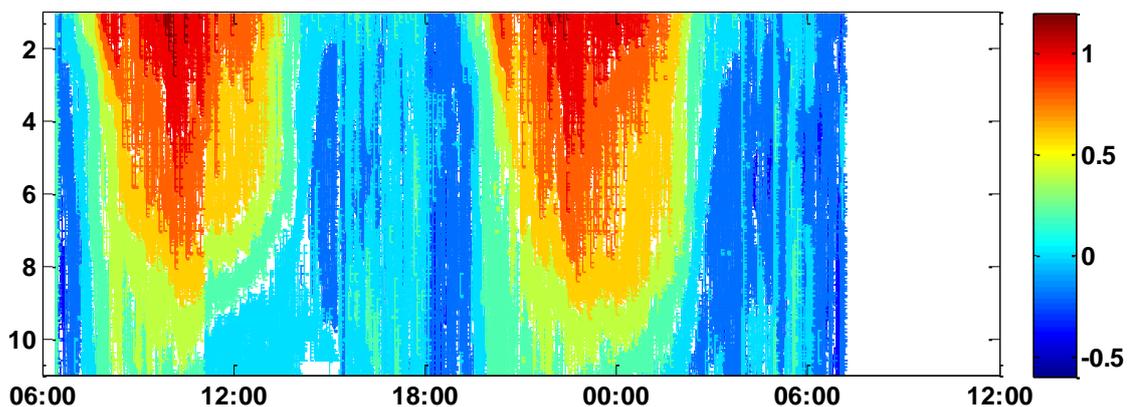
Os perfis verticais de corrente coletados durante a maré de Sizígia indicaram uma forte assimetria entre as velocidades de enchente e vazante, sendo registrado as maiores intensidades da corrente no período da maré vazante as 10h00 (fluxo positivo), do que na enchente as 18h00 (fluxo negativo), com máximos variando entre -0,5 m/s (enchente) e 1,1 m/s (vazante). Nas

primeiras horas da coleta foram observadas as condições de enchente com velocidades em torno de 0,2 m/s e ainda negativas, indicando intrusão da água marinha para o interior do estuário.

Esta assimetria de corrente com fluxo mais intenso estuário abaixo gerou, em diversos instantes, inversões das correntes nas camadas mais profundas, apresentando características de fluxos bidirecionais, movendo-se na direção do oceano nas camadas superiores e para o interior do estuário, nas camadas próximas ao fundo.

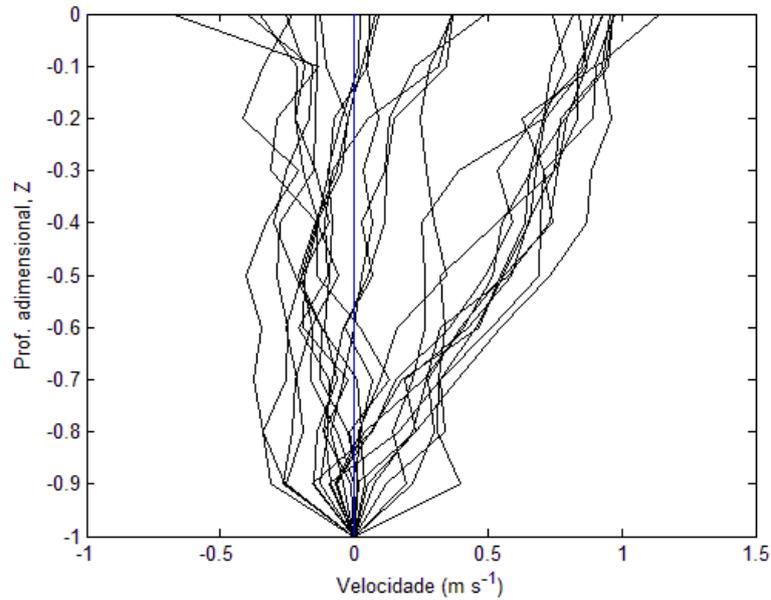
A Figura 28 apresenta a variação da componente longitudinal das correntes, onde os valores positivos retratam a vazante da maré; valores negativos retratam a enchente de maré. Ambos podem ser verificados na figura onde há um acúmulo de valores positivos até a baixamar onde as velocidades das correntes em direção ao mar são maiores; após o período de estufa de maré, estes valores vão diminuindo até a preamar.

**Figura 28:** Perfil médio temporal do componente longitudinal da velocidade.



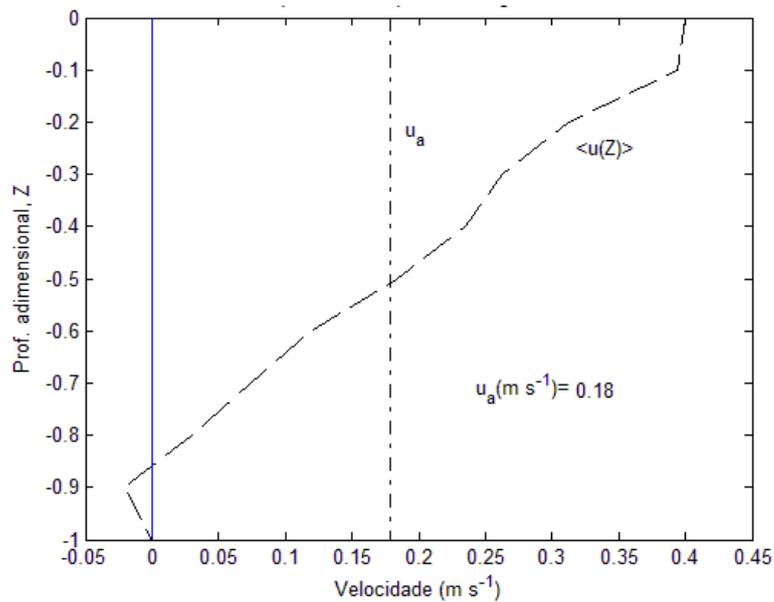
A Figura 29 apresenta uma variação horária das correntes, onde encontra-se os maiores valores de correntes na maré de vazante próximo a  $0,3 \text{ ms}^{-1}$  e na maré de enchente em torno de  $0,8 \text{ ms}^{-1}$ . A partir do 0 no eixo da velocidade, encontra-se uma conjunção dos valores positivos caracterizando a intensidade da velocidade supracitada.

**Figura 29:** Variação temporal dos perfis de velocidade.



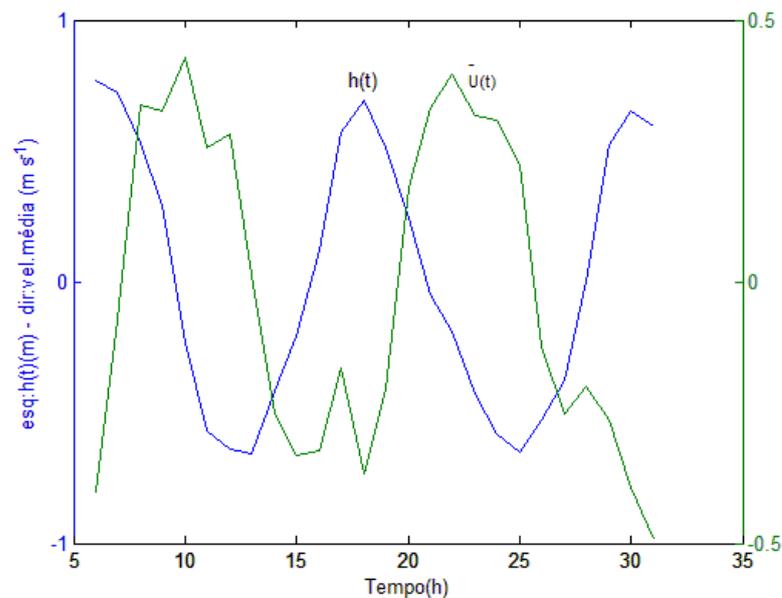
A Figura 30 apresenta a média temporal da componente longitudinal da velocidade, onde a linha tracejada está relacionada a velocidade residual. Neste caso percebe-se uma força maior no sentido do estuário abaixo, ou seja, o rio consegue descarregar tudo que entra através da foz. A velocidade média para a componente longitudinal da velocidade foi de  $U_a = 0,18 \text{ m s}^{-1}$ .

**Figura 30:** Perfil médio temporal do componente longitudinal da velocidade.



Diferentemente da análise extraída da figura 25, quando se compara o nível da superfície livre e a velocidade média na coluna de água, verificamos um atraso de cerca de 3 horas entre o eixo a maré (azul) e a velocidade da corrente (verde). Ou seja, quando a maré está vazando e chega até o baixamar, a velocidade demora um pouco até a força das correntes diminuir e acontecer sua inversão. O mesmo ocorre na enchente, caracterizando uma assimetria entre correntes e marés. Devido este atraso dizemos que estes não estão em fase.

**Figura 31:** Nível de superfície livre e velocidade média na coluna de água.

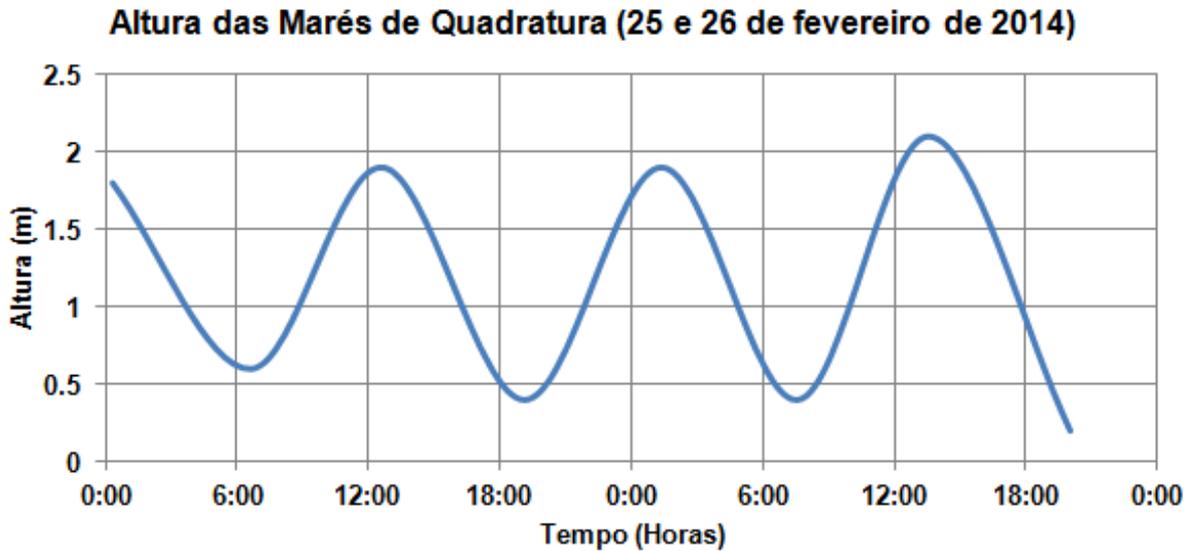


### 3.4 - CAMPANHA DE QUADRATURA

#### 3.4.1 - Oscilação da maré e ventos

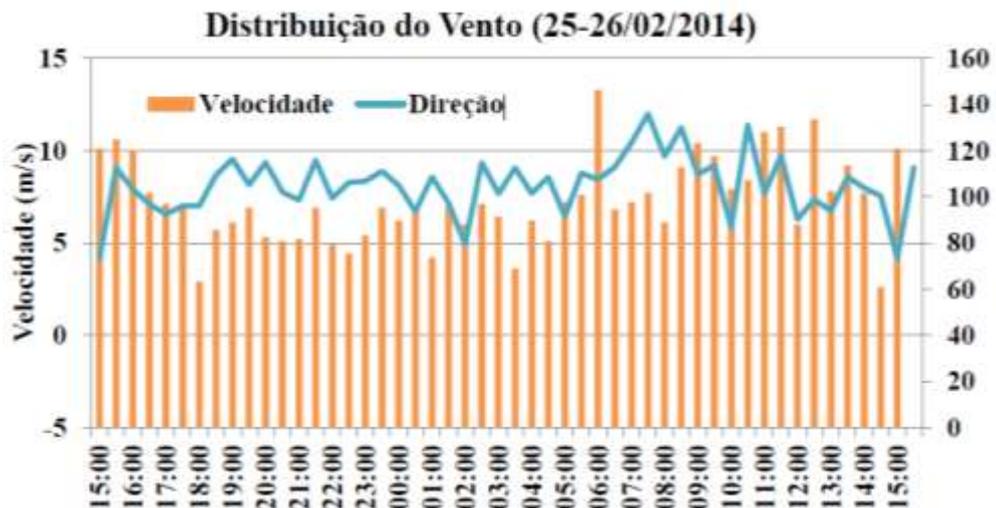
Durante a campanhas no período entre os dias 25 e 26/02/2014 a maré mostrou amplitude máxima de 1,5 metros (Figura 17). A distribuição longitudinal de salinidade foi realizada em estofo de maré de quadratura, com altura de maré de 1,9 metros.

**Figura 32:** Variação da maré nos dias 25 e 26/02/2014. (Gerado a partir da Maré prevista para o porto de Maceió, DHN da Marinha do Brasil).



Os ventos durante o período de quadratura, diferente da coleta de sizígia, apresentaram uma maior intensidade com valores médios em torno dos 7,1 m/s, e máximos e mínimos variando entre 4 e 13 m/s, respectivamente, e direção predominante no quadrante leste.

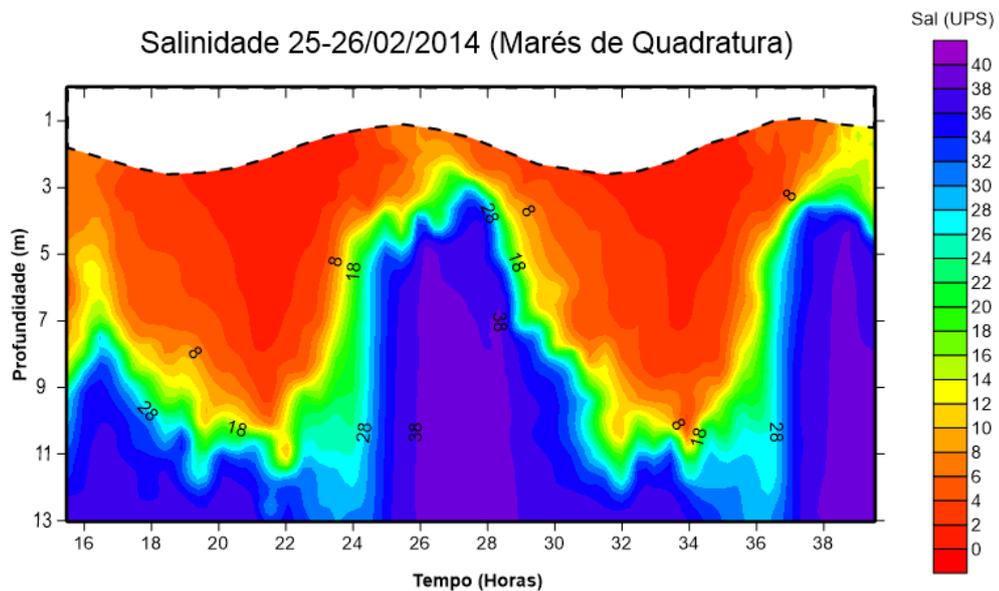
**Figura 33:** Velocidade e direção do vento durante as campanhas de maré de quadratura nos dias 25 e 26/02/2014.



### 3.4.2 - Parâmetros hidrográficos

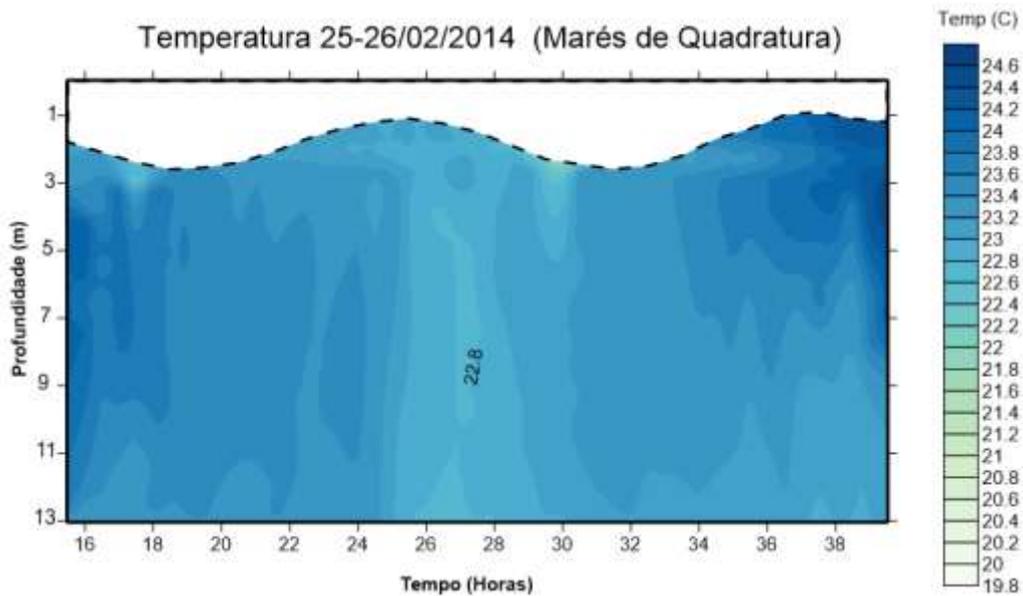
As medições da maré de quadratura na estação fixa (EF0) iniciaram-se as 15:30h, em condições de maré vazante e com acentuada estratificação salina tipo cunha salina. Durante as primeiras horas de coleta a salinidade na superfície apresentou valores variando entre 2 a 10 ups, com picos de máximo nas últimas horas da coleta. A partir dos 3 metros de profundidade a salinidade foi superior a 25 ups.

**Figura 34:** Distribuição vertical das salinidades em circunstância de maré de quadratura na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 25/02/2014 as 15:30h até as 16:30h do dia 26/02/2014



A temperatura, diferente do período da maré de sizígia, apresentou valores inferiores a 25 °C, com a média 22,2 °C, oscilando entre 19,8 a 24,6 °C, onde as máximas ocorreram nas últimas horas de coleta na superfície.

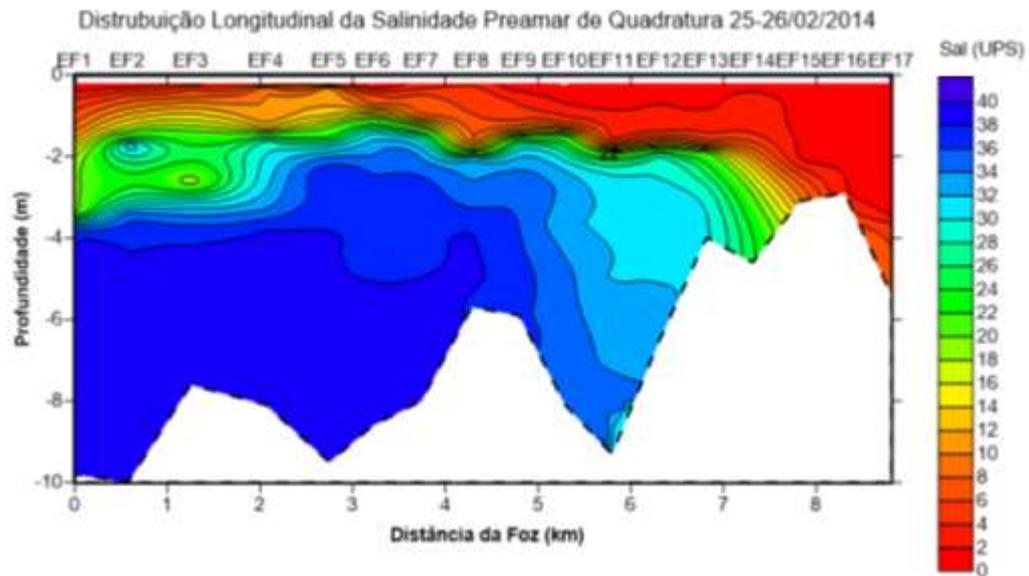
**Figura 35:** Distribuição vertical das temperaturas em circunstância de maré de quadratura na estação fixa (ESF 0 – Latitude 10°28'17"; Longitude 036°24'01") durante o período contínuo de 25 horas do dia 25/02/2014 as 15:30h até as 16:30h do dia 26/02/20



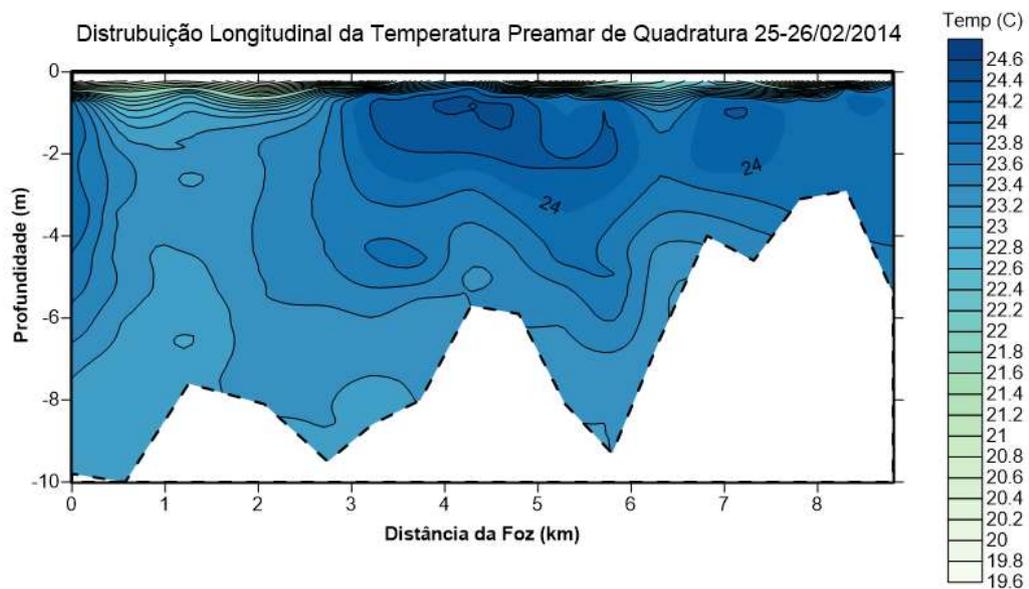
A distribuição longitudinal da salinidade em condições de maré de quadratura (Figura 20) apresentou uma estrutura salina predominante de cunha salina, principalmente ao longo das estações EF1 até EF13, configurando um avanço de 8 km. As demais estações amostradas apresentaram condições mais semelhantes à parcialmente misturadas. Segundo Medeiros (2003) maiores deslocamentos de cunha salina aconteceram em 2001 chegando a atingir 10 km em relação a foz com uma salinidade de 2 ups em condições de maré de quadratura e de baixa vazão.

A distribuição longitudinal da temperatura em condições de maré de quadratura (Figura 36) apresentou pouca oscilação dos valores, com uma média de 23,45 °C.

**Figura 36:** Distribuição longitudinal da salinidade de todos os perfis no estófo de maré quadratura do dia 25-26/02/2014.

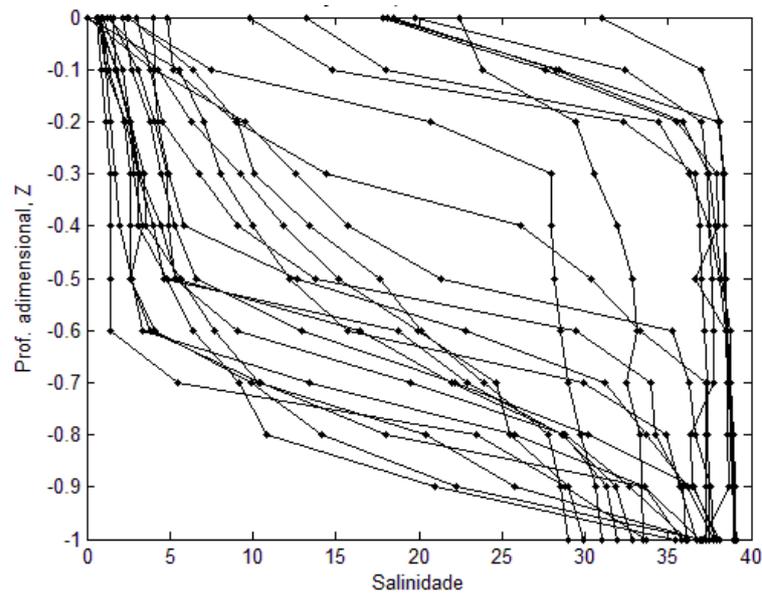


**Figura 37:** Distribuição longitudinal da temperatura de todos os perfis no estófo de maré quadratura do dia 25-26/02/2014.

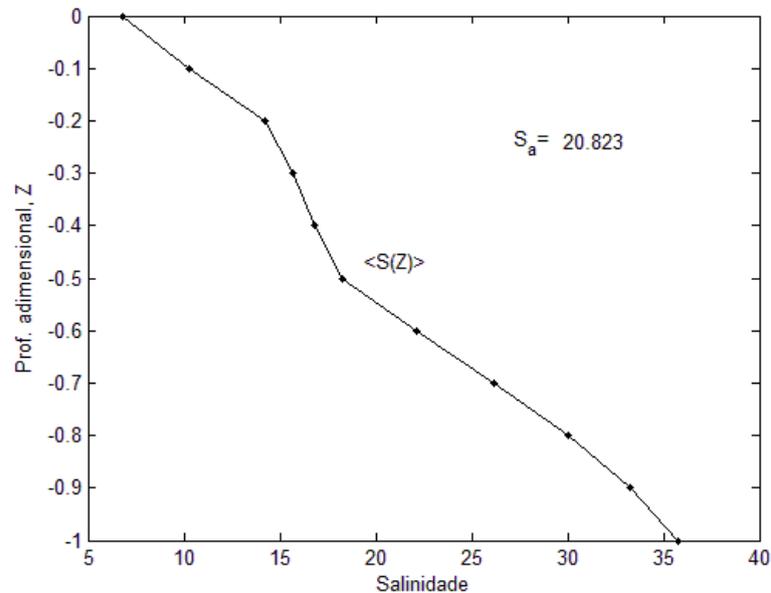


Na Figura 38 a variação temporal da salinidade desta vez na maré de quadratura, comporta-se semelhante ao encontrado na maré de Sízígia, ou seja, há valores que se confluem na vazante, e o mesmo é encontrado na maré de enchente, caracterizando uma fraca estratificação.

Ou seja, no mesmo estuário tropical, em duas campanhas distintas, a salinidade apresentou características semelhantes, com o comportamento da estratificação semelhante.

**Figura 38:** Variação temporal de salinidade (Quadratura)

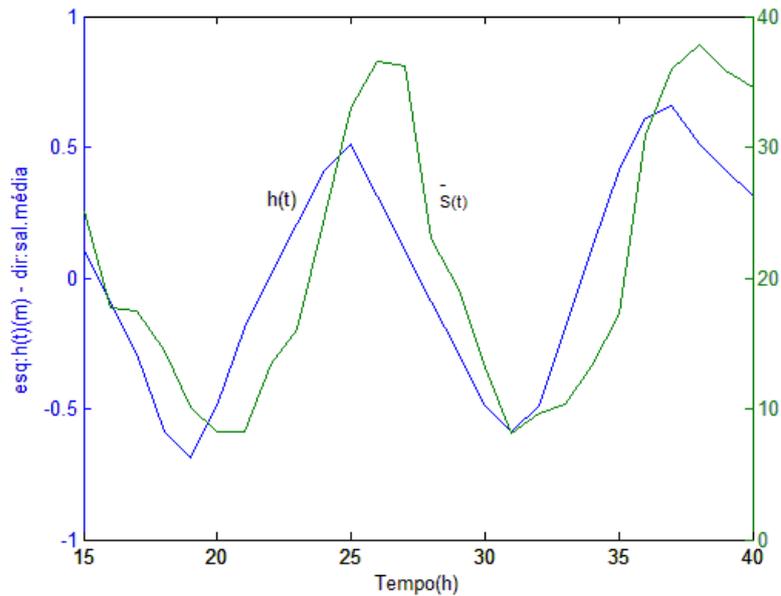
Na maré de Sizígia encontrou-se uma salinidade em torno de 19,045 ups com influência maior da maré uma vez que encontramos maiores ondulações oceânicas, ocorrência decorrente de retorno, na Figura 39 que trata do perfil médio da salinidade na coluna de água, na maré de quadratura, encontrou-se um valor muito aproximada de  $S_a = 20.823$ ,

**Figura 39:** Perfil Médio Temporal da Salinidade

Observa-se claramente na Figura 40 a similaridade do comportamento da linha de maré e a linha que define a corrente, ou seja, na maré de vazante a inversão da intensidade da velocidade acontece com pouca diferença exatamente na estufa de maré. E este comportamento

também pode ser observado na maré de enchente, que tem a velocidade da corrente também aumentando no mesmo instante, com menos atraso, cerca de 2 horas, do que outrora ocorreu na maré de Sizígia.

**Figura 40:** Nível da superfície livre e salinidade média na coluna de água.



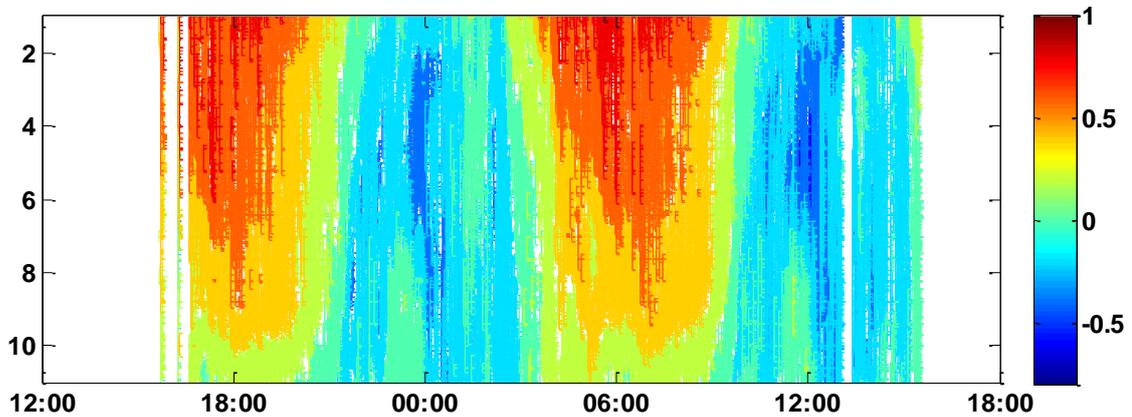
### 3.4.3 - Componente longitudinal da velocidade

De acordo com os perfis verticais de corrente coletados durante a maré de quadratura, apresentou maiores velocidades no período de enchente do que de vazante, com máximos variando entre -0,8 m/s (enchente) (06:00), e 0,6 m/s (vazante) (12:00). A velocidade apresentou pouca variação da superfície ao fundo durante todo o período de amostragem na maré de quadratura, a assimetria de corrente revelou um predomínio das correntes durante o período de enchente, onde a energia da propagação da onda de maré estuário acima mostrou-se dominante.

Foi registrado uma redução da inversão das correntes ao longo da coluna d'água, somente indicando características de fluxos bidirecionais em alguns instantes durante a maré vazante, movendo-se na direção do oceano nas camadas superiores, e para o interior do estuário nas camadas próximas ao fundo do canal principal. De forma geral, o fluxo negativo, estuário acima, se manteve predominante durante a maior parte do perfil de 25 horas, com frequentes eventos de circulação gravitacional intensificando a entrada da cunha salina, com maiores valores de salinidade junto ao fundo.

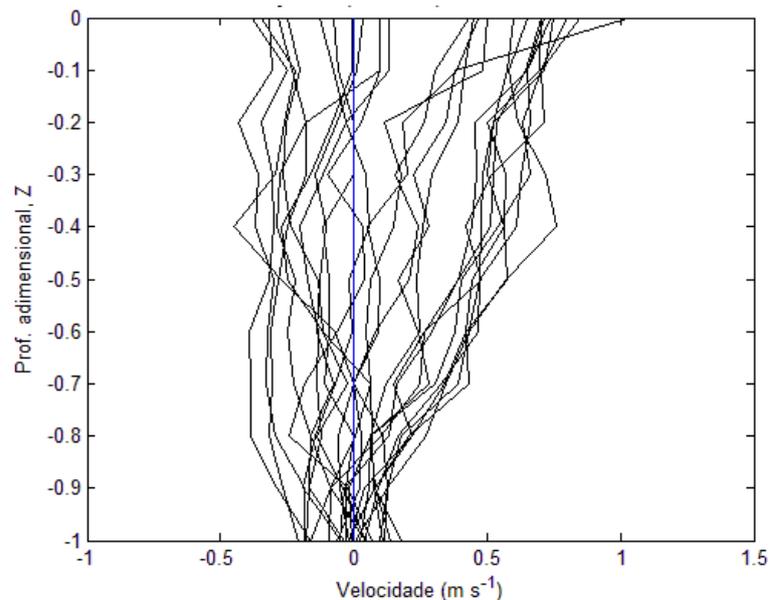
A Figura 41 que retrata a variação temporal dos perfis de velocidade apresentam agrupamento de valores positivos e negativos, na baixamar e na preamar respectivamente. Onde as variações das marés, com relação às velocidades, são bem distintas.

**Figura 41:** Variação temporal dos perfis da velocidade



Na Figura 42 encontramos a variação de velocidade temporal dos perfis de velocidade para a maré de quadratura. Onde com base no gráfico é possível perceber uma tendência das correntes estarem mais simétricas nas camadas mais inferiores, alcançando valores entre  $-0,2 \text{ ms}^{-1}$  e  $0,2 \text{ ms}^{-1}$ .

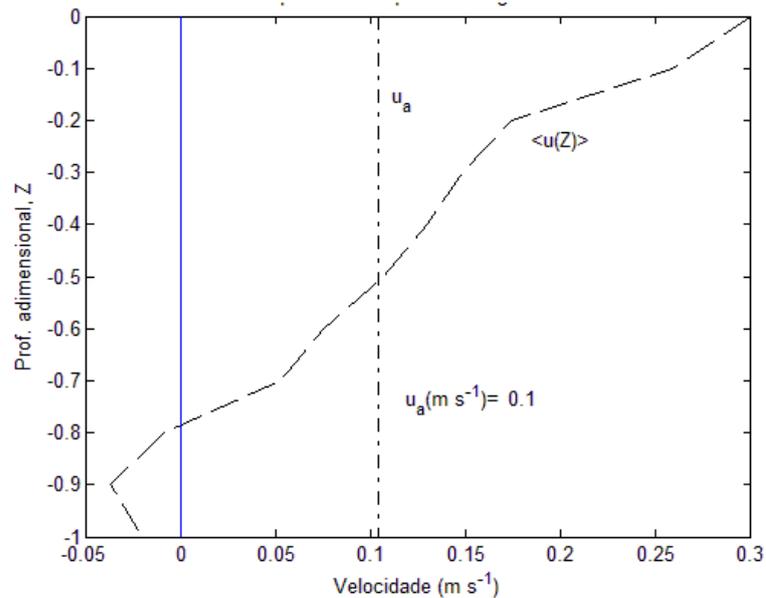
**Figura 42:** Variação temporal dos perfis da velocidade



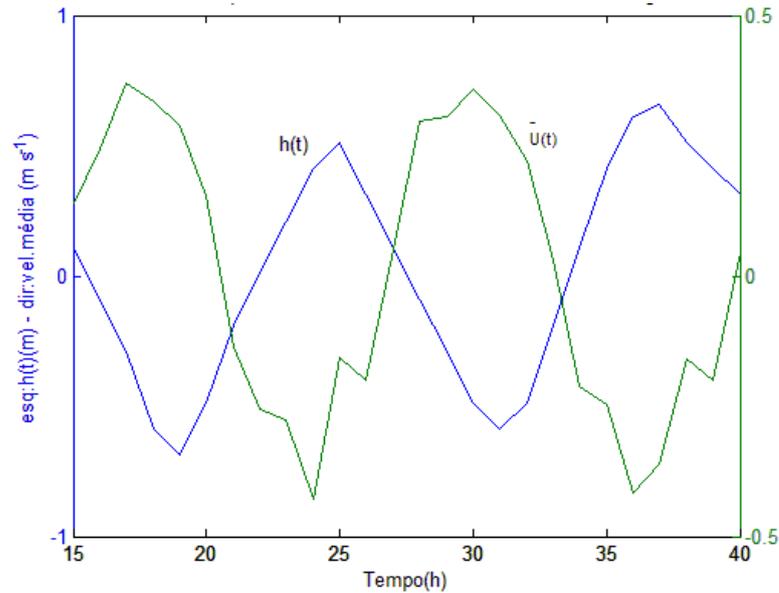
Na maré de Sizígia a componente longitudinal da velocidade era de  $0,18 \text{ ms}^{-1}$ , na maré de quadratura esse valor foi um pouco menor, mas não tão discrepante. A velocidade encontrada

neste período foi de  $U_a = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ . Ou seja, independente da maré estudada, encontrou-se valores que qualificam que a força da velocidade ainda se encontra positiva, sugerindo que o rio ainda possui força para balancear a entrada da onda de maré. A velocidade na maré de quadratura encontra-se também de estuário abaixo.

**Figura 43:** Perfil médio temporal do componente longitudinal da velocidade



Diferentemente do que foi encontrado na Sízgia, a Figura 44 mostra o nível da superfície livre e velocidade média na coluna de água, na maré de quadratura não se encontram em fase. Quando a maré está vazando há um atraso significativo para que haja a diminuição da velocidade e inversão de seu sentido.

**Figura 44:** Nível da superfície livre e velocidade média na coluna de água

### 3.5 – MISTURA E TRANSPORTE DE SAL

De acordo com a classificação de PRITCHARD (1955) o estuário do rio São Francisco pode ser classificado em estuário em cunha salina parcialmente estratificada ou estuário com água bem misturada com fluxo quase uniforme na vertical (MEDEIROS, 2007). O que pode ser observado na interpretação das figuras a seguir.

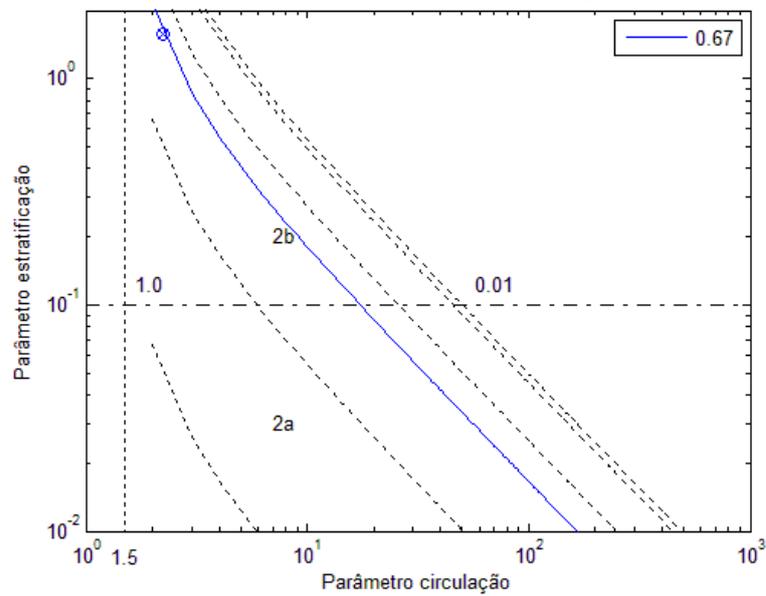
Segundo Miranda (2002), a interpretação física dos movimentos e processos de mistura relacionados aos resultados teóricos permitiram aos pesquisadores Hansen & Rattray (1966) dar uma segunda interpretação a esse diagrama, estabelecendo o Diagrama Estratificação-circulação para a classificação quantitativa de estuários. Como o parâmetro estratificação representa uma medida da estratificação vertical da coluna de água, o valor  $10^{-1}$  foi adotado por conveniência para estabelecer a transição entre os tipos altamente (Tipo b) e fracamente estratificados (Tipo a).

Os Tipos 2a e 2b encontrados nas figuras 45 (Maré de Sizígia) e figura 46 (Maré de Quadratura) classificam o estuário do rio São Francisco como sendo parcialmente misturado conforme explanação supracitada. O que se iguala aos demais estuários encontrados na planície costeira.

Analisando ainda os gráficos abaixo verificamos que na Sizígia o parâmetro estratificação/circulação encontrado foi de 0,67, o que significa que os processos difusos

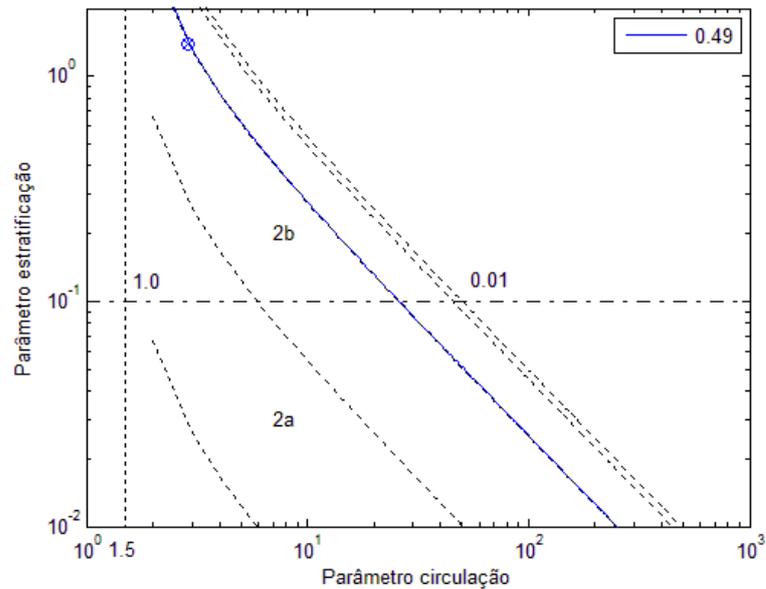
(oriundos do oceano) e os processos advectivos (do rio), foram importantes para o transporte de sal estuário acima, com contribuições relativas de 67% ( $v = 0,67$ ) e 33%, respectivamente.

**Figura 45:** Diagrama Estratificação – Circulação (Sizígia).



Para a maré de quadratura o valor encontrado foi de 0,49, ou seja, ambas as contribuições das forças oriundas do oceano, como as advindas do rio (difusas) foram importantes.

**Figura 46:** Diagrama Estratificação – Circulação (Quadratura).



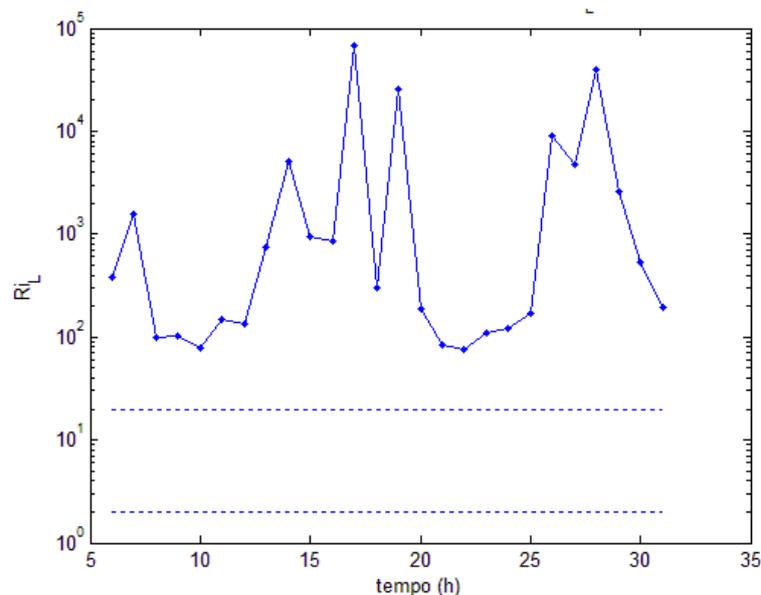
No estuário, a turbulência é produzida pela influência dos limites geométricos imposta ao movimento, cisalhamento vertical da velocidade, tensão de cisalhamento do vento e ondas de superfície e internas. A intensidade da turbulência controla a distribuição vertical da concentração das propriedades da massa de água estuarina.

Se  $Ri_L > 20$ , a mistura é pequena. Com o decréscimo desse valor ocorre o aumento da turbulência de fundo, tornando-se efetiva na redução do grau de estratificação. Abaixo do valor  $Ri_L \approx 2$  a turbulência torna-se efetivamente isotrópica e a mistura é totalmente desenvolvida (Dyer, 1997).

Usando os limite de  $Ri_L = 20$  e 2 como critério simplificado de mistura, é possível examinar a variação espacial e temporal da estabilidade vertical da coluna de água no estuário.

Na Figura 47 o número de Richardesom por camada, onde na maré de Sizígia tal componente permanece sempre maior que 20 e conforme explicação supracitada, a mistura é muito pequena, tornando o estuário bem estável. Lembrando que a forçaque o rio atua é sempre estabilizadora, e a do ocenao sempre turbulenta. Neste caso a componente do rio manteve a estabilização do local.

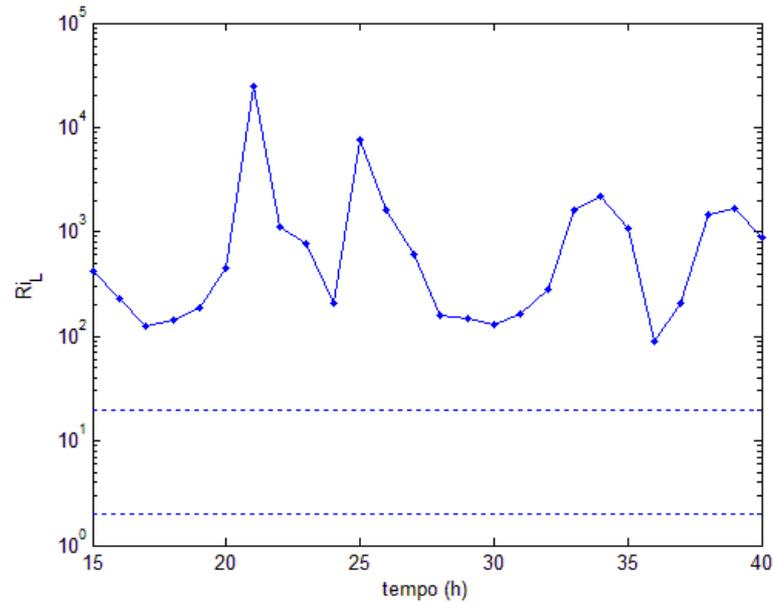
**Figura 47:** Número de Richardson por camada,  $(Ri)_L$  (Sizígia).



Processo semelhante foi encontrado na maré de quadratura, onde o número de Richardson também por todo o tempo se manteve sempre muito acima de 20, acarretando um cenário de estabilidade mesmo numa maré de quadratura.

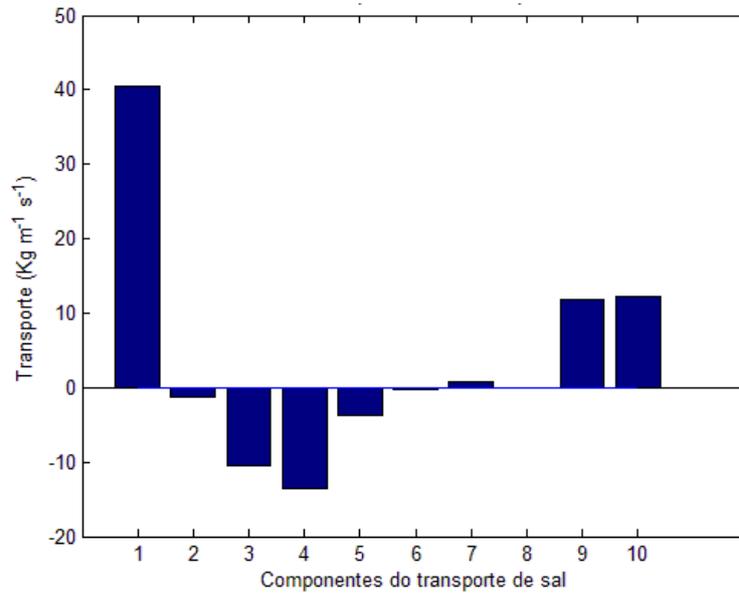
Desta forma, em ambas coletas a estabilização foi caracterizada através desse parâmetro no estuário do São Francisco.

**Figura 48:** Número de Richardson por Camada, (Ri)L (Quadratura).



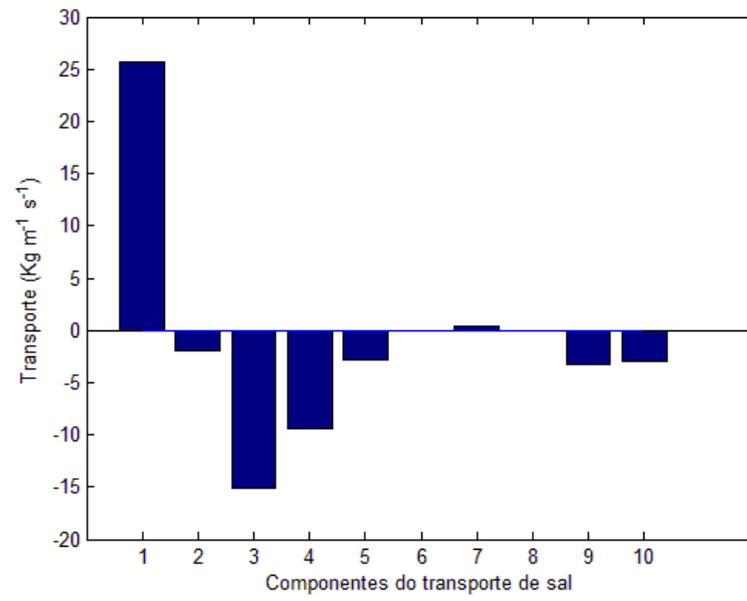
Na figura 49 encontramos os valores dos componentes do transporte do sal na maré de Sizígia. Tais componentes são:

- 1 - Descarga fluvial;
- 2 - Transporte de Stokes;
- 3 - Difusão da maré;
- 4 - Circulação gravitacional;
- 5 - Difusão residual;
- 6 - Cisalhamento da maré;
- 7 - Efeito não estacionário do vento;
- 8 - Apenas um espaçamento para melhor ler o gráfico.
- 9 -  $T_S = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 \therefore$  (transporte do sal)
- 10 -  $T_S$  Resultante

**Figura 49:** Valores dos componentes do transporte do sal (Sizígia).

Comparando as Figuras 49 e 50 vemos um comportamento similar na primeira componente que é a descarga fluvial, só que na maré de Sizígia essa chegou a um valor um pouco mais alto do que na maré de quadratura. As demais componentes Transporte de Stokes, difusão da maré, circulação gravitacional, difusão residual, cisalhamento da maré e efeito não estacionário do vento tiveram comportamentos semelhantes, variando um pouco no alcance dos valores.

Mas nos itens 9 e 10 de ambos os gráficos se percebe uma discrepância. Na maré de Sizígia estes valores positivos encontrados caracterizam uma exportação do sal, ou seja, o rio está descarregando grande quantidade do sal que outrora havia entrado estuário acima. Na maré de quadratura, acontece o contrário, com valores negativos a uma pequena entrada de sal no rio neste período.

**Figura 50:** Valores dos componentes do transporte de sal (Quadratura).

## CONCLUSÃO

O padrão de ventos registrados durante a campanha dos dias 25 e 26 foram mais intensos e auxiliaram as correntes de enchente gerando fluxos mais intensos. Estas condições também auxiliaram as correntes estuário acima durante o período de estofa, aumentando a magnitude da propagação da onda na direção do rio, e conseqüentemente, forçando a água mais salina a penetrar em direção as regiões mais internas do canal principal. No período de sizígia, os ventos apresentaram fraca intensidade, exibindo assim ao longo das camadas d'água uma assimetria na intensidade das correntes de enchente e vazante, sem a energia do vento para auxiliar no fluxo estuário acima, as únicas forçantes atuando no sistema durante a sizígia, estavam relacionadas a descarga do rio e a componente da maré.

A temperatura no período de maré de sizígia apresentou uma média de 23,8 °C com amplitude térmica de 2,5 °C. A campanha da maré de quadratura apresentou uma média 23,2 °C, de modo geral, os valores das temperaturas não apresentaram diferenças significativas. A variação espacial da temperatura no sentido longitudinal do estuário no período de maré de sizígia apresentou a partir dos 4 km a água mais quente.

A estrutura salina predominante nas duas campanhas foi a de cunha salina com grande deslocamento da cunha salina estuário acima ao longo do canal principal do rio São Francisco, avançando cerca de 6,8 km em condições de maré de sizígia e 8 km em maré de quadratura.

Através do número de Richardson percebeu-se que há uma estabilidade encontrada no estuário, o que qualifica que mesmo com toda entrada de material estuário acima, as forças das correntes ainda assim são superiores e fazem com que o sentido prevaleça estuário abaixo, traduzindo que o rio consegue descarregar tudo aquilo que foi posto rio a cima.

A definição do Diagrama de Estratificação-circulação foi possível caracterizar o estuário como sendo parcialmente misturado e levemente estratificado, a partir da análise da situação na Sizígia e na Quadratura.

Se observou através dos valores das componentes de transporte de sal que na maré de quadratura teve um transporte de sal ligeiramente maior que na maré de Sizígia, ao que pode se atribuir as descargas fluviais e principalmente o transporte de Stoke que são mecanismos transportadores favorecendo o decréscimo de substância, como por exemplo o sal e demais que podem inclusive acarretar problemas na construção de barragens, canais de navegação, consumo de água doce para fins urbanos entre outros.

## REFERÊNCIAS

- BOWDEN, K. F. The mixing processes in a tidal estuary. **Journal Air Pollution**, v. 7, p. 343-356, 1963.
- CAVALCANTE SEGUNDO, Geórgenes Hilário. Caracterização hidrodinâmica-sedimentológica do estuário e delta do Rio São Francisco. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-UFAL. Maceió, 2001.
- DAME, Richard et al. Estuaries of the South Atlantic coast of North America: Their geographical signatures. **Estuaries and Coasts**, 2000, v. 23, n. 6, p. 793-819.
- DYER, Keith R. **Estuaries: a physical introduction**. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Wiley, 1997.
- FISCHER, H. B. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries. **Journal of Fluid Mechanics**, n. 53, p. 672-687, 1972.
- HUNKINS, Kenneth. Salt dispersion in the Hudson Estuary. **Journal of Physical Oceanography**, v. 11, p. 729-738. May, 1981. Disponível em: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0485\(1981\)011%3C0729%3ASDITHE%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0485(1981)011%3C0729%3ASDITHE%3E2.0.CO%3B2).
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO. **Análise dos temporais da costa Oeste de Portugal Continental: 1956 a 1988**. Lisboa: Instituto Hidrográfico, 1989.
- KJERFVE, Björn. Circulation and salt flux in a well mixed estuary. In: **Physics of Shallow Estuaries and Bays**. Berlin: Springer Verlag, 1986.
- KJERFVE, Björn. et al. Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. In: **Muddy coasts of the world: processes, deposits and functions**. Amsterdam: Elsevier Science, 2002.
- KONOPPERS, B. et al. The São Francisco estuary, Brazil. In: **The handbook of environmental chemistry**, v. 5. Water Pollution: estuaries. Berlin: Springer Verlag, 2005.
- LEWIS, R. E.; LEWIS, J. O. The principal factors contributing to the flux of salt in a narrow, partially stratified estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 16, Issue 6, p. 599-626.
- MEDEIROS, Paulo Ricardo Peter et al. Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na costeira do rio São Francisco (SE/AL). **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 2, 2007, p. 212-231.
- MEDEIROS, Paulo Ricardo Peter et al. Características Ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continente-oceano. **Geochimica Brasiliensis**, v. 28, n. 1, p. 65-78, 2014.
- MEDEIROS, Paulo Ricardo Peter et al. **Aporte de sedimentos em suspensão no baixo São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, Rio Grande/RS, 2010.
- MIRANDA, Luiz Bruner de; CASTRO FILHO, Belmiro Mendes de. On the salt transport in the Cananéia Sea during a spring tide experiment. **Revista Brasileira de Oceanografia**, São Paulo, v. 44, n. 2, 1996.

MIRANDA, Luiz Bruner de; CASTRO FILHO, Belmiro Mendes de; KJERFVE, Björn. Circulation and mixing due to tidal forcing in the Bertioga Channel, São Paulo, Brazil. **Spring Verlag**, v. 21, n. 2, 1998, p. 204-214.

MIRANDA, Luiz Bruner de; Castro, Belmiro Mendes de; KJERFVE, Björn. **Princípio de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002.

OLIVEIRA, Arno Maschmann de. Estudo hidrodinâmico-sedimentológico do baixo São Francisco, estuário e zona costeira adjacente (AL/SE). In: PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA NA BACIA DO SÃO FRANCISCO. Maceió: UFAL, 2003. ANA/GEF/PNUMA/OEA

OLIVEIRA, A. M.; MEDEIROS, P. R. P.; LIMA, E. L. R.; HERNANDEZ, A. O. Dinâmica da formação da cunha salina no estuário do rio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 3, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: AOCEANO, 2008.

PASSAVANTE, J. Z. O.; FEITOSA, F. A. N. **Dinâmica da produtividade fitoplanctônica na zona costeira marinha**. In: ESKINAZI-LEÇA, E.; NEWMANN-LEITÃO, S.; COSTA, M. F. (Eds.). **Oceanografia: um cenário tropical**. Recife: Bagaço, 2004.

PRITCHARD, Donald W. **Estuarine Circulation Patterns**. Johns Hopkins University, Chesapeake Bay Institute, 1955.

PRITCHARD, Donald W. Estuarine classification: a help or hindrance. In: Neilson, B. J. et al. (Eds.). **Estuarine Circulation**, 1989. Disponível em: [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4612-4562-9\\_1#page-1](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4612-4562-9_1#page-1).

STOMMEL, Henry. The role of density currents in estuaries. PROCEEDINGS: MINNESOTA INTERNATIONAL HYDRAULICS CONVENTION, Minneapolis, University of Minnesota, 1953, p. 305-312. Disponível em: <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?253248>.

THURMAN, H. V. **Introductory oceanography**. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

WILSON, James G. The role of bioindicators in estuarine management. **Estuaries**, v. 17, n. 1, 1994, p. 94 -101.