



**Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeira**

*Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia*

**HIDRODINÂMICA E MECANISMOS DE TRANSPORTE DO SAL NO ESTUÁRIO DOS  
BONS SINAIS**

**Autor:**

Sualehé Ceia Andarusse

*Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciatura em  
Oceanografia*

## **Hidrodinâmica e Mecanismos de Transporte do Sal No Estuário Dos Bons Sinais**

**Autor:**

---

(Sualehé Ceia Andarusse)

**Supervisor:**

---

(MSc. Teófilo M. P. Ferraz)

Quelimane, Dezembro de 2023

## **Declaração sob compromisso de honra**

Eu **Sualehé Ceia Andarusse** declaro por minha Honra que o presente trabalho foi inteiramente produzido e realizado com base no material referido ao longo do mesmo e as ideias originais nele contidas, são da inteira responsabilidade do autor.

*Quelimane, Dezembro de 2023*

O autor:

---

(Sualehé Ceia Andarusse)

## **Dedicatória**

**Este Trabalho é dedicado:**

---

---

*Aos meus pais **Ceia Andarusse e Ngamo Godo**, aos meus familiares e a minha companheira **Agira Marcos**.*

---

---

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, agradeço a *ALLAH* por ter me concedido a saúde, proteção e ânimo para prosseguir com meus estudos.

Em segundo lugar, agradeço aos meus pais, Ceia Andarusse e Ngamo Godo, a quem eu devo tudo o que sou ou almejo ser um dia.

Deixo ficar aqui um obrigado muito especial a meu supervisor, MSc. Teófilo M. P. Ferraz, pela orientação, paciência, compreensão, amizade, encorajamento, apoio e por tudo quanto fez para a prontificação deste trabalho, apresento o meu muitíssimo obrigado.

Endereço meu *imenso gratidão* a Universidade Eduardo Mondlane, por ter me concedido uma bolsa de estudo que facultou na consumação plena da minha licenciatura.

Agradeço ao corpo docente e todos funcionários da UEM-Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, pelo conhecimento partilhado, acompanhamento e convívio nessa longa caminhada que de alguma forma sem a ajuda de vocês não seria possível concretizar essa realidade.

Deixo ficar aqui um obrigado a toda minha família em especial a meus irmãos: Ámada Nassabo, Tamacha Nassabo, Momade Ceia (em memória), Abdala Ceia, Maicha Ceia, Florinda Ceia, Antónia Ceia, Zura Muinde, Atija Ceia e Muaziza Ceia.

Deixo ficar aqui um *obrigado muito especial* a uma pessoa muito especial na minha vida, Agira Marc os pelo companheirismo, conselho, suporte e por tudo quanto fez por mim, você é uma pessoa muito incrível e amorosa.

A colegas e amigos, Juvêncio Bila, Valter Lobo, Brujane Evaristo, Amina Ossufo, Hélio Pereira, Amílton Muhosse, Amílton Siteo, Nélia Bijal, Amanda Boa, Palaciano Fabião, Cinquente Nhavotxo, José Mulaguelua, Hélder Barroso, Larion Mendes, Esménia Alzira, Mulatinha Duarte, Dércio Abrage, Quélio Metequeta, Lávio Felismino, Bolton Dos Anjos, Stélio Macitela, António Alfoi, Ricardo, Ricardo Nhambirri, Adelina Chiposse, Erica Mayassa, e entre outros que direta ou indiretamente acompanharam essa caminhada.

Quero deixar ficar um *obrigado muito especial* ao Alfinete Dramusse e Valdimiro Chicova pela companhia, conselho e por tudo quanto fizeram por mim, vocês não são apenas colegas ou amigos, vocês são irmãos para mim.

E endereço sincero gratidão aos colegas, amigos e famílias que aqui não foram mencionados, meu muito obrigado.

*“Existem três tipos de homens: os vivos, os mortos e aqueles que caminham sobre o mar”*

(Platão)

## Resumo

Os estuários são ambientes únicos, localizados na zona de transição entre o oceano aberto e o rio, na qual as águas oceânicas são mensuravelmente diluídas pela água doce da drenagem continental. De acordo com as suas características, esses ecossistemas são extremamente sensíveis e contém habitats muito importantes para a biodiversidade, a produção de biomassa e a preservação de inúmeras espécies oceânicas e terrestres. Contudo, a hidrodinâmica estuarina é regida basicamente por três factores, a descarga do rio, as correntes de maré e a tensão do vento, sujeita a modificações pela rotação da Terra, pela batimetria e geometria do estuário. Este trabalho objetiva-se em estudar a Hidrodinâmica e Mecanismos do Transporte de Sal no Estuário dos Bons Sinais em diferentes condições da maré. A campanha para aquisição de dados hidro-oceanográficos foi realizada sob condições de maré viva e em duas condições de marés (sizígia e quadratura), durante um período de aproximadamente 14 dias. A estimativa do aporte médio pluvial, apresentou valor máximo no mês de janeiro com  $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$  e mínimo no mês de outubro, com intensidade igual a  $-3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , apresentando a entrada máxima de água doce no mês de janeiro. A descarga total de água doce ( $Q_f$ ) devido a descarga de água doce da bacia de drenagem e aporte médio pluvial através da superfície livre do canal estuarino, apresentou valor máximo no mês de fevereiro com intensidade igual a  $46.10 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-3.30 \text{ m}^3/\text{s}$  representando a mínima no mês de outubro, com uma variação de  $15.79 \text{ m}^3/\text{s}$ . A temperatura, salinidade e densidade na coluna de água, apresentaram comportamentos homogêneo nas duas condições da maré, embora estratificado em alguns momentos na condição de sizígia como em quadratura. O principal mecanismo de transporte do sal, foi a parcela da descarga fluvial com participação de 90.06 % na maré de sizígia e, de 69.68 % na condição da maré de quadratura no que concerne o transporte total do sal. Assim, na condição de sizígia, o EBS é caracterizado como importador e na quadratura como exportador do sal. Nas duas condições de maré o estuário, apresentou valores de número adimensional de Richardson superiores a 0.25, mostrando a dominância da estratificação sobre a turbulência. De acordo com o diagrama proposto por Hansen & Rattray (1966), o estuário foi caracterizado com bem misturado e fracamente estratificado do tipo 1a nas duas condições de maré. De modo a caracterizar o regime do movimento no estuário do Bons Sinais, foi calculado o número adimensional de Reynolds na condição da maré de sizígia e quadratura. E, portanto, o EBS é caracterizado por um regime totalmente turbulento com uma mistura intensificada.

**Palavras-Chave:** Estuário do Bons Sinais. Hidrodinâmica estuarina. Mecanismos de transporte do sal. Índices Estuarinos. Forçantes físicas.

## Abstract

Estuaries are unique environments, located in the transition zone between the open ocean and the river, in which ocean waters are measurably diluted by freshwater from continental drainage. According to their characteristics, these ecosystems are extremely sensitive and contain very important habitats for biodiversity, biomass production and the preservation of numerous oceanic and terrestrial species. However, estuarine hydrodynamics are basically governed by three factors, river discharge, tidal currents and wind tension, subject to modifications by the Earth's rotation, bathymetry and estuary geometry. The aim of the work is to study the Hydrodynamics and Mechanisms of Salt Transport in the Bons Sinais Estuary under different tidal conditions. The campaign to acquire hydro-oceanographic data was carried out under spring tide conditions and two tidal conditions (spring and neap), over a period of approximately 14 days. The estimate of the average rainfall input presented a maximum value in January with  $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$  and a minimum in October, with an intensity equal to  $-3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , presenting the maximum freshwater input in the month of January. The total freshwater discharge ( $Q_f$ ) due to the discharge of freshwater from the drainage basin and average rainfall input through the free surface of the estuarine channel, presented a maximum value in the month of February with an intensity equal to  $46.10 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $-3.30 \text{ m}^3/\text{s}$  representing the minimum in October, with a variation of  $15.79 \text{ m}^3/\text{s}$ . The temperature, salinity and density in the water column showed homogeneous behavior in both tidal conditions, although stratified at times in the syzygy and quadrature conditions. The main salt transport mechanism was the portion of river discharge with a participation of 90.06% in the spring tide and 69.68% in the neap tide condition in terms of total salt transport. Thus, in the syzygy condition, EBS is characterized as an importer and in quadrature as an exporter of salt. In both tidal conditions, the estuary presented dimensionless Richardson number values greater than 0.25, showing the dominance of stratification over turbulence. According to the diagram proposed by Hansen & Rattray (1966), the estuary was characterized as well mixed and weakly stratified type 1a in both tidal conditions. In order to characterize the movement regime in the Bons Sinais estuary, the dimensionless Reynolds number was calculated under spring and neap tide conditions. And therefore, EBS is characterized by a fully turbulent regime with intensified mixing.

**Keywords:** Bons Sinais Estuary. Estuarine hydrodynamics. Salt transport mechanisms. Estuarine Indices. Physical forcing.

## Lista de Siglas e Abreviaturas

$\Delta f$	O escoamento superficial
A	Área da superfície livre
B	Coefficiente de contração salina medio
CTD	Conductivity, Temperature and Depth
DOR	Departamento de Observação e Rede
E	Evaporação
$E_0$	Evapo-transpiração potencial
EBS	Estuário do Bons Sinais
EMQ	Estação Meteorológica de Quelimane
g	Aceleração de gravidade
H	Profundidade local
$H_0$	altura da onda de mare
INAM	Instituto Nacional da Meteorologia
MPS	Material Particulado em Suspensão
P	Precipitação
Q	Descarga de água doce
$Q_d$	Aporte médio pluvial
$Q_f$	Descarga total de água doce
R	Fluxo de água doce a cada período de mare
$T_{ar}$	Temperatura do Ar
$T_s$	Resultante do transporte do sal
U	Velocidade media
$\nu_c$	Coefficiente de viscosidade cinemática
Z	Profundidade adimensional
ZC	Zona Costeira
ZM	Zona de mistura
ZR	Zona de maré do rio

## Lista de Figuras

- Figura 1:** Diagrama esquemático das zonas ZR, ZM e ZC de um sistema estuarino hipotético, onde: S equivale à salinidade e  $Q_f$  à descarga de água doce. **Fonte:** (Kjerfve B. , 1990). .....5
- Figura 2:** Tipos fisiográficos de estuários (Fairbridge, 1980, retirado de Miranda *et al.*, 2002) .....7
- Figura 3:** Diagrama esquemático de um estuário tipo cunha salina. As setas verticais na interface entre movimentos bidimensionais indicam o processo de entranhamento (de acordo com Pritchard 1989), representando: (a) distribuição longitudinal da salinidade; (b) Perfil de salinidade; e (c) média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água na posição indicada em (a) pela linha tracejada. Fonte: (Bérgamo, 2000). .....9
- Figura 4:** Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação num estuário tipo parcialmente misturado (de acordo com Pritchard, 1989), representando: (a) distribuição longitudinal da salinidade; (b) Perfil de salinidade; e (c) média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água na posição indicada em (a) pela linha tracejada. Fonte: (Bérgamo, 2000). .....10
- Figura 5:** Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação num estuário verticalmente homogéneo (de acordo com Pritchard, 1989), representando: (a) distribuição longitudinal da salinidade; (b) Perfil de salinidade; e (c) média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água na posição indicada em (a) pela linha tracejada. Fonte: (Bérgamo, 2000). .....11
- Figura 6:** Localização geográfica do Estuário dos Bons Sinais. **Fonte:** Adaptado pelo autor. ....12
- Figura 7:** Batimetria do Estuário dos Bons Sinais digitalizada com MIKE21 (A barra da escala a direita representa as profundidades em metros). **Fonte:** (Ferraz, 2014). .....13
- Figura 8:** A figura ilustra: (a) Variação mensal da temperatura média do ar ( $T_{ar}$ ); (b) variação média mensal da evaporação; (c) variação média mensal da precipitação e (d) variação mensal do aporte pluvial médio no EBS. ....19
- Figura 9:** Variação sazonal da estimativa da: (a) descarga de água doce ( $Q$ ) e (b) descarga total de água doce ( $Q_f$ ) no EBS devido ao aporte fluvial da bacia de drenagem e a entrada/saída de água doce através da superfície livre do canal estuarino. ....20
- Figura 10:** Componentes do transporte advectivo do sal calculados durante um ciclo completo de maré para EBS, em julho de 2011, durante a condição de sizígia. Os números no eixo das abcissas representam a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré. ....22

<b>Figura 11:</b> Isopletas da (a) temperatura, (b) salinidade, (c) densidade em função da profundidade e tempo de observação em hora. ....	23
<b>Figura 12:</b> Ilustração das isopletas das componentes de velocidade: (a) componente longitudinal da velocidade, u e (b) componente transversal da velocidade, v. ....	24
<b>Figura 13:</b> Distribuição longitudinal da temperatura durante todo período de amostragem na condição da maré de sizígia. ....	25
<b>Figura 14:</b> Distribuição longitudinal da salinidade durante todo período de amostragem na condição da maré de sizígia. ....	25
<b>Figura 15:</b> Variação vertical da salinidade na coluna de água durante o período de amostragem ...	26
<b>Figura 16:</b> Variação vertical da componente longitudinal da velocidade na coluna de água durante o período de amostragem. ....	26
<b>Figura 17:</b> A linha tracejada indica a transição entre a estratificação e mistura em condição de movimento uniforme e linha contínua indica o número adimensional de Richardson na condição da maré de sizígia para o EBS. ....	27
<b>Figura 18:</b> Diagrama de estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1966) para o EBS na condição da maré de sizígia, onde o eixo das ordenadas indica o parâmetro de estratificação e o eixo das abcissas indica o parâmetro de circulação. O ponto azul, indica o parâmetro adimensional v. ...	28
<b>Figura 19:</b> Componentes do transporte advectivo do sal calculados durante um ciclo completo de maré para EBS, em julho de 2011, durante a condição de quadratura. Os números no eixo das abcissas representam a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré. ....	30
<b>Figura 20:</b> Isopletas da (a) temperatura, (b) salinidade, (c) densidade em função da profundidade e tempo de observação em hora. ....	31
<b>Figura 21:</b> Ilustração das isopletas das componentes de velocidade: (a) componente longitudinal da velocidade, u e (b) componente transversal da velocidade, v. ....	32
<b>Figura 22:</b> Distribuição longitudinal da temperatura durante todo período de amostragem na condição da maré de quadratura. ....	33
<b>Figura 23:</b> Distribuição longitudinal da salinidade durante todo período de amostragem na condição da maré de quadratura. ....	33

<b>Figura 24:</b> Variação vertical da salinidade na coluna de água durante o período de amostragem ...	34
<b>Figura 25:</b> Variação vertical da componente longitudinal da velocidade na coluna de água durante o período de amostragem. ....	34
<b>Figura 26:</b> A linha tracejada indica a transição entre a estratificação e mistura em condição de movimento uniforme e linha contínua indica o número adimensional de Richardson na condição da maré de quadratura para o EBS.....	35
<b>Figura 27:</b> Diagrama de estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1966) para o EBS na condição da maré de quadratura, onde o eixo das ordenadas indica o parâmetro de estratificação e o eixo das abcissas indica o parâmetro de circulação. O ponto azul, indica o parâmetro adimensional $v$ . ....	36
<b>Figura 28:</b> Caudais médios mensais do rio Licuar entre 1967-1981.....	48
<b>Figura 29:</b> Variação da maré no estuário de Bons Sinais durante o período de amostragem, de 17 a 29 de julho de 2011, de acordo com dados da altura da maré extraídos na plataforma do instituto hidrográfico. ....	48
<b>Figura 30:</b> Precipitação diário do mês de julho de 2011 em mm/dia, com base nos dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) Quelimane. ....	49

## Lista de Tabelas

- Tabela 1:** Componentes do transporte do sal devido a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré na condição de sizígia. ....21
- Tabela 2:** Componentes do transporte do sal devido a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré na condição de quadratura.....29
- Tabela 3:** Variação sazonal da temperatura, evaporação, precipitação, evapo-transpiração estimada, razão do escoamento superficial, Escoamento superficial e variação sazonal do aporte pluvial médio no EBS.....48
- Tabela 4:** Proporção média diária (p) de horas de luz na latitude 17° S .....49

## Índice

CAPÍTULO I: Introdução .....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2. Justificativa .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Geral: .....	3
1.3.2. Específicos: .....	3
CAPÍTULO II: Revisão da Literatura .....	4
2.1. Estuário .....	4
2.1.1. Classificação de Estuário .....	5
CAPÍTULO III: Metodologia .....	12
3.1. Caracterização da Área de Estudo .....	12
3.2. Características físicas e hidrodinâmicas do estuário .....	13
3.2.1. Levantamento de dados hidrológicos .....	13
3.2.2. Campanha de coleta de dados .....	14
3.2.3. Análise de Mecanismos do Transporte de Sal .....	15
3.2.4. Índices estuarinos .....	16
CAPÍTULO IV: Resultados .....	19
4.1. Estimativa da Descarga Fluvial .....	19
4.2. Campanha da Maré de Sizígia .....	21
4.2.1. Análise de Mecanismos do Transporte de Sal .....	21
4.2.2. Parâmetros hidrográficos .....	22
4.2.3. Componente longitudinal e transversal da velocidade .....	24
4.2.4. Distribuição longitudinal da temperatura e salinidade .....	24
4.2.5. Perfis médio temporal da salinidade e componente longitudinal da velocidade .....	25
4.2.6. Índices Estuarinos .....	27
4.3. Campanha da Maré de Quadratura .....	28
4.3.1. Análise de Mecanismos do Transporte de Sal .....	28
4.3.2. Parâmetros hidrográficos .....	30
4.3.3. Componente longitudinal e transversal da velocidade .....	31
4.3.4. Distribuição longitudinal da temperatura e salinidade .....	32
4.3.5. Perfis médio temporal da salinidade e componente longitudinal da velocidade .....	33
4.3.6. Índices Estuarinos .....	35
CAPÍTULO V: Análise e Discussão de Resultados .....	37
5.1. Descarga fluvial .....	37
5.2. Parâmetro hidrológico e componentes da velocidade .....	38
5.3. Transporte do sal .....	39
5.4. Índices Estuarinos .....	40

CAPÍTULO VI: Conclusão e Recomendações .....	43
6.1. Conclusão .....	43
6.2. Recomendações .....	44
Referências Bibliográficas .....	45
Anexos.....	48

## **CAPÍTULO I: Introdução**

### **1.1.Introdução**

O estuário dos Bons Sinais está ligado à economia da região através dos setores primário e secundário, e considerado de extrema importância na produtividade primária, devido às elevadas concentrações de nutrientes, além de constituírem o habitat natural dos peixes, sendo ambientes de desova de muitas espécies de peixes de valor comercial, pelo que o estudo das suas características hidrodinâmicas é de extrema importância.

As características hidrodinâmicas dos estuários podem proporcionar condições ideais de elevada produtividade e torná-las verdadeiros viveiros de várias espécies marinhas e costeiras, o que é atrativo para o desenvolvimento de atividades socioeconômicas como a pesca, a aquicultura e muitas outras que podem ser inadequadamente realizadas, comprometendo estas importantes características estuarinas (Rosman, 2010). Considerados biologicamente mais produtivos devido à sua elevada concentração de nutrientes, estes ambientes transitórios proporcionam condições muito boas para a produção primária.

Dyer (1973) e Officer (1976) definiram os seguintes tipos de estuários: *altamente estratificados ou cunha salina, parcialmente misturados e, bem misturados ou homogêneos*. Como são ambientes dinâmicos, principalmente considerando-se uma escala de observação de horas, dias a meses os estuários transitam entre os diferentes tipos classificatórios.

De forma que, as interações que ocorrem no interior de um estuário, considerando a presença da água doce e salgada, sob a influência das condicionantes hidrodinâmicas, trarão para cada estuário um diferente grau de mistura e características de transporte, retenção e distribuição de propriedades (salinidade, material particulado em suspensão, nutrientes, etc.). Estes ecossistemas dinâmicos têm uma das maiores diversidades do mundo (Hobbie, 2000; Bianchi, 2007) e podem ser vistos sob diferentes escalas de tempo conforme os processos focados.

Sob o ponto de vista dinâmico, numa escala de segundos a anos, os estuários podem ser caracterizados pela mistura entre as águas doce, de origem fluvial, e salgada, de origem marinha; pela circulação gravitacional causada pela diferença de densidade dessas águas; pela influência de forçantes como a descarga fluvial, ondas e marés e pelo suprimento de sedimentos.

Segundo Kjerfve (1988), a descarga fluvial, as correntes de maré, o cisalhamento do vento e a geometria do estuário constituem os principais fatores que definem os processos de mistura, circulação e estratificação em um estuário. A descarga fluvial e as correntes de maré também são determinantes na categorização de tipos de estuários que ocorrem ao longo da zona costeira.

Além de atuar na geração de turbulência e de correntes superficiais na interface ar-água, o estresse do vento também possui um importante papel na geração de marés meteorológicas durante a passagem de frentes frias, que podem causar uma elevação no nível da água na região costeira as quais podem propagar-se estuário a dentro, influenciando na dinâmica estuarina (Pugh, 2004).

Conforme a importância de cada variável envolvida nos processos físicos, um estuário irá se ajustar hidrodinamicamente à dominância de determinada variável sendo que, em longo prazo, percebe-se a predominância de certa condição. Por exemplo: no caso de estuários que têm seu processo de mistura determinado pela ação das marés na maior parte do tempo, apresentam haloclinas mais verticais características de estuários bem misturados, eles são considerados estuários dominados pela maré.

Os estuários dominados por rio são aqueles em que a descarga fluvial é a variável dominante nos processos de mistura na maior parte do tempo. A distribuição de sal é marcada por haloclinas mais horizontais, onde se evidencia uma forte estratificação.

## **1.2. Justificativa**

O estuário do Bons Sinais é muito importante para gestão portuária da cidade de Quelimane, sendo este o mais importante no que concerne a economia e desenvolvimento económico da cidade de Quelimane e do país em geral. As características hidrodinâmicas dos estuários podem proporcionar condições ideais de elevada produtividade e torná-las verdadeiros viveiros de várias espécies marinhas e costeiras, o que é atrativo para o desenvolvimento de atividades socioeconómicas como a pesca, a aquicultura e muitas outras que podem ser inadequadamente realizadas, comprometendo estas importantes características estuarinas (Rosman, 2010).

Além de constituir o habitat natural de aves, mamíferos, peixes e ambientes de desova de muitas espécies de peixes de valor comercial e rota de aves migratórias, o estuário do Bons Sinais é composto por um porto de pesca e de carga, que contribuem para o desenvolvimento económico da cidade de Quelimane e do país em geral.

O transporte de sal em estuários é importante para a compreensão da dinâmica do estuário e seus ecossistemas, pois, o sal é um dos principais componentes que influenciam a hidrodinâmica do estuário e sua distribuição é afetada por vários fatores, como a descarga fluvial, a circulação gravitacional, as ondas e as marés. O transporte de sal no estuário é influenciado pela hidrodinâmica do estuário, que é controlada por esses fatores. A presença de uma cunha salina bem definida é um dos principais indicadores da hidrodinâmica do estuário. Além disso, o transporte de sal no estuário é importante para a compreensão da distribuição de nutrientes e sedimentos no estuário, que afetam a vida marinha e a qualidade da água.

Contudo, a qualidade ambiental de um estuário está diretamente relacionada com as características hidrodinâmicas presentes, ou seja, com a capacidade de renovação de suas águas no sistema estuarino (Franklin-Silva & Schettini, 2003). Portanto, o estuário dos Bons Sinais está vinculado à economia da região através dos sectores primários e secundários, por esse motivo o estudo de suas características hidrodinâmicas é de suma importância.

### **1.3.Objetivos**

#### **1.3.1. Geral:**

Este trabalho tem como objetivo geral, estudar a Hidrodinâmica e Mecanismos do Transporte de Sal no Estuário dos Bons Sinais.

#### **1.3.2. Específicos:**

- Caracterizar as principais forçantes físicas que controlam a hidrodinâmica do estuário;
- Analisar os mecanismos do transporte de sal em diferentes condições de maré e vazão fluvial;
- Determinar os índices estuarinos para o Estuário dos Bons Sinais;

## **CAPÍTULO II: Revisão da Literatura**

### **2.1. Estuário**

Do ponto de vista imediato, o estuário pode ser definido de várias maneiras. Portanto, essas definições devem de alguma forma abranger as características e processos essenciais, bem como o contexto no qual o estuário está inserido, permitindo a aplicação de critérios adequados à classificação. O ecossistema estuarino é extremamente sensível e contém habitats muito importantes para a biodiversidade, a produção de biomassa e a preservação de inúmeras espécies oceânicas e terrestres (Delgado, 2011).

Segundo Miranda, Castro e Kjerfve (2002), uma das definições geralmente usada na área de Oceanografia Física é a clássica definição de Pritchard (1955) e Cameron (1963) pois esses dois autores afirmam que: *“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”*.

Na perspectiva de Hogue, Gammelsrød, Mazzilli, António e Silva (2020), os estuários são ambientes ecológicos e dinâmicos (D'Aquino, Silva, Couceiro, & Pereira, 2011), fundamentais que conectam os ecossistemas terrestres, marinhos e fornecem habitats de berçário críticos para a pesca comercial estuarina e costeira.

Os processos estuarinos são complexos e uma análise simples reprova ao tentar explicar processos de forma isolada (Miguel, Nehama, & Castro, 2017). A hidrodinâmica de um estuário, compreendendo marés, correntes de maré e circulação estuarina, desempenha um papel importante na formação e manutenção dos ecossistemas dentro do estuário e nas águas costeiras adjacentes (Hogue, *et al.*, 2020).

Segundo Pereira, Siegle, Miranda e Schettini (2010), os ambientes estuarinos são considerados de extrema importância na produtividade primária, devido as altas concentrações de nutrientes, além de constituírem o habitat natural de aves, mamíferos e peixes, são ambientes de desova de muitas espécies de peixes de valor comercial e rota de aves migratórias.

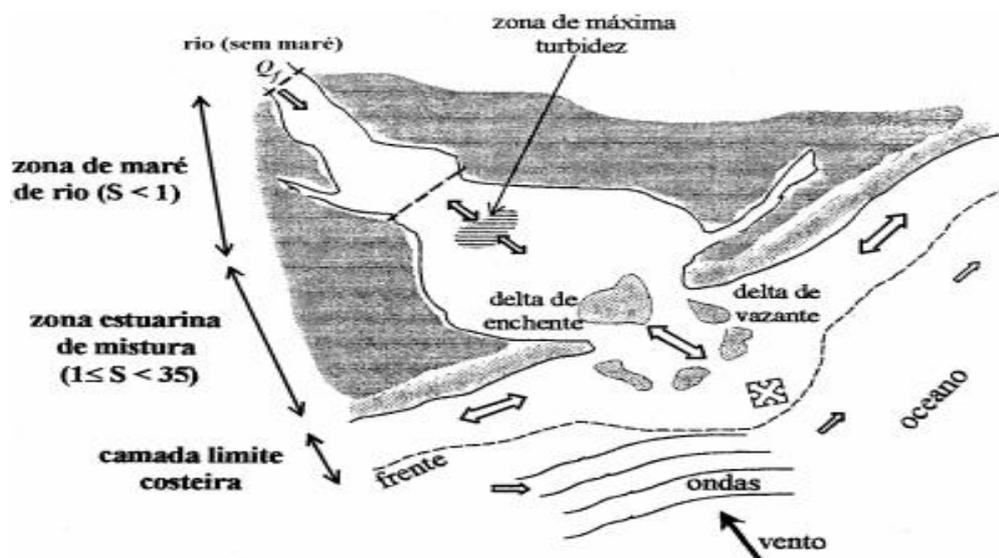
Devido a crescente expansão populacional das cidades litorâneas, estes ambientes também apresentam uma importância econômica significativa, pois são utilizados como vias de acesso para o interior do continente, para as atividades portuárias, instalação de indústria pesqueira, extração de areia pesada e dentre outros (Pereira, *et al.*, 2010).

Os estuários além de serem regiões de transição entre ambiente terrestre e marinho, são as principais vias de transporte dos produtos da origem terrígenos dos continentes em direção as águas costeiras. Apesar do conhecimento da sua importância ecologia assim como econômica, os estuários moçambicanos têm sido pouco estudados.

Assim, com base nas características de cada estuário, algumas variáveis como, a excursão das marés, extensão do transporte, distribuição de poluentes, extensão, taxa de renovação e mistura das massas de água tornam-se relativamente mais importantes que as outras. Portanto, os estuários desempenham um papel importantíssimo no que concerne a exportação e/ou importação de propriedades (físicas, químicas e biológicas) ou de substâncias como salinidade e material particulado em suspensão.

Um ambiente simples como canal estuarino (vale de um rio inundado pela maré), as zonas de maré do rio (ZR), as zonas de mistura (ZM) e zona costeira (ZC) estão esquematicamente mostradas na figura 1.

Segundo Souza (2015), 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. Ainda o autor afirma que 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:** Diagrama esquemático das zonas ZR, ZM e ZC de um sistema estuarino hipotético, onde: S equivale à salinidade e  $Q_f$  à descarga de água doce. **Fonte:** (Kjerfve B., 1990).

### 2.1.1. Classificação de Estuário

As variedades de condições topográficas, hidrológicas e climatológicas dos estuários é tão diversificada, apresentando situações muitas vezes conflitantes, que de alguma forma impossibilitam

generalizações oceanográficas (Miranda, *et al.*, 2002). O estuário pode ser dividido em três (3) principais zonas: a) zona de maré do rio (ZR), b) zona de mistura (ZM) e c) zona costeira (ZC) como é mostrado esquematicamente na (figura1). Dependendo das características do sistema, essas zonas podem ou não estar presente e existir em diferentes proporções, sendo seus limites geográficos dinâmicos, variando assim com escala de ciclos de marés a tempo geológicos.

Devido a sua diversidade de formas e tamanhos desses sistemas, a sua forma de descrever e classificar, os ambientes estuarinos constituem uma atividade complexa. Contudo, os ambientes estuarinos têm sido classificados levando em consideração diversos aspectos, tais como: características geomorfológicas, distribuição das massas de águas, regime da salinidade, altura da maré, estrutura salina, grau de estratificação e de mistura.

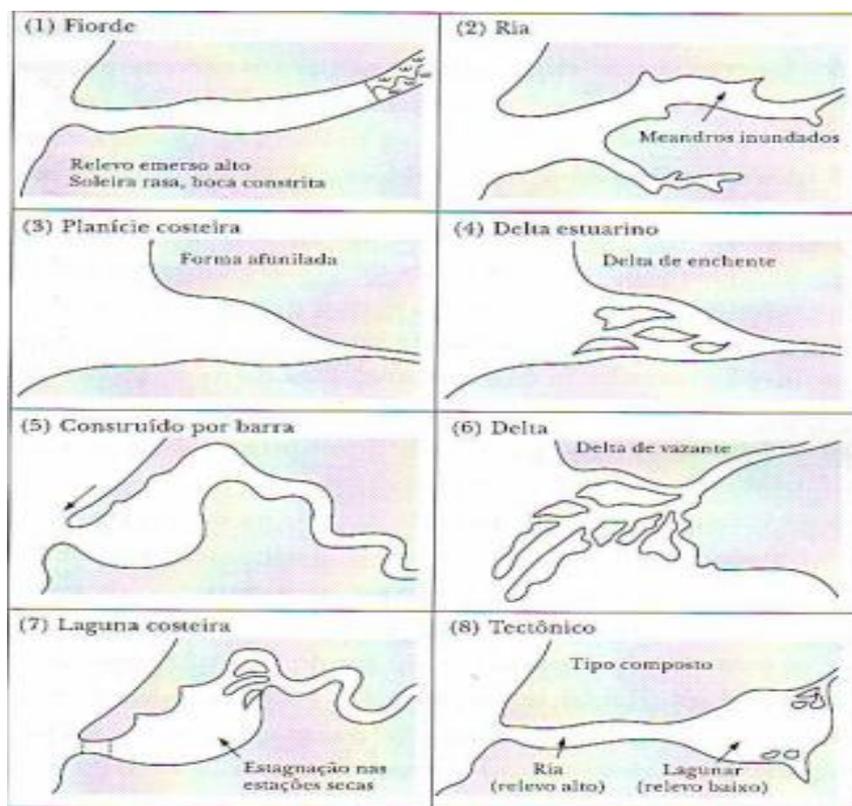
Quanto as características geomorfológicas, diversos autores como (Pritchard, 1952; Dyer, 1973; Kennet, 1982; Kjerfve B., 1989; Lins, 2002; Souza, 2015) afirmam que os estuários podem ser divididos em: estuários de planície costeira; fiorde; estuários construídos por barreiras; e estuários restantes.

a) **Estuário de planície costeira:** é um tipo de estuário mais comum encontrado em costas com ampla planície litorânea e tem sua formação associada à inundação de um vale fluvial, esse tipo de estuário é também denominado como estuário clássico. Apesar de sua área ser predominantemente inframaré, estes estuários formam feições, com vales em "V" e largas áreas de inundação. A calha central do vale torna-se mais larga e profunda em direção à embocadura, mas raramente ultrapassa os 20 m de profundidade.

b) **Fiorde:** Os fiordes são típicos de regiões de altas latitudes, comuns no Alasca e na Noruega. Esses tipos de estuários foram formados durante o período geológico de Pleistoceno, em regiões que estavam cobertas por calotas de gelo, em decorrência da escavação glacial na planície costeira ou na plataforma continental adjacente. Assim, foram formados vales de rios consequentes da pressão das calotas de gelo e efeitos erosivos causados por escavação das geleiras e pelo degelo destes blocos, o que aprofundou ainda mais esses vales de rios primitivos, tornando assim estuários de alta profundidade que podem chegar até 800 m (Silva, 2011). Apresentam fundo rochoso de sedimentação recente, e possuem pequena descarga fluvial.

c) **Estuário construído por barreiras:** estes estuários são distinguidos pela presença de uma barreira arenosa formada por processos de deposição costeira restringindo as embocaduras do estuário. Geralmente são mais rasos que os anteriores, e devido à restrição ao fluxo de maré imposta pela barreira arenosa, a ação das correntes e ondas é restrita à embocadura e sofre mudanças sazonais de posição e morfologia devido à variação da vazão fluvial, intensidade e frequência de tempestades.

d) Os estuários não abrangidos anteriormente são normalmente incluídos na categoria de estuários restantes e geralmente são sistemas estuarinos formados por outros processos costeiros, como: falhas tectônicas, atividade vulcânica, tremores e deslizamentos de terra, bem como deltas estuarinos ou deltas de enchente (Ferreira, 2013). Segundo Miranda, *et al.* (2002), nesta categoria inclui-se também os estuários cuja morfologia foi muito alterada por processos de sedimentação recente nos últimos milênios, destaca-se aos *estuários deltaicos<sup>1</sup> e rias<sup>2</sup>*.



**Figura 2:** Tipos fisiográficos de estuários (Fairbridge, 1980, retirado de Miranda *et al.*, 2002)

Independentemente da classificação geomorfológica, cada estuário apresenta diferentes padrões de circulação, estratificação da salinidade e processos de mistura. O esquema de classificação de acordo com a salinidade permite agrupar os estuários em diferentes tipos onde estabelece qualitativamente as principais características da zona de mistura (Delgado, 2011). Miranda, *et al.* (2002) afirma que a transição entre os diversos tipos depende da descarga do rio, da amplitude da maré, do componente baroclínico de velocidade e de características geométricas como a razão largura/profundidade.

<sup>1</sup> **Estuários deltaicos:** são estuários formados nas regiões de macro ou Hipermaré, devido a ação moderada de ondas e transporte fluvial de alta concentração de sedimentos em suspensão, cujo o processo recente forneceu o crescimento de ilhas na parte interior do estuário (Miranda *et al.*, 2002).

<sup>2</sup> **Rias:** são tipos de estuários de origem tectônicas, formados por elevação da parte continental onde estava o vale do rio, avaliados do peso de glaciares durante o descongelamento (Miranda *et al.*, 2002).

Segundo Miranda, *et al.* (2002), a classificação de estuário de acordo com a estratificação da salinidade 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 (Souza, 2015). Segundo Miranda, *et al.* (2014) citado pelo mesmo autor, afirma que 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.

Assim, na perspectiva de (Pritchard, 1952; Bowden, 1967; Dyer, 1973; Kennet, 1982; Miranda, *et al.*, 2002), de acordo com a estratificação da salinidade os estuários classificam-se em: Altamente estratificados (cunha salina), moderadamente estratificados (parcialmente misturados) e verticalmente homogêneos (bem misturados).

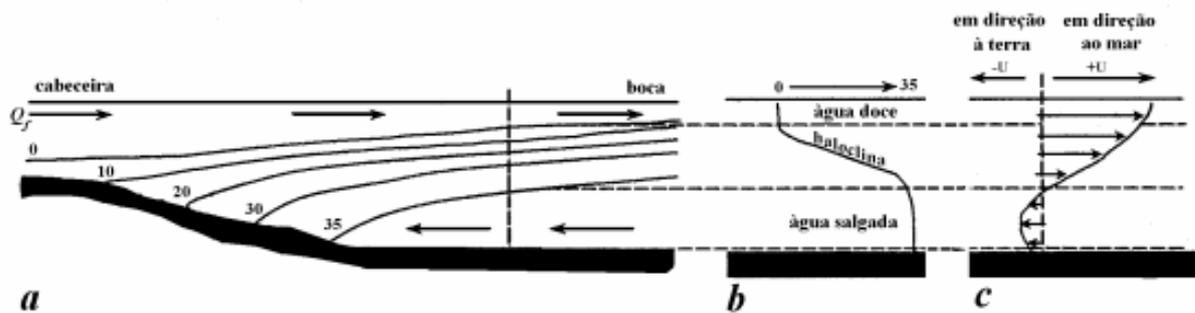
a) **Altamente estratificados (cunha salina):** Os estuários do tipo cunha salina são típicos de regiões de micromaré e de lugares que predominam condições de grande descarga fluvial. Portanto, são estuários denominados pela descarga fluvial e pelo processo de entranhamento, que é responsável pelo aumento de salinidade da camada superficial e a mistura por difusão turbulenta é desprezível (Miranda, *et al.*, 2002). 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).

Destarte, 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.

Importa referir que, neste tipo de estuário 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).

Na perspectiva de Miranda, *et al.* (2002), estuários tipo cunha salina sofrem um processo de mistura lento e com um crescimento gradual ao longo do estuário, com o máximo da salinidade na sua embocadura e caracterizado por uma intensa turbulência.

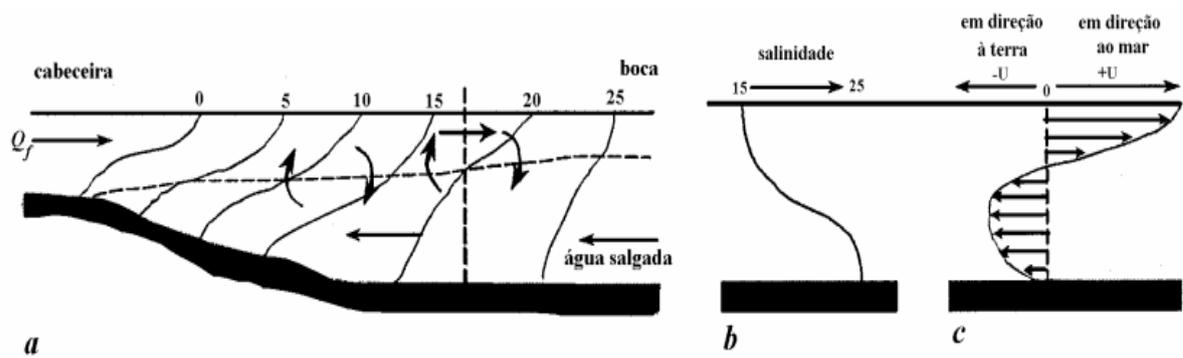


**Figura 3:** Diagrama esquemático de um estuário tipo cunha salina. As setas verticais na interface entre movimentos bidimensionais indicam o processo de entranhamento (de acordo com Pritchard 1989), representando: (a) distribuição longitudinal da salinidade; (b) Perfil de salinidade; e (c) média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água na posição indicada em (a) pela linha tracejada. Fonte: (Bérgamo, 2000).

b) **Moderadamente estratificados (parcialmente misturados):** são estuários que possuem uma camada de água mais salina que se localiza na região próxima ao fundo e possui movimento estuário acima, enquanto que a camada superficial, menos salina, possui movimento estuário abaixo, provocando um perfil vertical bidirecional, no qual é dividido em certa profundidade por uma camada de água com características salinas e de densidade intermediárias, separada por haloclina (Ferreira, 2013).

Miranda, *et al.* (2002), afirma que 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 (Ferreira, 2013).

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 (Miranda, *et al.*, 2002). 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. Por 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 (Miranda, *et al.*, 2002).



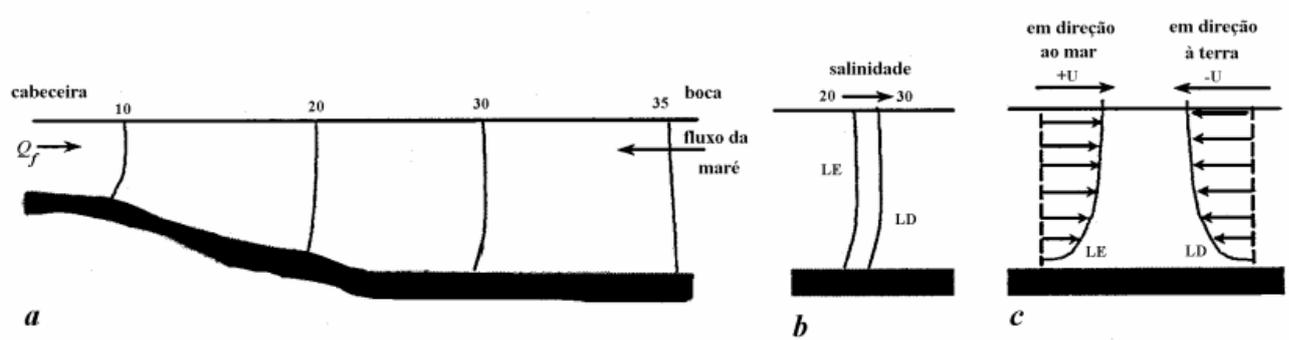
**Figura 4:** Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação num estuário tipo parcialmente misturado (de acordo com Pritchard, 1989), representando: (a) distribuição longitudinal da salinidade; (b) Perfil de salinidade; e (c) média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água na posição indicada em (a) pela linha tracejada. Fonte: (Bérgamo, 2000).

Os movimentos bidirecionais que ocorrem na coluna de água são bem menos intensos do que os movimentos oscilatórios da maré. Como os movimentos estão superpostos, os primeiros somente podem ser obtidos por meio de médias temporais durante intervalos de um ou mais ciclos completos de maré. Na perspectiva de Miranda, *et al.* (2002), devido ao aumento da energia potencial da coluna de água estuário abaixo, as superfícies isobáricas inclinam-se de forma ascendente na camada superficial, e de forma oposta nas camadas do fundo, em resposta as forçantes da circulação estuarina. Os movimentos também poderão sofrer influência da força de Coriolis, principalmente nos sistemas bastante largos e regiões onde o comportamento da maré é diurno.

**c) Verticalmente homogêneos (bem misturados):** Geralmente, estes tipos de estuário são formados em canais rasos e estreitos, forçados por descarga fluvial pequena, apresentando deste modo, perfil vertical praticamente uniforme e fluxos unidirecionais com a profundidade (Freitas, 2013). Assim, o cisalhamento das correntes no fundo produzirá turbulência, se este sistema estiver localizado numa região com altura de maré moderada ou grande, por consequência disso, o fluxo para o interior será suficientemente intenso para a completa erosão da haloclina (Souza, 2015).

Segundo Miranda *et al.* (2002), os estuários com variação lateral apresentam uma grande razão entre a largura e profundidade, além da Força de Coriolis exercer papel fundamental na estratificação, aumentando salinidade na margem esquerda do estuário e concentrando água doce do lado direito, no hemisfério norte. Portanto, o processo de penetração da salinidade para o interior do estuário é conseguido inteiramente por difusão turbulenta (Delgado, 2011).

Na perspectiva de Miranda *et al.* (2002), o estuário sem estratificação lateral apresenta canais estreitos, o que promove cisalhamento lateral e condições homogêneas. Como a intensidade da forçante baroclínica é obtida por integração na coluna de água, estuários verticalmente homogêneos relativamente profundos, poderão exibir fraca circulação gravitacional.



**Figura 5:** Distribuição longitudinal da salinidade e da circulação num estuário verticalmente homogêneo (de acordo com Pritchard, 1989), representando: (a) distribuição longitudinal da salinidade; (b) Perfil de salinidade; e (c) média temporal da velocidade longitudinal ao longo da coluna de água na posição indicada em (a) pela linha tracejada. Fonte: (Bérgamo, 2000).

Nas condições lateralmente homogêneas, a salinidade aumenta gradativamente estuário abaixo e o movimento médio está orientado nessa direção em todas as profundidades. Embora esse movimento tenha tendência de transportar sal para fora do estuário, o balanço é atingido pelo transporte estuarino acima por difusão turbulenta (dispersão da maré), associada a irregularidades topográficas e atrito do fundo (Miranda *et al.*, 2002).

## CAPÍTULO III: Metodologia

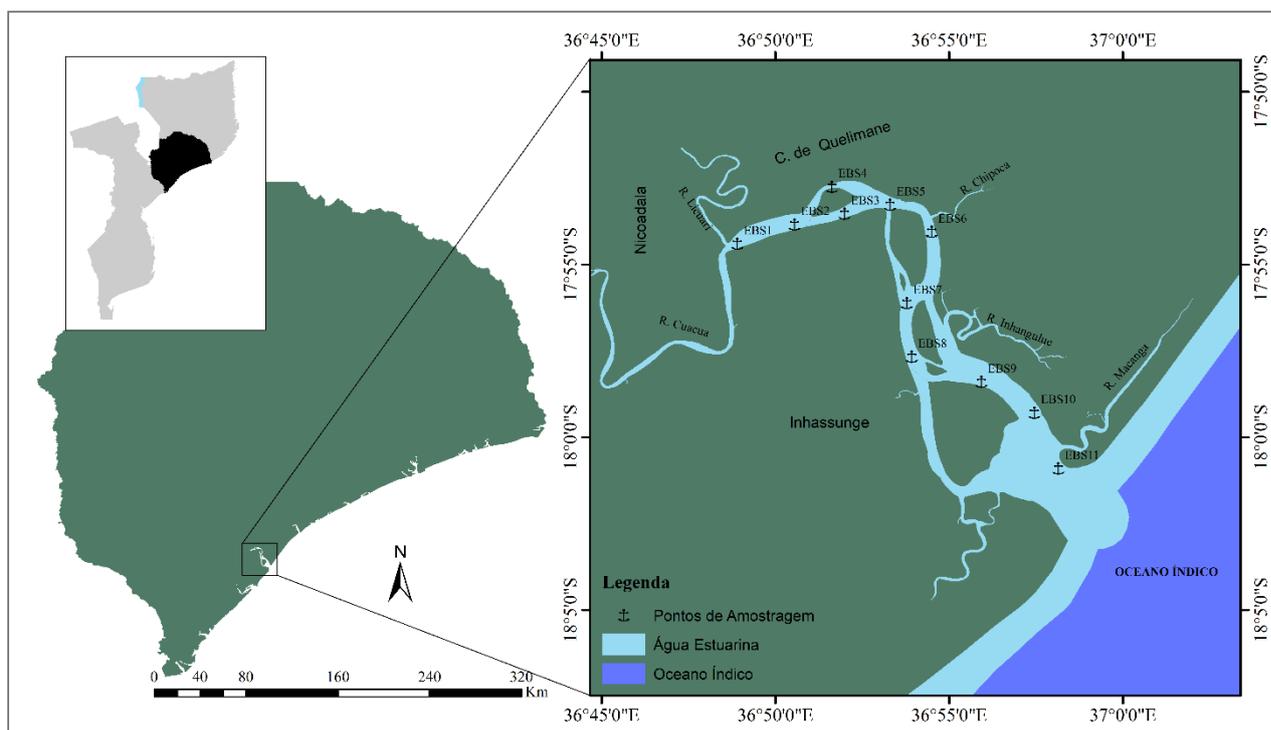
### 3.1. Caracterização da Área de Estudo

O Estuário dos Bons Sinais, possui um clima tropical húmido com uma estação chuvosa entre novembro – abril, a temperatura mais elevada é observada em junho e fevereiro (28° C) e a baixa ocorre em julho (21° C), (www.mozpescas.gov.mz). Este estuário possui uma área cerca de 60 km<sup>2</sup> e está sujeito a um grande *stress* ambiental.

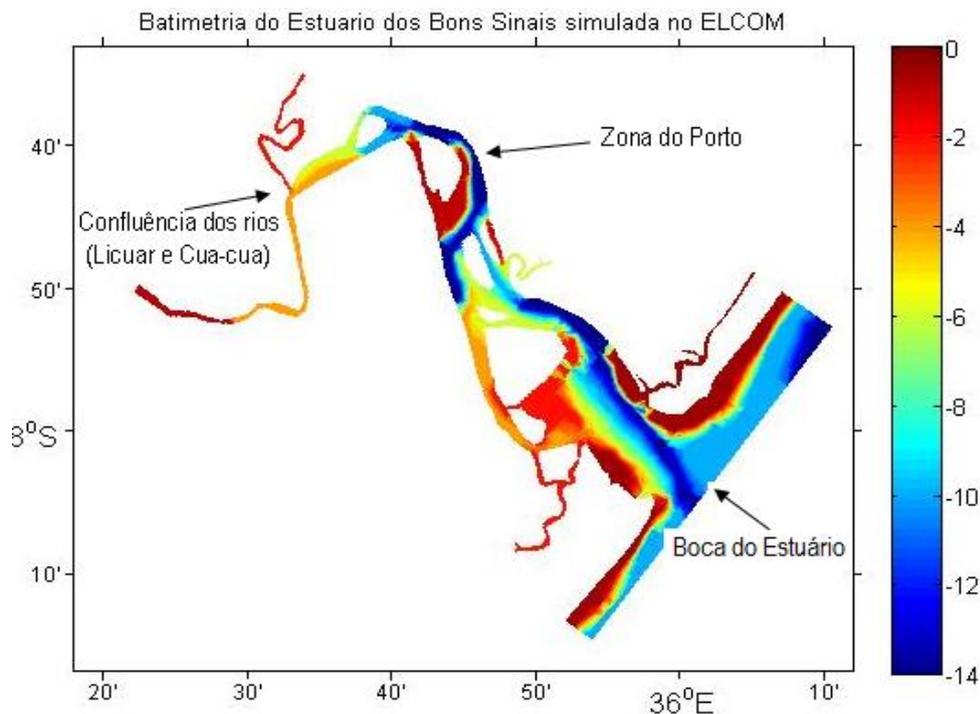
O estuário situa-se numa região tropical entre distrito de Inhassunge e Quelimane, é limitado pela confluência dos rios Cua-Cua e Licuar a 17° 54' S e 36° 49' E, e é conectado ao Oceano indico a 18° 01' S e 36° 58' E (vide figura6). Segundo Magestade (2021), o EBS apresenta uma profundidade considerável, sendo profundidade média cerca de 14 m, um comprimento de 30 km e largura média de 2 km, compreendendo uma área de 60 km<sup>2</sup>.

A circulação no estuário é controlada principalmente por descargas fluviais, correntes de maré, stress dos ventos e geometria, a faixa das marés varia entre 0,2 e 1,8 m e, com a distorção a aumentar para a região da Confluência. Os ventos são predominantemente SE e variam entre 0,1 e 1,8 m/s, a salinidade e a temperatura da água são de 30 e 25, respetivamente.

A descarga do rio é irregular, durante o período chuvoso pode exceder 120 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de estiagem pode ser verificada uma descarga menor do que 0.02 m<sup>3</sup>/s (Roest, 2008). O caudal médio mensal varia de um mínimo e máximo cerca de 0.12 a 42.82 m<sup>3</sup>/s correspondentes aos meses de outubro a fevereiro, respetivamente.



**Figura 6:** Localização geográfica do Estuário dos Bons Sinais. **Fonte:** Adaptado pelo autor.



**Figura 7:** Batimetria do Estuário dos Bons Sinais digitalizada com MIKE21 (A barra da escala a direita representa as profundidades em metros). **Fonte:** (Ferraz, 2014).

### 3.2. Características físicas e hidrodinâmicas do estuário

#### 3.2.1. Levantamento de dados hidrológicos

Devido à inexistência do monitoramento rotineiro dos rios que compõem a bacia de drenagem, responsável por aporte de água doce no Estuário dos Bons Sinais, foi necessária uma estimativa da descarga fluvial no EBS através de cálculos com equações semi-empíricas que têm como variáveis precipitação e temperatura do ar.

Para o cálculo indireto do valor médio da descarga total de água doce ( $Q_f$ ) foi usado um método empregue por vários autores como Kjerfve, *et al.* (1997) na Baía de Guanabara, Bonetti Filho e Miranda (1997) no Sistema Estuarino-Lagunar de Cananeia-Iguape e por Medeiros e Kjerfve (1993). Este método baseia-se na estimativa de escoamento superficial a partir da equação semi-empírica, introduzida pelo hidrologista P. Schreiber em 1904.

O escoamento superficial ( $\Delta f$ ) é a parcela da precipitação ( $P$ ) que fornece água doce para o sistema estuarino. O restante sofre evaporação, infiltra-se no solo ou participa no metabolismo das plantas, retornando uma parte para a atmosfera através das folhas pelo processo de transpiração. Dessa forma, evaporação e transpiração são combinadas em único processo, evapo-transpiração potencial ( $E_0$ ).

Na perspectiva de (Bérgamo, 2000), a razão do escoamento superficial ( $\frac{\Delta f}{P}$ ) de uma bacia de drenagem depende da própria precipitação e da evapo-transpiração. Por sua vez, a evapo-transpiração depende da intensidade da radiação solar e, em consequência, da temperatura do ar.

$$\frac{\Delta f}{P} = e^{-\frac{E_0}{P}}, \quad (1)$$

onde:  $E_0 = (0.457T + 8.13) \cdot p \cdot 24$  (2)

Com  $T_{(ar)}$  em °C e  $P$  em mm/mês.  $E_0$  é dada em mm/mês e  $p$  representa a porção média diária de horas para diferentes latitudes vide tabela2 em anexo. O valor da  $E_0$  somente é significativo quando são utilizados dados médios de temperatura de longo período de tempo (Kjerfve B. , 1990).

Determinada a razão do escoamento superficial e com o conhecimento prévio da área total da bacia de drenagem ( $A_T$ ), a descarga de água doce ( $Q$ ) foi calculada para o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), representativo para o cálculo dos valores médios da evapo-transpiração e precipitação, a partir da equação:

$$Q = \Delta f * A_T \quad (3)$$

Onde:  $\Delta f$  é o escoamento superficial (m/s) e  $A_T$  área total de drenagem (m<sup>2</sup>).

O aporte médio pluvial do EBS, que representa a entrada/saída de água doce pela superfície livre  $A$ , devido aos processos de precipitação e evaporação (P-E), foi determinada utilizando a equação:

$$Q_d = A(P - E) \quad (4)$$

Onde:  $A$  é a área da superfície livre (m<sup>2</sup>),  $(P-E)$  a taxa resultante da diferença entre a precipitação e evaporação (m/s). E, portanto, a descarga total de água no sistema estuarino foi calculada a partir da equação:

$$Q_f = Q + Q_d \quad (5)$$

Onde:  $Q_f$  é a descarga total de água doce no sistema estuarino em (m<sup>3</sup>/s),  $Q$  é a descarga de água doce e  $Q_d$  é o aporte médio pluvial que representa a entrada/saída de água doce no sistema pela superfície livre  $A$ .

### 3.2.2. Campanha de coleta de dados

Dados hidro-oceanográficos usados nesse trabalho, foram adquiridos na base de dados da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras. Onde, a campanha de aquisição desses dados foi realizada nos dias 17 a 29 de julho de 2011 sob condições de maré viva e em duas condições diferentes de marés (sizígia e quadratura), durante um período de aproximadamente 14 dias. A intensidade e direção de correntes foram obtidas através de Correntômetro, com frequência de trabalho de “1 MHz”.

A salinidade, temperatura e profundidade foram obtidas através de um CTD Valeport, medidos em onze estações fixas, distribuídas longitudinalmente ao longo do estuário do Bons Sinais (vide figura 6). Para o pré-processamento e processamento de dados, foi usado o software *Microsoft Excel 2021*, instalado numa janela *Window 11*.

Os dados do CTD foram usados para determinar os perfis longitudinais de temperatura e salinidade usando o software *Ocean Data View*. Usou-se o software *surfer* versão 25.2.259, desenvolvido pelo Golden software para plotagem de isopletas da variação temporal da temperatura, salinidade, densidade, componente longitudinal e transversal da velocidade, através do método *Kriging*, este método geoestatístico leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de elementos regionalizados.

A oscilação do nível da água foi monitorada com um marégrafo de pressão marca RBR. Para obtenção da distribuição espacial e vertical de salinidade e temperatura ao longo do estuário, foi realizado um levantamento percorrendo cerca de 30 km, a partir da boca do estuário em direcção a montante. Usou-se o software *MATLAB R2013a* na determinação de gráficos referentes a variáveis hidrológicas, componentes de transporte do sal, perfil médio temporal de salinidade e velocidade longitudinal e número adimensional de Richardson.

### 3.2.3. Análise de Mecanismos do Transporte de Sal

Para analisar os mecanismos de transporte do sal foi determinado o transporte total do sal em diferentes condições de maré, através da decomposição advectiva de sal e velocidade longitudinal. Neste trabalho, seguiu-se a metodologia de Miranda *et al.* (2002), baseada em trabalhos de Bowden (1963), Dyer (1974), Fischer (1976), Hunkins (1981) e Kjerfve (1986).

A velocidade longitudinal instantânea em um dado instante (Equação 6) foi decomposta como uma componente devido à contribuição fluvial ( $u_a$ ), uma componente barotrópica ( $u_t$ ), uma componente baroclínica ( $u_s$ ) e uma componente residual  $u'$  (Miranda, Castro, & Kjerfve, 2002).

$$u(x, z, t) = u_a(x) + u_t(x, t) + u_s(x, z) + u'(x, z, t) \quad (6)$$

A componente de advecção fluvial foi obtida pela média vertical e temporal dos dados de corrente por um ou mais ciclos completos de maré ( $\bar{u}$ ), onde a média vertical é representada pelo símbolo  $\langle u \rangle$  e a média temporal é representada pela sobre barra.

A componente barotrópica representa a variação da velocidade média da coluna de água ao longo de um ou mais ciclos de maré, descontada a componente da advecção fluvial, ou  $\bar{u}(t) - \langle \bar{u} \rangle$ . A componente baroclínica representa a variação da velocidade média de cada nível de observação descontado a componente de advecção fluvial,  $\langle u(z) \rangle - \langle \bar{u} \rangle$ . O resíduo foi obtido isolando o último

termo do lado direito da Equação 6. A mesma decomposição foi aplicada para salinidade (e.g. Schettini, *et al.*, 2006).

O transporte total de sal durante um ou mais ciclos de maré foi determinado usando a equação 7.

$$T_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h \rho u S \, dz \, dt \quad (7)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água e  $S$  é a salinidade. Substituindo os parâmetros da integral  $u$  e  $S$  pela Equação 6 e sua análoga para a salinidade, resultou em 32 parcelas, das quais somente 7 possuem significância no processo do transporte total médio de sal durante um ou mais ciclos de maré. Pode assim, ser descrito por:

$$T_s = \bar{\rho}(u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \bar{u}_s S_s + h_a \langle \bar{u}' s' \rangle + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle) \quad (7.1)$$

que pode ser representada como  $T_s = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7$ . Onde o termo 1 representa o transporte gerado pela descarga fluvial e com seu valor sempre estuário abaixo, de natureza advectiva. O termo 2 representa o transporte de massa gerado pela propagação da onda de maré no estuário (deriva de Stokes), geralmente transportando sal estuário abaixo. O termo 3 é a correlação de maré dos valores médios de velocidade e salinidade na coluna de água, normalmente representa o transporte de sal estuário acima. O termo 4 é o transporte da circulação estacionária (diferença entre a corrente de gravidade pelo componente gerado pela descarga fluvial ou residual). O resultado do cisalhamento oscilatório e o movimento gerado pelo vento e flutuações turbulentas de velocidade, com escala de tempo inferior ao período de maré, está representado no termo 5. O termo 6 é a dispersão da maré. E por último, o termo 7 que corresponde a média temporal da correlação entre salinidade e a maré ponderada pela velocidade residual (Miranda *et al.*, 2002).

### 3.2.4. Índices estuarinos

Foram calculados os parâmetros de circulação e estratificação proposto por Hansen & Rattray (1966). O parâmetro de circulação relaciona a corrente residual de superfície com o fluxo médio da coluna de água  $u_s/u_f$ . O parâmetro de estratificação foi obtido pela razão entre a diferença de salinidade de fundo e superfície e a média vertical de salinidade  $(S_f - S_s)/(\bar{S})$ .

Os parâmetros de estratificação  $(S_f - S_s)/(\bar{S})$  e circulação  $u_s/u_f$  estão teoricamente relacionados com uma grandeza também não-dimensional denotada por  $v$  que, representando a fração do fluxo de sal estuarino acima gerado pela maré, permite obter a proporção relativa dos processos advectivo e de difusão turbulenta para o transporte do sal. Essa correlação é dada pela seguinte equação do segundo grau em  $v$ , deduzida do trabalho de Hansen & Rattray (1966):

$$\left(\frac{\delta S}{S}\right)^{-1} \left[ 210 + 252 \left( \frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right) \right] \nu^2 + \left[ 32 - \left(\frac{\delta S}{S}\right)^{-1} \left( 210 + 252 \left( \frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right) \right) + 76 \left( \frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right) + \frac{152}{3} \left( \frac{u_s}{u_f} - \frac{3}{2} \right)^2 \right] \nu = 0 \quad (8)$$

O parâmetro  $\nu$  pode variar entre zero e um ( $0 < \nu \leq 1$ ) indicando, de acordo com a sua definição, que o transporte de sal estuarino é gerado exclusivamente pelo processo advectivo ou por difusão turbulenta, respetivamente ou seja:

Quando  $\nu = 1$ , não existe circulação gravitacional e o transporte de sal estuário acima é realizado totalmente por difusão turbulenta, gerado pela maré;

Quando  $\nu \rightarrow 0$  a difusão turbulenta torna-se desprezível e o processo advectivo é integralmente responsável pelo transporte de sal, gerado pelos efeitos dos combinados da descarga fluvial e da circulação gravitacional.

Usou-se o parâmetro de Richardson  $Ri_L$  para análise da mistura e estratificação. Este parâmetro estabelece a comparação entre as forças estabilizadoras da estratificação e fricção vertical que produz mistura e homogeneização:

$$Ri_L = \frac{gH\Delta\rho}{\rho\bar{u}^2} \approx \frac{gH\beta\Delta S}{\bar{u}^2} \quad (9)$$

Onde  $g$  representa gravidade,  $H$  a profundidade local,  $\beta$  o coeficiente de contração salina médio,  $\Delta S(\Delta\rho)$  as diferenças entre a salinidade (densidade) de fundo e de superfície e  $\bar{u}$  a velocidade média na coluna de água integrada no tempo, sendo variável durante o período de maré (Bowden, 1978).

Segundo Miranda *et al.* (2002) vários estudos experimentais e teóricos conduzidos sobre o mecanismo de formação e instabilidades em interfaces estratificadas resultou que a transição entre o regime laminar e turbulento em condições de movimento uniforme, ocorre geralmente quando o  $Ri_L = 0.25$ . Destarte, quando  $Ri_L < 0.25$ , os efeitos friccionais prevalecem causando a mistura, enquanto  $Ri_L > 0.25$  a estratificação é estável (Dyer, 1997; Miranda *et al.*, 2002).

Utilizou-se igualmente a razão entre o prisma de maré (P), que representa o volume de água do mar que entra no estuário durante a maré enchente, e o fluxo de água doce a cada período de maré (R) (Miranda *et al.*, 2002), para análise da estratificação:

$$R = Q \times T \quad (10)$$

$$P = h \times A_S \quad (11)$$

Onde  $T$  é o período de um ciclo de maré,  $h$  é a altura da maré e  $A_S$  a área superficial do estuário. Esta razão representa a importância relativa entre as forçantes de maré e a descarga fluvial do estuário.

Segundo Dyer (1997) um estuário é classificado como altamente estratificado quando a razão de fluxo é superior a unidade.

De modo a avaliar o regime do movimento da água no canal estuarino, usou-se o número adimensional de Reynolds. Segundo Miranda, *et al.* (2002) a transição do regime de movimento laminar para turbulento no canal amplo com superfície livre, depende de uma quantidade física adimensional igual ao produto entre a velocidade média (U) e altura da onda de maré ( $H_0$ ) do fluido, dividido por coeficiente de viscosidade cinemática ( $\nu_c$ ), dada pela equação 12:

$$R_e = \frac{UH_0}{\nu_c}, \quad (12)$$

Onde, U é a velocidade média;  $H_0$  é altura da onda de maré e  $\nu_c$  é coeficiente de viscosidade cinemática molecular ( $0.89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

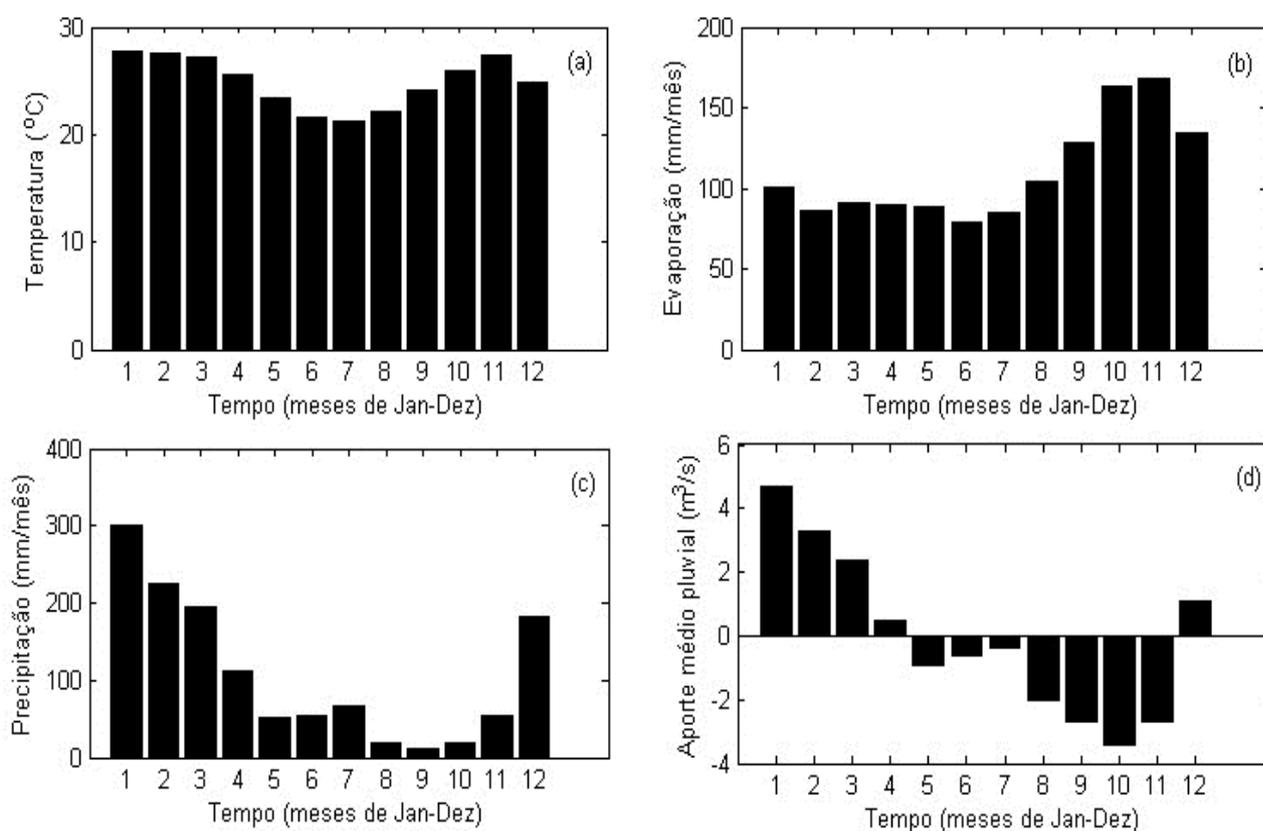
Contudo, quando o número adimensional de Reynolds for menor que  $R_e < 2 \cdot 10^3$ , o regime do movimento é laminar. Mas, quando o valor do número adimensional de Reynolds é na ordem de  $10^5$  ou maior, o movimento é totalmente turbulento e a mistura é intensificada.

## CAPÍTULO IV: Resultados

### 4.1. Estimativa da Descarga Fluvial

Devido a falta de monitoramento contínuo de medidas meteorológicas (vazão fluvial, escoamento superficial) na área de estudo (Fig.6), para a estimativa da descarga de água doce, foram utilizados valores médios mensais da temperatura do ar, evaporação e precipitação obtidos na Estação Meteorológica de Quelimane (EMQ) do Instituto Nacional da Meteorologia (INAM) no Departamento de Observação e Rede (DOR) de uma série temporal de 31 anos de 1992 a 2022.

As figuras representam as variações médias mensais da temperatura, evaporação, precipitação e aporte pluvial médio do EBS a partir da superfície livre, respetivamente.



**Figura 8:** A figura ilustra: (a) Variação mensal da temperatura média do ar ( $T_{ar}$ ); (b) variação média mensal da evaporação; (c) variação média mensal da precipitação e (d) variação mensal do aporte pluvial médio no EBS.

A temperatura média do ar (vide fig.8 (a)), apresentou valor máximo de 27.8 °C e mínimo de 21.2 °C nos meses de janeiro e julho, respetivamente; a evaporação média (vide fig.8 (b)), apresentou valor máximo de 168.4 mm/mês em novembro e mínimo de 78.6 mm/mês em junho e a precipitação média (vide fig.8 (c)), apresentou valor máximo de 301.2 mm/mês e mínimo de 10.4 mm/mês em janeiro e setembro, respetivamente.

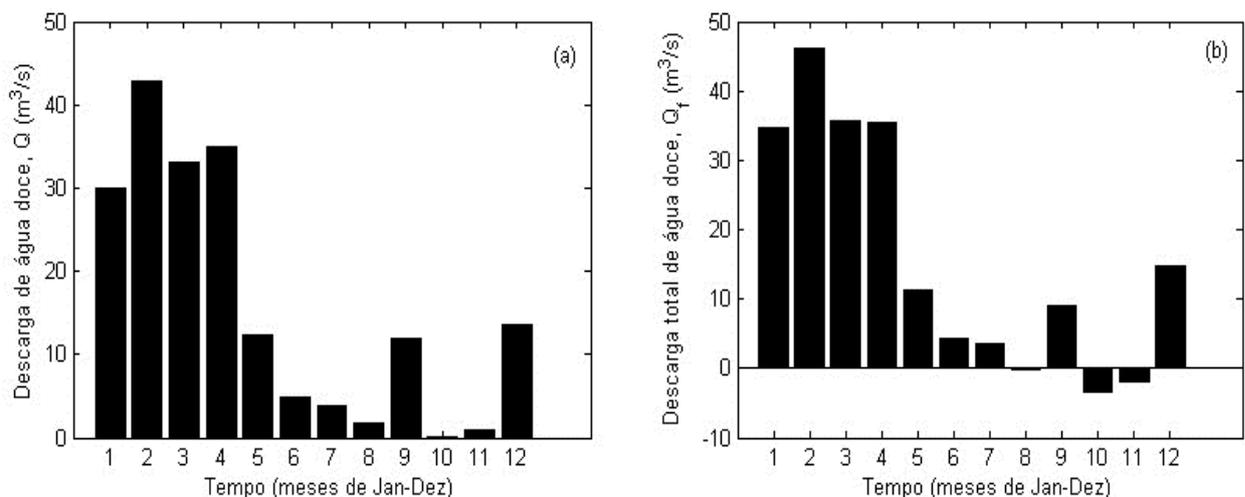
A variação média mensal do aporte médio pluvial no EBS pela superfície livre (vide fig.8 (d)) foi estimada através da equação (4), variou entre 4.7 m<sup>3</sup>/s em janeiro e -3.4 m<sup>3</sup>/s em outubro

representando máxima e mínima, respectivamente. O aporte médio pluvial que representa a entrada/saída de água doce no sistema estuarino ( $Q_d$ ) representada pelos valores positivos indicam a ocorrência da maior taxa de precipitação que a de evaporação e os valores negativos indicam a ocorrência maior taxa de evaporação que a de precipitação.

Na tabela3 em anexo constam os valores numéricos da temperatura, precipitação, evaporação, evapo-transpiração, razão do escoamento, escoamento superficial e aporte médio pluvial sobre a superfície livre do canal estuarino. Esses foram obtidos a partir da série temporal de 1992 a 2022 para a região do EBS. Importa referir que, os dados da tabela3 supracitada foram utilizados para a determinação da descarga fluvial através do método de Schreiber vide equação (1) e (3).

Com base na equação (2) e nas médias mensais da temperatura, foi estimada a evapo-transpiração potencial, apresentando a máxima de 144.9 mm/mês e mínima 108.1 mm/mês correspondente aos meses de janeiro e junho, respectivamente. Resolvendo a equação (1) para escoamento superficial ( $\Delta f$ ), obteve-se o valor máximo de 186 mm/mês em janeiro e mínimo de 0 mm/mês correspondente aos meses de agosto, setembro e outubro.

Assim, a razão do escoamento superficial máxima foi de 0.618, que corresponde a 61.8% da taxa da precipitação escoada superficialmente e a parcela restante utilizada nos processos da evapo-transpiração potencial para o mês de janeiro. E, portanto, a razão mínima obtida foi de 0.0, que corresponde a 100% da taxa de precipitação utilizada nos processos da evapo-transpiração potencial no mês de setembro.



**Figura 9:** Variação sazonal da estimativa da: (a) descarga de água doce ( $Q$ ) e (b) descarga total de água doce ( $Q_f$ ) no EBS devido ao aporte fluvial da bacia de drenagem e a entrada/saída de água doce através da superfície livre do canal estuarino.

A descarga de água doce (Q) do EBS devido ao aporte fluvial da bacia de drenagem (vide figura 9 (a)) apresentou o pico máximo no mês de fevereiro e as descargas mínimas de água doce são verificadas no mês de outubro, com intensidades de 42.82 m<sup>3</sup>/s e 0.12 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

A descarga total de água doce (Q<sub>f</sub>) devido a descarga de água doce da bacia de drenagem e o aporte médio pluvial através da superfície livre do canal estuarino, apresentou a máxima no mês de fevereiro com intensidade igual a 46.10 m<sup>3</sup>/s e -3.30 m<sup>3</sup>/s representando a mínima no mês de outubro. Portanto, as máximas descargas de água doce são verificadas nos meses de fevereiro e podem estar associados a maior taxa da precipitação verificada neste mês. E, o pico mínimo da descarga de água doce e descarga total de água doce verificadas no mês de outubro está associado ao período de estiagem.

## 4.2. Campanha da Maré de Sizígia

### 4.2.1. Análise de Mecanismos do Transporte de Sal

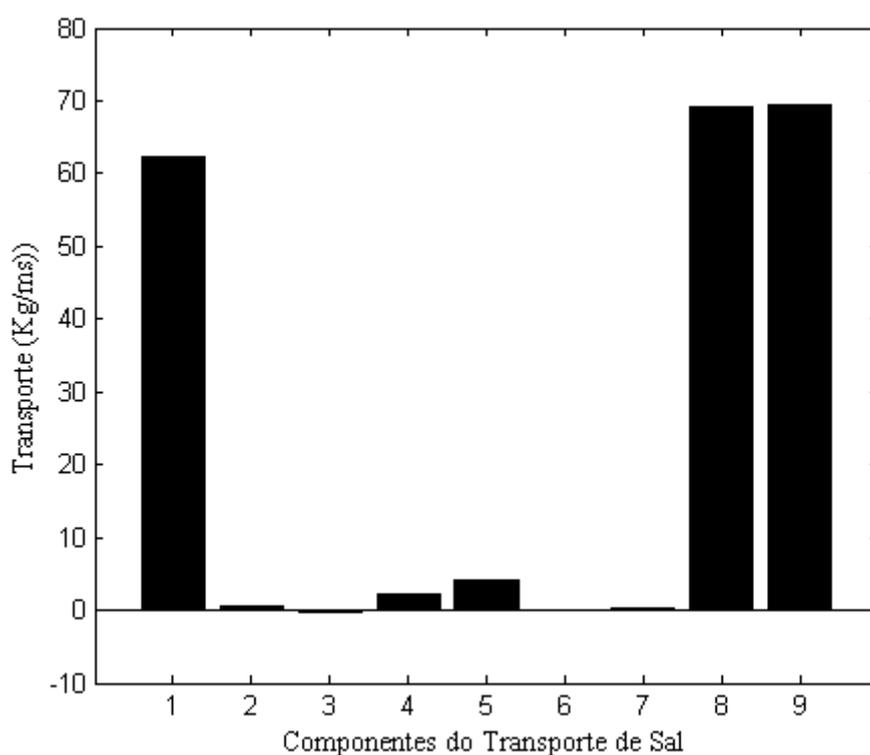
Os valores numéricos correspondentes à decomposição do transporte advectivo do sal na condição da sizígia encontram-se listadas na tabela 1. Com base nos dados obtidos, os termos dominantes no transporte do sal no EBS foram o transporte advectivo pela descarga fluvial com intensidade de 62.363 kg · m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, seguindo-se da difusão turbulenta com intensidade de 4.127 kg · m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> (vide figura (10)). A parcela do bombeamento e dispersão da maré, mostraram-se menos predominantes no que tange o transporte do sal com intensidade de -0.257 kg · m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> e -0.004 kg · m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, respectivamente e, com o transporte do sal à fora do sistema estuarino.

**Tabela 1:** Componentes do transporte do sal devido a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de Stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré na condição de sizígia.

Ordem	Transporte do sal (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	Componentes do Transporte do Sal	Expressão Matemática
1	62.363	Descarga fluvial	$\bar{\rho}u_a h_a S_a$
2	0.694	Deriva de Stokes	$\bar{\rho}\langle u_t h_t \rangle S_a$
3	-0.257	Bombeamento da maré	$\bar{\rho}\langle u_t S_t \rangle h_a$
4	2.154	Circulação gravitacional	$\bar{\rho}h_a \overline{u_s S_s}$
5	4.127	Difusão turbulenta	$\bar{\rho}h_a \langle \overline{u' S'} \rangle$
6	-0.004	Dispersão da maré	$\bar{\rho}\langle h_t u_t S_t \rangle$
7	0.168	Circulação residual	$\bar{\rho}u_a \langle h_t S_t \rangle$
8	69.245	$\sum (1 + 2 + 3 + 3 + 5 + 6 + 7)$	
9	69.365	$T_s = \bar{\rho}\langle \overline{uSh} \rangle$	

O valor do transporte do sal integrado durante o ciclo de maré foi de  $69.365 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$  e a somatória determinada através das parcelas do transporte advectivo e dispersivo do sal (descarga fluvial, deriva de stokes, bombeamento da maré, circulação gravitacional, difusão turbulenta, dispersão da maré e circulação residual) foi de  $69.245 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

A figura (10), ilustra as intensidades de componentes do transporte advectivo do sal devido a (descarga fluvial, aprisionamento topográfico ou deriva de stokes, bombeamento da maré, circulação gravitacional, difusão turbulenta, dispersão da maré e circulação residual), somatório de parcelas advectivas e dispersivas, e transporte integrado do sal no tempo, calculados durante um ciclo completo de maré na condição de sizígia, por unidade de largura da secção transversal.



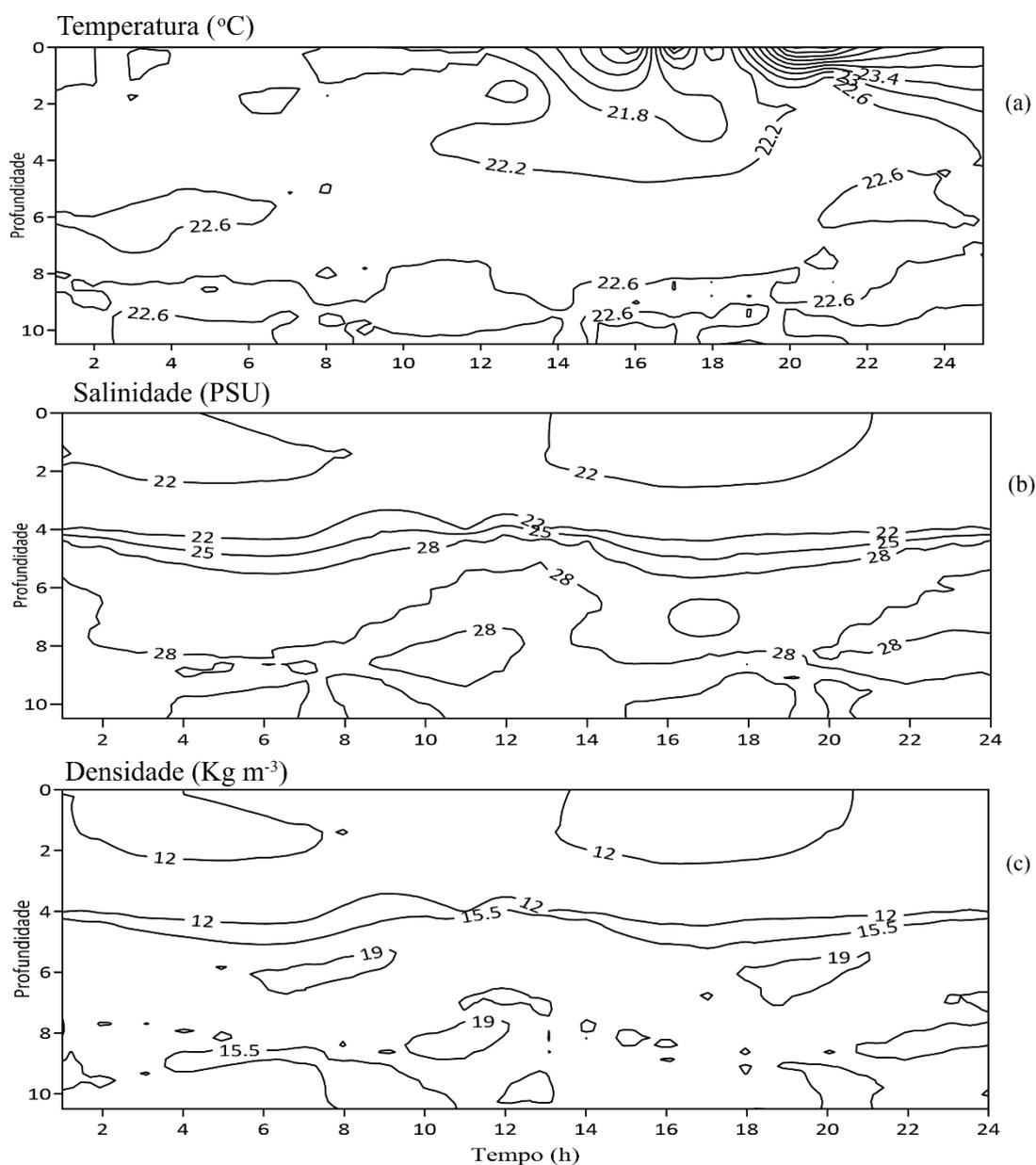
**Figura 10:** Componentes do transporte advectivo do sal calculados durante um ciclo completo de maré para EBS, em julho de 2011, durante a condição de sizígia. Os números no eixo das abcissas representam a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré.

#### 4.2.2. Parâmetros hidrográficos

Durante a campanha da maré de sizígia, a temperatura na coluna de água apresentou uma amplitude térmica de  $9.94 \text{ }^\circ\text{C}$ , sendo que a temperatura mínima foi de  $18.39 \text{ }^\circ\text{C}$  e a máxima foi de  $28.32 \text{ }^\circ\text{C}$  (vide fig.11(a)). A salinidade apresentou uma variação de  $11.49 \text{ PSU}$ , sendo a mínima e máxima apresentada foram  $19.29 \text{ PSU}$  e  $30.79 \text{ PSU}$ , respetivamente (vide fig.11(b)). O comportamento da anomalia da densidade, apresentou uma semelhança com a salinidade, mostrando assim a variação de

18.31 Kg m<sup>-3</sup>, sendo que a densidade mínima foi de 2.18 Kg m<sup>-3</sup> e a máxima foi de 20.49 Kg m<sup>-3</sup> (vide fig.11(c)).

A variação temporal da temperatura apresentou comportamento estratificado e um acentuado gradiente vertical ao longo de todo período de amostragem. Os primeiros 2m da profundidade, a salinidade apresentou uma estratificação parcial e de 6 a 10m da profundidade a salinidade na coluna de água apresentou uma estratificação forte a moderada, enquanto, nas profundidades 3 a 5m apresentou uma mistura parcial a moderada. A isopleta da anomalia de densidade apresentou uma semelhança forte com a salinidade (vide fig.11), onde verifica-se uma estratificação parcial a forte moderada na superfície e no fundo, respectivamente. Entre 2 e 5m da profundidade, verifica-se uma mistura durante o período de coleta de dados.

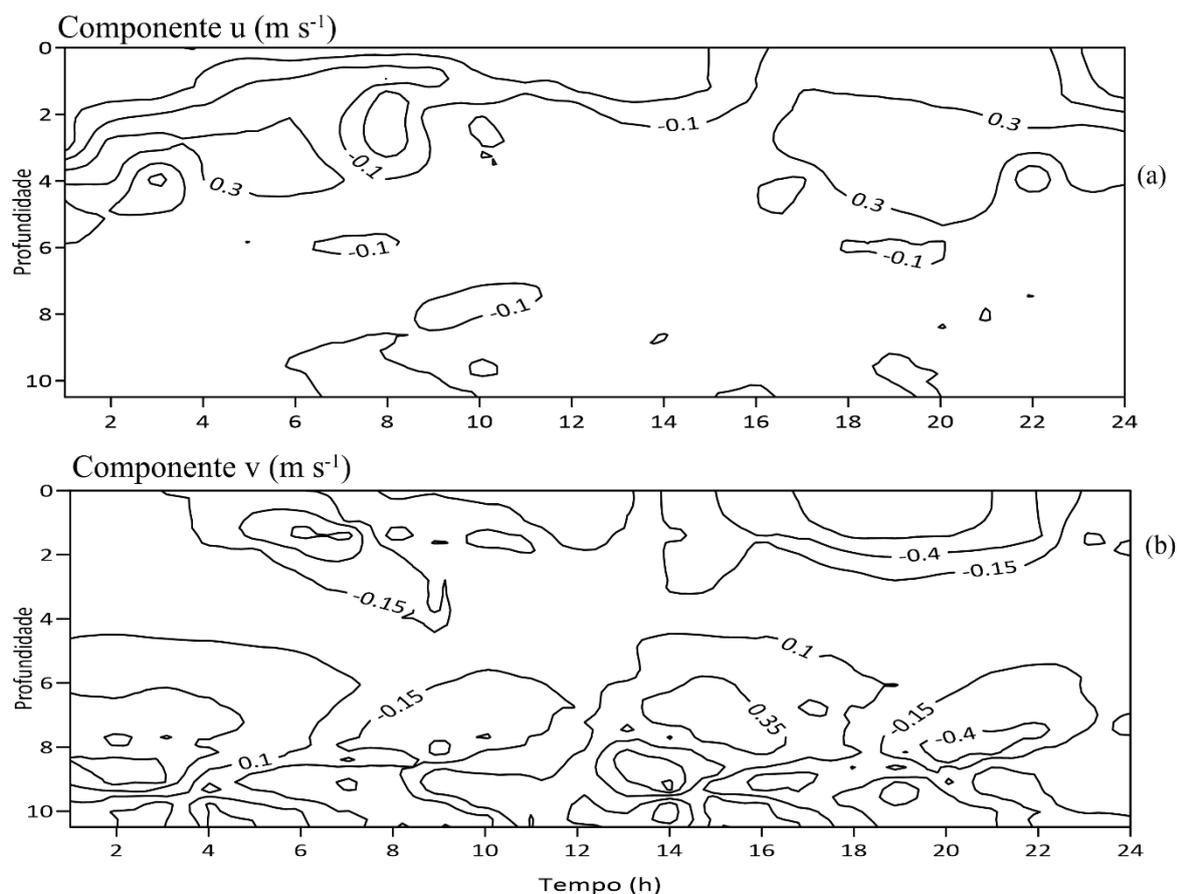


**Figura 11:** Isopletas da (a) temperatura, (b) salinidade, (c) densidade em função da profundidade e tempo de observação em hora.

### 4.2.3. Componente longitudinal e transversal da velocidade

De acordo com isopletas da variação vertical da corrente coletadas durante a condição de sizígia (vide fig.12), a intensidade máxima da corrente na enchente e na vazante na componente longitudinal da velocidade ( $u$ ) foram  $0.71\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $-0.87\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente (vide fig.12(a)).

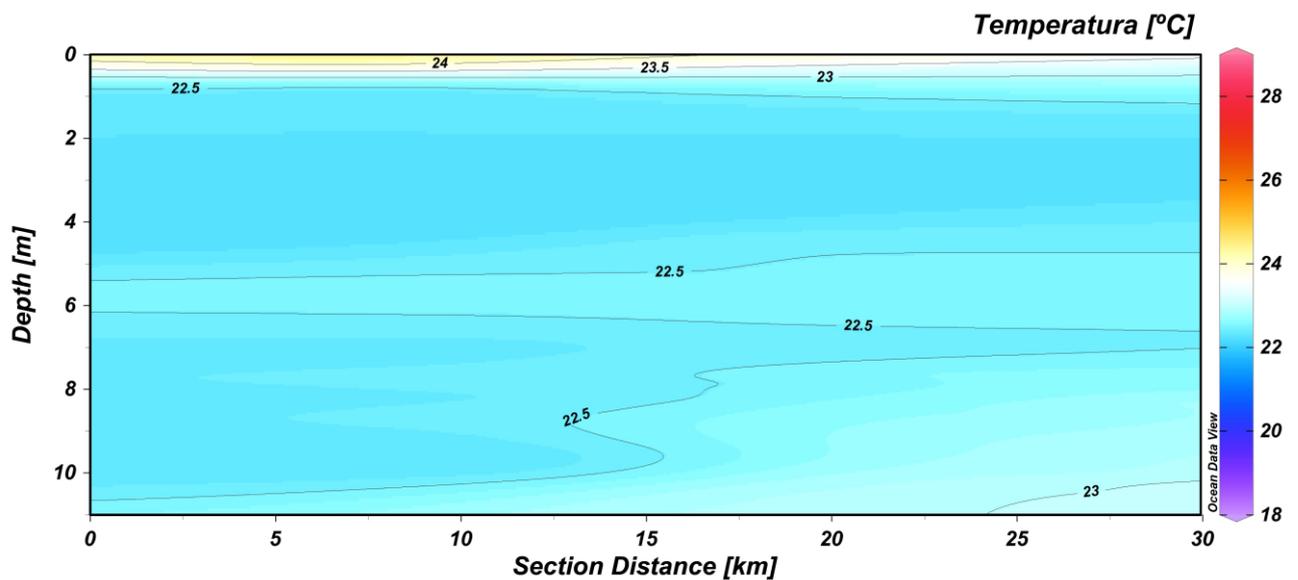
A componente transversal da velocidade (vide fig.12(b)) apresentou um comportamento irregular e com baixa intensidade na vazante comparativamente as da componente longitudinal, sendo que seus valores máximos na enchente igual a  $0.99\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $-0.84\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  na vazante.



**Figura 12:** Ilustração das isopletas das componentes de velocidade: (a) componente longitudinal da velocidade,  $u$  e (b) componente transversal da velocidade,  $v$ .

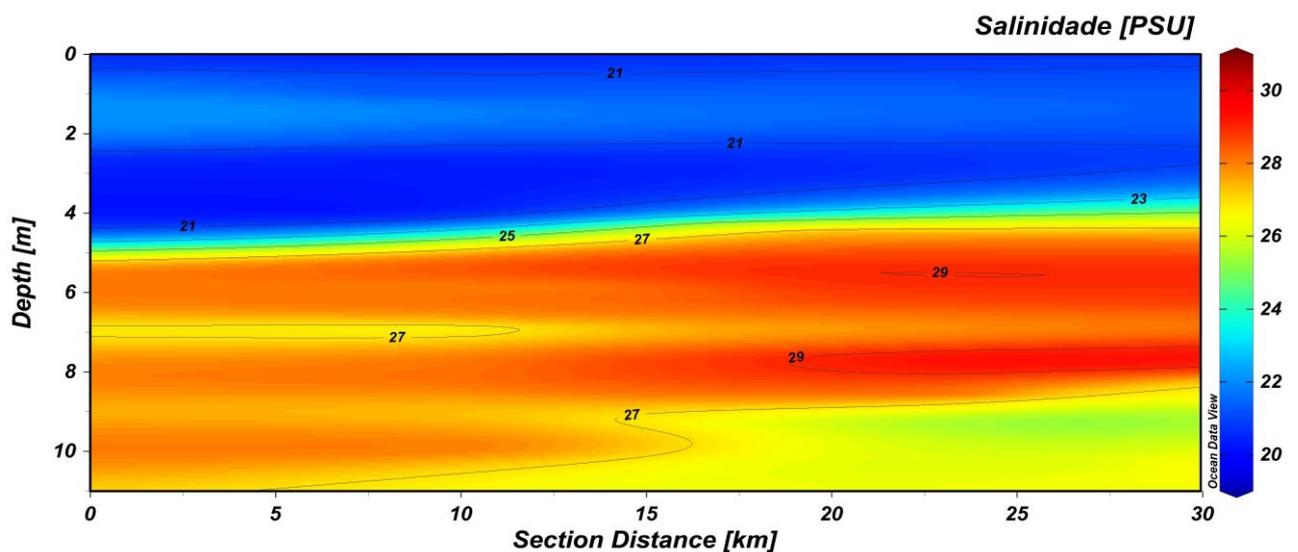
### 4.2.4. Distribuição longitudinal da temperatura e salinidade

As figuras (13) e (14) ilustram a distribuição longitudinal da temperatura e salinidade na condição de sizígia, respectivamente. A distribuição longitudinal da temperatura, apresentou uma variação não muito significativa com amplitude térmica  $9.94\text{ }^{\circ}\text{C}$  e, os valores mais altos da temperatura são verificados nos primeiros 15 km da confluência em direcção a boca nas camadas superficiais.



**Figura 13:** Distribuição longitudinal da temperatura durante todo período de amostragem na condição da maré de sizígia.

A distribuição longitudinal da salinidade em condições de maré de sizígia (vide figura.14) apresentou uma estrutura salina predominante de cunha salina, durante todo período da amostragem, configurando um avanço da confluência a boca do estuário. As camadas superficiais em todas as estações durante o período da amostragem, apresentaram condições mais semelhantes à parcialmente misturadas.



**Figura 14:** Distribuição longitudinal da salinidade durante todo período de amostragem na condição da maré de sizígia.

#### 4.2.5. Perfis médio temporal da salinidade e componente longitudinal da velocidade

Os perfis da variação média temporal da salinidade e componente longitudinal da velocidade em função da profundidade adimensional ( $Z$ ) são apresentados nas figuras (15) e (16), respectivamente. Onde, a salinidade residual representativa para a componente da descarga fluvial foi de 24.789 PSU e com intenso gradiente vertical ao longo do período amostral, ou seja, durante o ciclo de maré de

sizígia. Importa salientar que, a salinidade apresentou uma estratificação durante o período de amostragem, com valores máximos no fundo e mínimos na superfície.

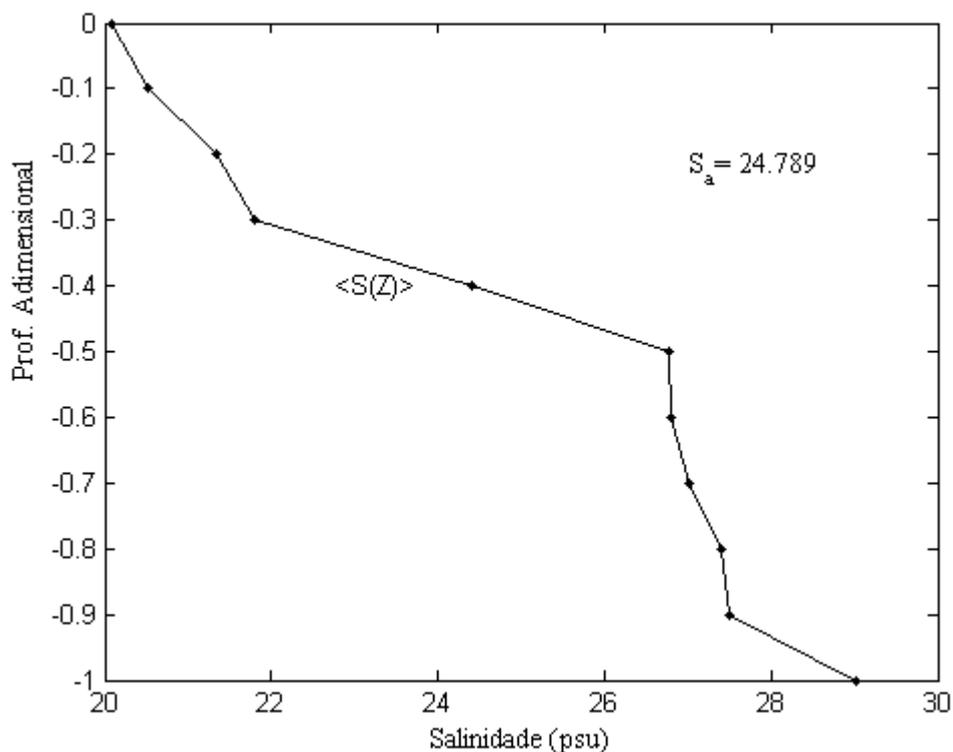


Figura 15: Variação vertical da salinidade na coluna de água durante o período de amostragem

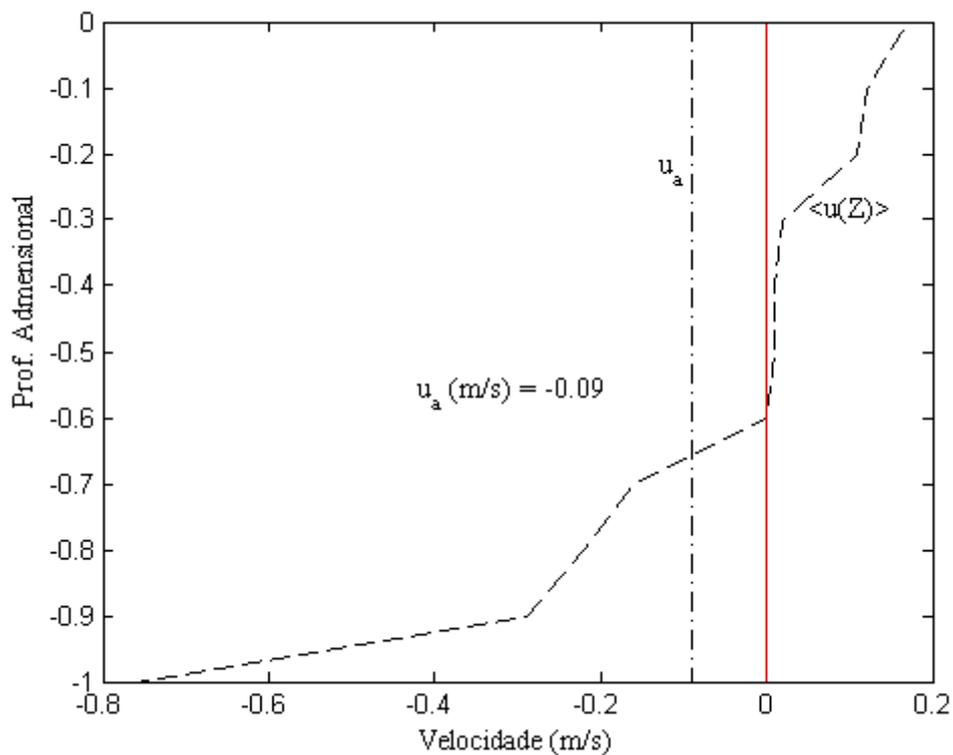


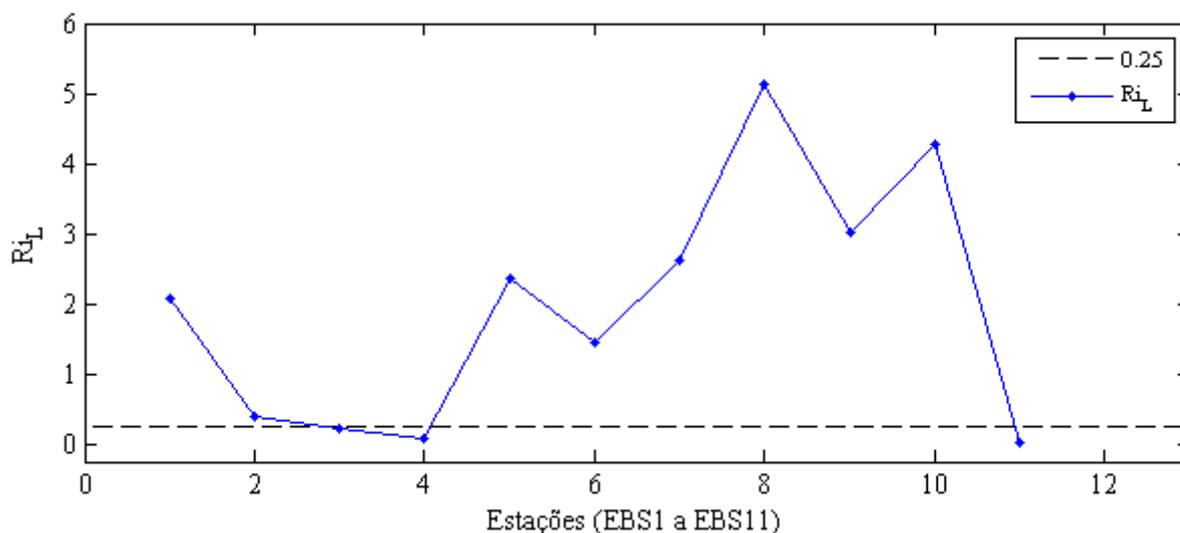
Figura 16: Variação vertical da componente longitudinal da velocidade na coluna de água durante o período de amostragem.

A variação média temporal da componente longitudinal da velocidade (vide figura.16), a linha tracejada indica a velocidade residual, e com intensidade igual a  $-0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Se percebe que, menor força no sentido do estuário abaixo, ou seja, o rio não consegue descarregar na sua totalidade tudo o que entra através da foz.

#### 4.2.6. Índices Estuarinos

As figuras (17) e (18) indicam o número adimensional de Richardson e diagrama de Estratificação-Circulação de Hansen & Rattray (1966) na condição de sizígia durante o período de amostragem. O número adimensional de Richardson na condição de sizígia apresentou valores superiores a 0.25 em quase todas as estações, com exceção da estação EBS4 e EBS11, onde apresentaram valores inferior a 0.25 (vide figura.17). A linha tracejada na figura, indica a transição entre o regime laminar e turbulento.

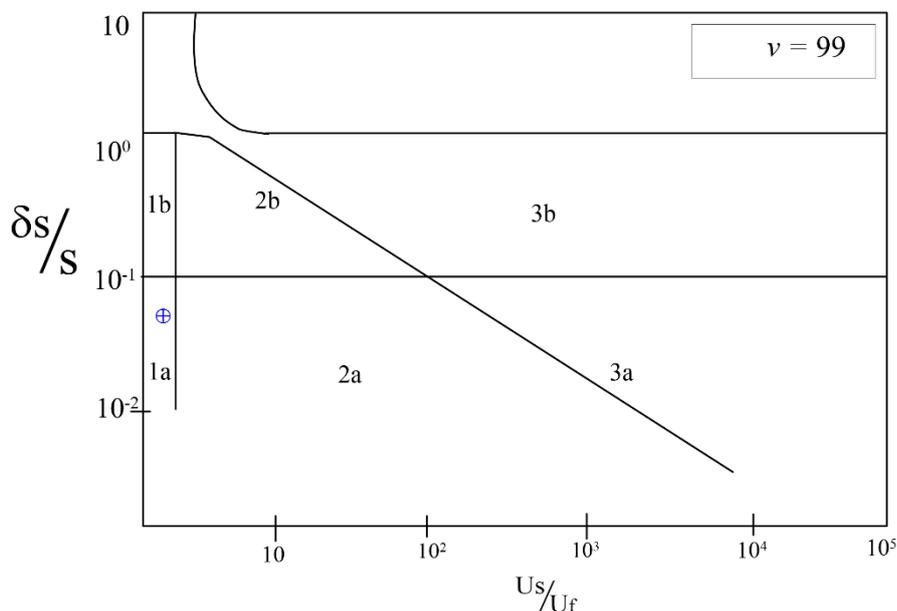
O número adimensional de Richardson apresentou valores superiores a 0.25, caracterizando a estratificação da coluna de água em quase todas estações na condição da maré de sizígia, com exceção da estação EBS4 e EBS11, que apresentaram prevalência de efeitos friccionais causando uma mistura.



**Figura 17:** A linha tracejada indica a transição entre a estratificação e mistura em condição de movimento uniforme e linha contínua indica o número adimensional de Richardson na condição da maré de sizígia para o EBS.

Os parâmetros de estratificação ( $\frac{\delta S}{S}$ ) e circulação ( $\frac{u_s}{u_f}$ ) calculados para a condição da maré de sizígia foram 0.069 e 0.79, respetivamente. A grandeza não-dimensional  $\nu$ , determinado a partir de parâmetros estratificação e circulação pela equação (8) foi de 0.99. O parâmetro não-dimensional  $\nu$  pode variar entre zero e unidade ( $0 < \nu \leq 1$ ) indicando, de acordo com a sua definição, que o transporte de sal estuário acima é gerado exclusivamente pelo processo advectivo ou por difusão turbulenta (dispersão).

Destarte, é de salientar que está grandeza representa a fração do fluxo de sal estuário acima, gerado pela maré e permite obter a proporção relativa dos processos advectivos e de difusão turbulenta para o transporte do sal.



**Figura 18:** Diagrama de estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1966) para o EBS na condição da maré de sizígia, onde o eixo das ordenadas indica o parâmetro de estratificação e o eixo das abcissas indica o parâmetro de circulação. O ponto azul, indica o parâmetro adimensional  $\nu$ .

### 4.3. Campanha da Maré de Quadratura

#### 4.3.1. Análise de Mecanismos do Transporte de Sal

Os valores numéricos correspondentes à decomposição do transporte advectivo do sal na condição de quadratura encontram-se listadas na tabela 2. Os termos dominantes no transporte do sal no EBS na condição de quadratura foram o transporte advectivo pela descarga fluvial à fora com intensidade de  $-31.523 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ , seguindo-se da difusão turbulenta com intensidade de  $8.349 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$  (vide figura (19)). A parcela do bombeamento da maré e circulação gravitacional, apresentaram o transporte advectivo do sal à fora do sistema estuarino com intensidade de  $-0.730 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$  e  $-0.543 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

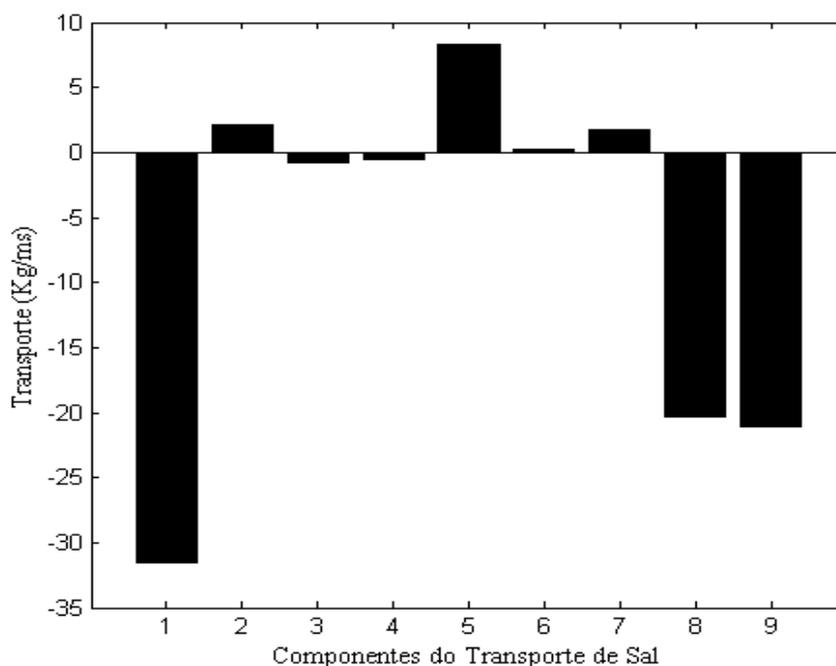
O valor do transporte do sal integrado durante o ciclo de maré foi de  $-21.054 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$  e a somatória determinada através das parcelas do transporte advectivo e dispersivo do sal (descarga fluvial, deriva de Stokes, bombeamento da maré, circulação gravitacional, difusão turbulenta, dispersão da maré e circulação residual) foi de  $-20.350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

A distribuição espacial de salinidade é um indicador da interação dinâmica entre as forças produzidas pela descarga fluvial, estuário à fora, e pela maré, tanto para fora quanto para dentro, produzindo o gradiente horizontal da densidade dito baroclínico.

**Tabela 2:** Componentes do transporte do sal devido a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de Stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré na condição de quadratura.

Ordem	Transporte do sal (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	Componentes do Transporte do Sal	Expressão Matemática
1	-31.523	Descarga fluvial	$\bar{\rho}u_a h_a S_a$
2	2.168	Deriva de Stokes	$\bar{\rho}\langle u_t h_t \rangle S_a$
3	-0.730	Bombeamento da maré	$\bar{\rho}\langle u_t S_t \rangle h_a$
4	-0.543	Circulação gravitacional	$\bar{\rho}h_a \overline{u_s S_s}$
5	8.349	Difusão turbulenta	$\bar{\rho}h_a \langle \overline{u' S'} \rangle$
6	0.187	Dispersão da maré	$\bar{\rho}\langle h_t u_t S_t \rangle$
7	1.742	Circulação residual	$\bar{\rho}u_a \langle h_t S_t \rangle$
8	<b>-20.350</b>	$\sum (1 + 2 + 3 + 3 + 5 + 6 + 7)$	
9	<b>-21.054</b>	$T_s = \bar{\rho}\langle \overline{uSh} \rangle$	

O transporte advectivo do sal apresentou valores positivos e negativos, que representam, respectivamente, a saída e a entrada do sal no sistema estuário. As intensidades das componentes do transporte do sal na condição de maré de quadratura (vide figura.19), devido a parcela da descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de Stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré.



**Figura 19:** Componentes do transporte advectivo do sal calculados durante um ciclo completo de maré para EBS, em julho de 2011, durante a condição de quadratura. Os números no eixo das abcissas representam a descarga fluvial (1), aprisionamento topográfico ou deriva de Stokes (2), bombeamento da maré (3), circulação gravitacional (4), difusão turbulenta (5), dispersão da maré (6) e circulação residual (7); somatório de parcelas advectivas e dispersivas (8) e transporte integrado no tempo (9) calculados durante um ciclo completo de maré.

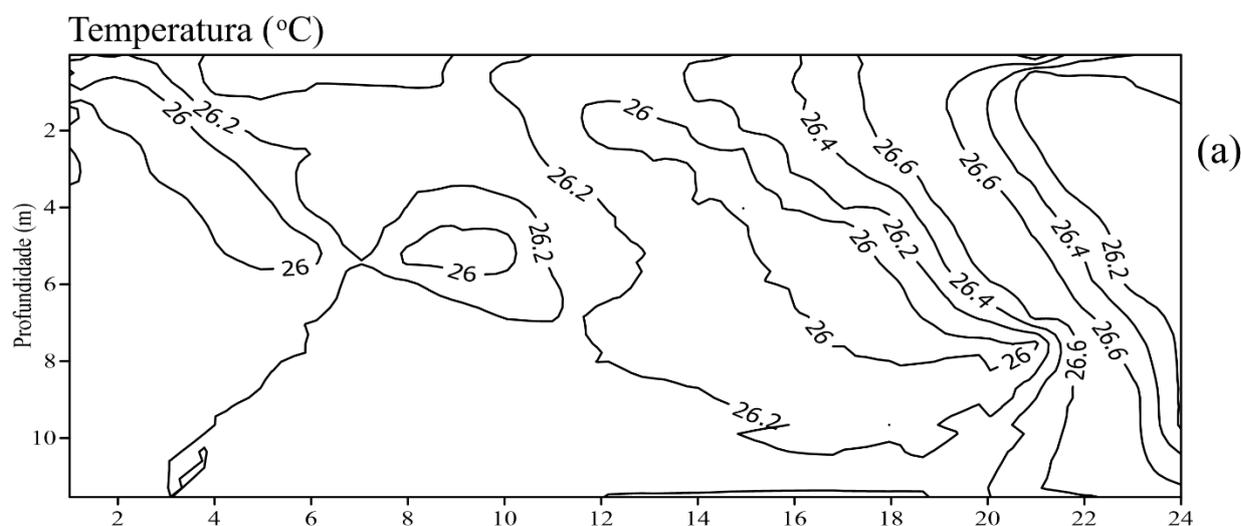
### 4.3.2. Parâmetros hidrográficos

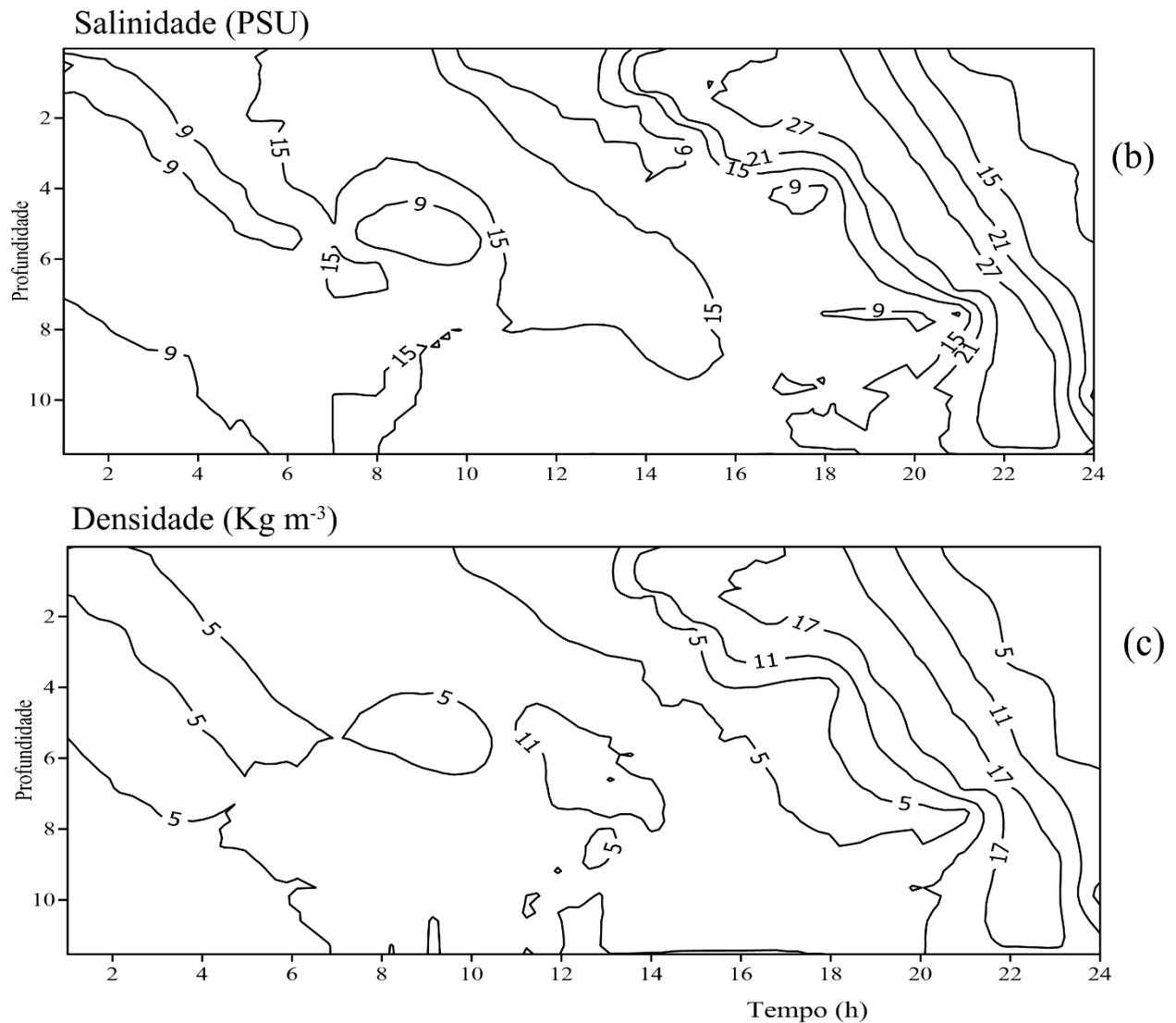
Durante a campanha da maré de quadratura diferentemente da sizígia, a temperatura na coluna de água apresentou uma amplitude térmica de 1.15 °C, sendo que a temperatura mínima foi de 25.82 °C e a máxima foi de 26.97 °C (vide fig.20 (a)).

A salinidade apresentou uma variação de 26.46 PSU, sendo a mínima e máxima apresentada foram 26.46 PSU e 29.09 PSU, respectivamente (vide fig.20 (b)). O comportamento da anomalia da densidade apresentou uma semelhança com a salinidade, apresentando assim a variação de 18.31 Kg m<sup>-3</sup>, sendo que a densidade mínima foi de 0.10 Kg m<sup>-3</sup> e a máxima foi de 18.41 Kg m<sup>-3</sup> (vide fig.20 (c)).

A temperatura na condição de quadratura apresentou uma homogeneidade parcial durante todo ciclo de maré e, nota-se que a sua variação na coluna de água da superfície ao fundo não é maior, como mostra a amplitude térmica supracitada. As variações da salinidade acompanharam regularmente as oscilações da maré, com ocorrência de maiores intensidades de salinidade na preamar e menores intensidade na baixa-mar (vide figura.20 (b)).

Essa propriedade apresentou maioritariamente as características de estratificação vertical na maior parte do período e uma homogeneidade leve a partir das 19:00h. Importa referir que, o comportamento da anomalia da densidade apresentou grande semelhança com as variações da salinidade (vide figura.20 (c)).



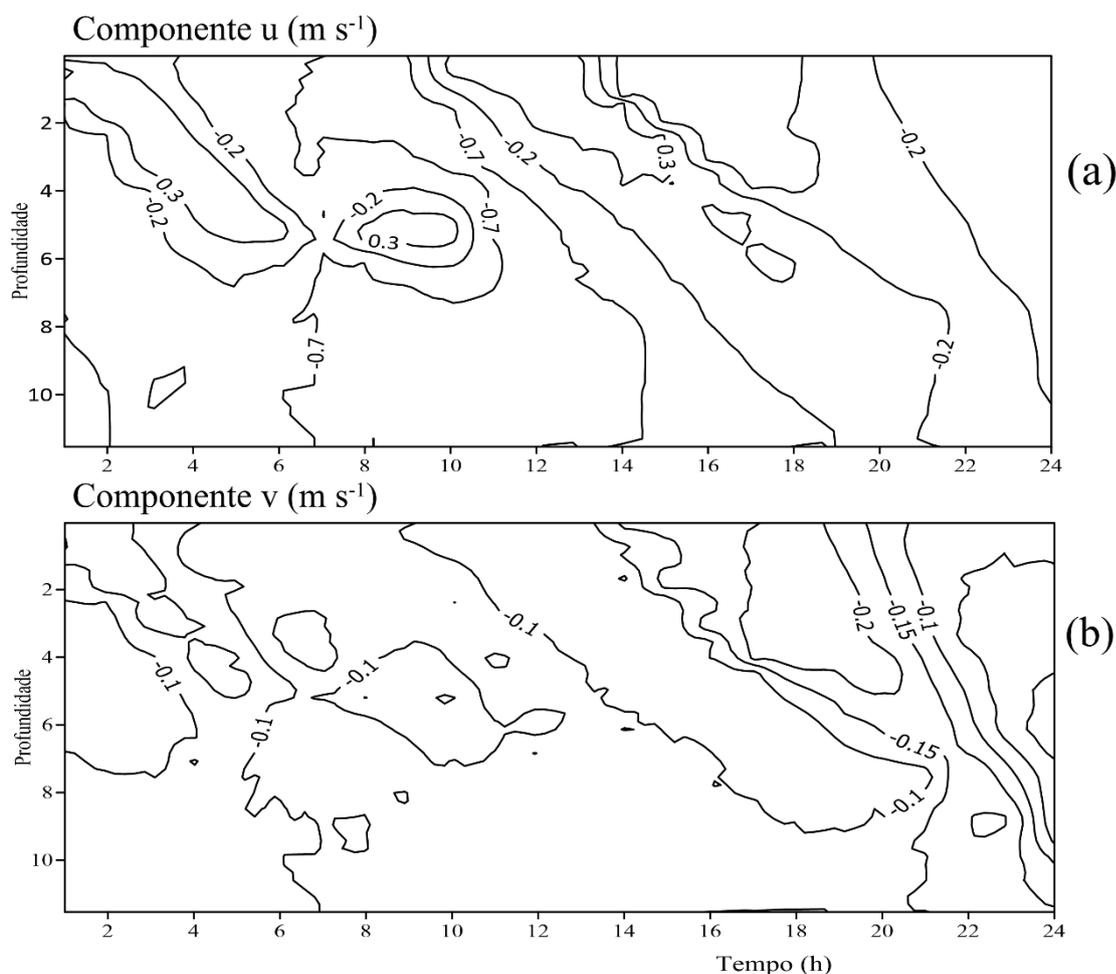


**Figura 20:** Isopletas da (a) temperatura, (b) salinidade, (c) densidade em função da profundidade e tempo de observação em hora.

#### 4.3.3. Componente longitudinal e transversal da velocidade

De acordo com isopletas da variação vertical da corrente coletados durante a maré de quadratura (vide fig.21), apresentou a intensidade máxima da corrente na enchente e na vazante na componente longitudinal da velocidade ( $u$ ) correspondente a  $0.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $-0.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente (vide fig.21 (a)).

A componente transversal da velocidade (vide fig.21 (b)) apresentou um comportamento quase regular e com baixas intensidades na vazante, assim como na enchente comparativamente com as da componente longitudinal, sendo que seus valores máximos na enchente igual a  $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $-0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  na vazante. Assim, nas duas componentes da velocidade (longitudinal e transversal) nota-se a predominância das correntes na condição da vazante.

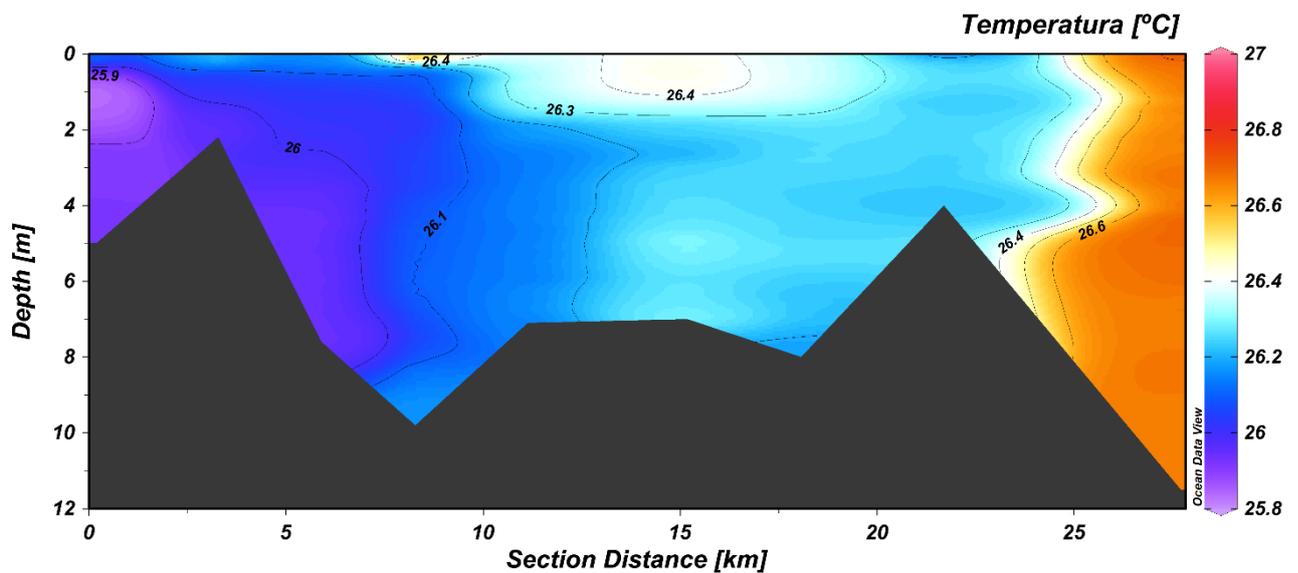


**Figura 21:** Ilustração das isopletas das componentes de velocidade: (a) componente longitudinal da velocidade, u e (b) componente transversal da velocidade, v.

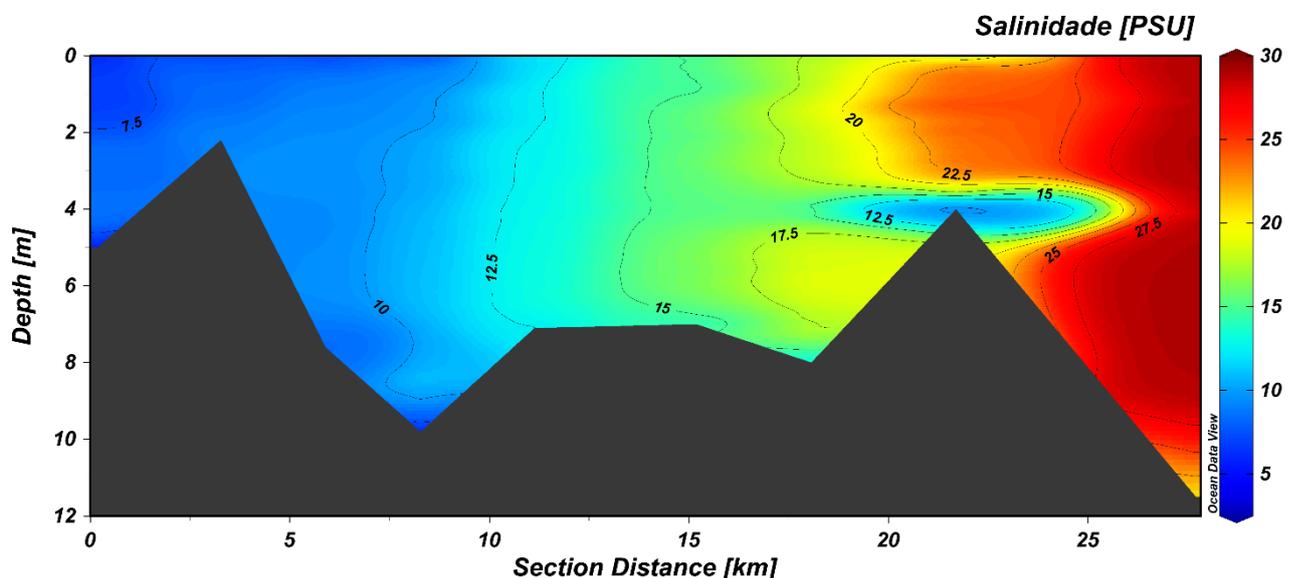
#### 4.3.4. Distribuição longitudinal da temperatura e salinidade

As figuras (22) e (23) representam a distribuição longitudinal da temperatura e salinidade na condição de quadratura durante o período de amostragem, respectivamente. A distribuição longitudinal da temperatura, mostra o gradiente longitudinal, sendo que os valores máximos são verificados na EBS4 e na boca do estuário. E, a temperatura longitudinal na estação EBS1 a EBS3, apresentou valores não superiores a 26 °C, com valores superiores na superfície e menores no fundo.

A distribuição longitudinal da salinidade em condições de maré de quadratura (vide figura.23) apresentou uma estrutura salina predominante de cunha salina em quase todo período de amostragem, mostrando um avanço numa distância não inferior a 10 km. Importa referir que, a distribuição longitudinal da salinidade na condição de quadratura apresentou um gradiente longitudinal forte com aumento da confluência a boca do estuário. A distribuição longitudinal da salinidade nas estações EBS9 a EBS11 apresentou valores baixo entre 3 e 5 m de profundidade comparativamente a da superfície e, não superior a 20 PSU.



**Figura 22:** Distribuição longitudinal da temperatura durante todo período de amostragem na condição da maré de quadratura.

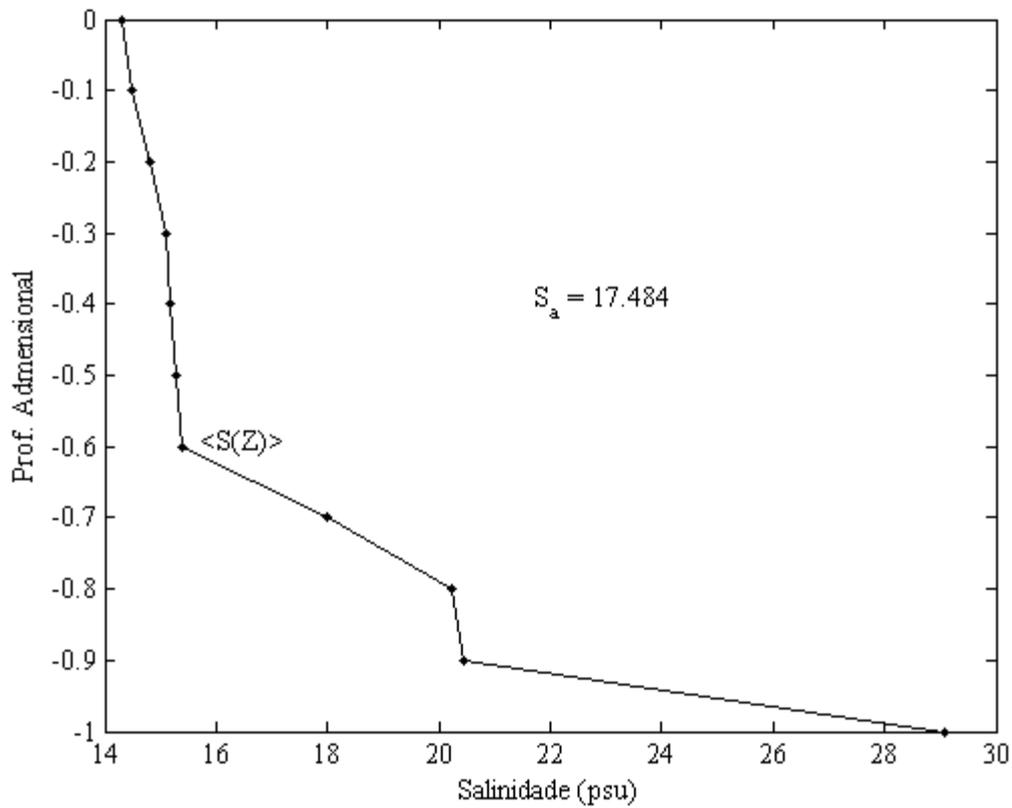


**Figura 23:** Distribuição longitudinal da salinidade durante todo período de amostragem na condição da maré de quadratura.

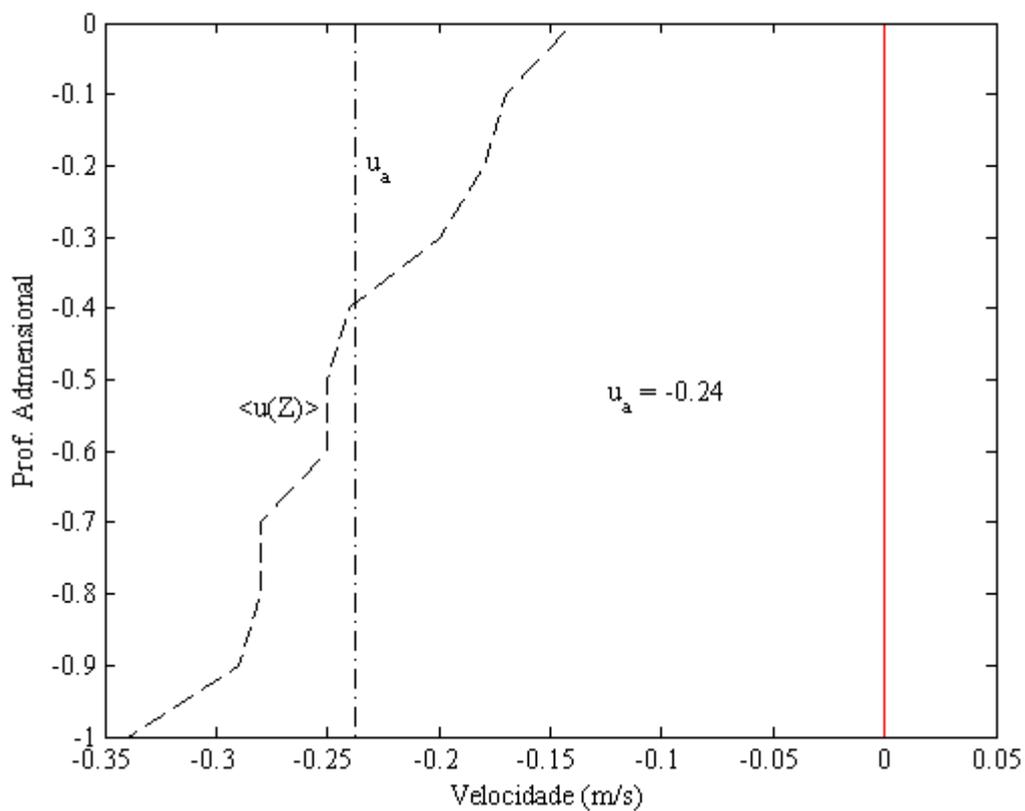
#### 4.3.5. Perfis médio temporal da salinidade e componente longitudinal da velocidade

As figuras (24) e (25) mostram os perfis médio temporal da salinidade e componente longitudinal da velocidade em função da profundidade adimensional ( $Z$ ) durante o período da amostragem na campanha da maré de quadratura, respetivamente.

De acordo com o perfil da salinidade, percebe-se que a camada mais profunda apresenta maior concentração do sal em relação as camadas superficiais. Portanto, nota-se que de 0 a  $-0.6$  da profundidade adimensional ( $Z$ ), a salinidade apresenta uma mistura parcial diferentemente das camadas a abaixo, que apresenta uma estratificação vertical (vide figura.24) e, a salinidade encontrada como sendo a média do perfil durante o período de amostragem foi de  $S_a = 17.484$  psu.



**Figura 24:** Variação vertical da salinidade na coluna de água durante o período de amostragem



**Figura 25:** Variação vertical da componente longitudinal da velocidade na coluna de água durante o período de amostragem.

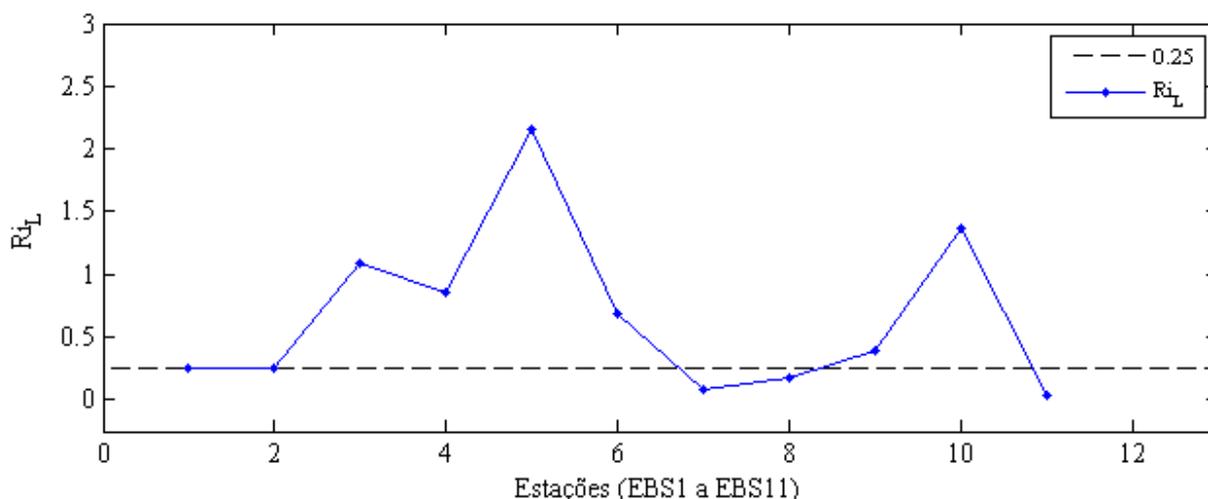
A média temporal da velocidade longitudinal durante o período de amostragem ao longo da coluna de água (circulação gravitacional) e a média espaço-temporal da velocidade longitudinal (velocidade residual) (vide figura.25), mostra que as correntes de vazante predominam as de enchente. A velocidade residual, representativa para a componente do movimento gerado pela descarga fluvial, obteve-se o valor de  $U_a = -0.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

De acordo com os resultados, nota-se que independentemente da condição da maré (sizígia ou quadratura), a velocidade residual encontra-se com valores que qualificam que a sua força ainda mantém negativa, sugerindo que o rio não possui força suficiente para balancear a entrada da onda de maré no sistema estuarino.

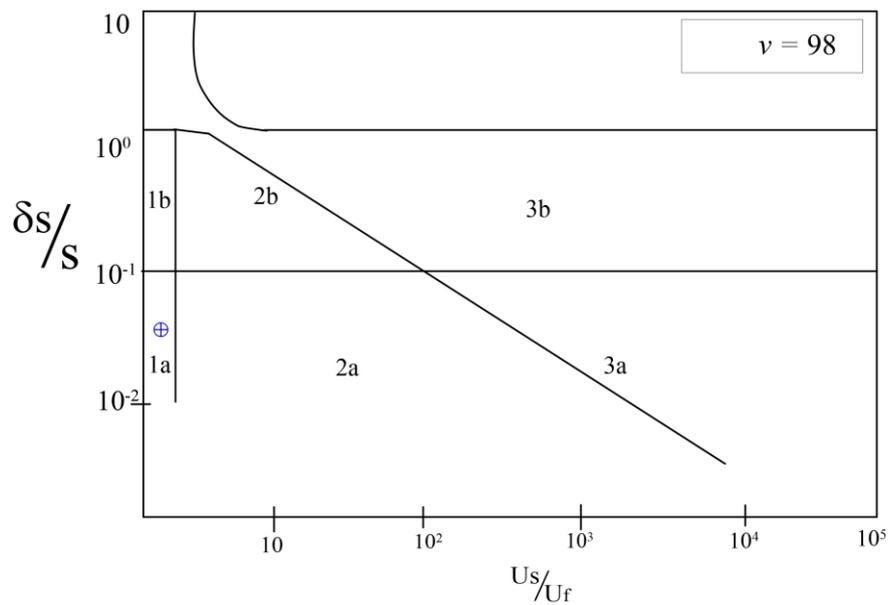
#### 4.3.6. Índices Estuarinos

O número adimensional de Richardson e o diagrama de Estratificação-Circulação de Hansen & Rattray (1966) na condição de quadratura estão apresentados nas figuras (26) e (27), respetivamente. Nesta condição de quadratura, o número adimensional de Richardson apresentou valores superiores a 0.25 na maior parte das estações durante o período de amostragem, com exceção das primeiras duas estações (EBS1 e EBS2) que apresentaram um comportamento transicional e nas estações (EBS7, EBS8 e EBS11) que apresentaram valores inferiores a 0.25, mostrando a homogeneização da coluna de água.

Os parâmetros de estratificação ( $\frac{\delta S}{S}$ ) e circulação ( $\frac{u_s}{u_f}$ ) calculados para a condição da maré de quadratura foram 0.065 e 0.705, respetivamente. A grandeza não-dimensional  $\nu$ , determinado a partir de parâmetros estratificação e circulação pela equação (8) foi de 0.98.



**Figura 26:** A linha tracejada indica a transição entre a estratificação e mistura em condição de movimento uniforme e linha contínua indica o número adimensional de Richardson na condição da maré de quadratura para o EBS.



**Figura 27:** Diagrama de estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1966) para o EBS na condição da maré de quadratura, onde o eixo das ordenadas indica o parâmetro de estratificação e o eixo das abcissas indica o parâmetro de circulação. O ponto azul, indica o parâmetro adimensional  $\nu$ .

No presente trabalho, o número adimensional de Reynolds foi igual a  $5.1 \cdot 10^5$  e  $3.4 \cdot 10^5$  na condição de maré de sizígia e quadratura, respetivamente. Durante o período de amostragem nas duas condições de maré, de acordo com o número adimensional de Reynolds o EBS é caracterizado por um regime totalmente turbulento com uma mistura intensificada.

## CAPÍTULO V: Análise e Discussão de Resultados

### 5.1. Descarga fluvial

A estimativa do aporte médio pluvial,  $Q_d$  obtidos para a bacia de drenagem do canal estuarino através de séries temporais da temperatura do ar, evaporação e precipitação ao longo de 31 anos (1992 a 2022), apresentou valor máximo para o mês de janeiro com  $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-3.4 \text{ m}^3/\text{s}$  para o mês de outubro. O fluxo máximo da entrada de água doce no estuário dos bons sinas é verificado no mês de janeiro e a saída máxima de água no canal estuarino verifica-se no mês de outubro.

O maior fluxo de entrada de água doce no canal estuarino no mês de janeiro, deve-se a maior taxa de precipitação em relação a de evaporação como mostra a figura 11. E, o maior fluxo da saída de água doce, pode estar associado a maior taxa de evaporação em relação a precipitação no mês de outubro. Onde, segundo (Hoguane, *et al.*, 2020) os principais rios que desaguam no estuário do Bons Sinais são independentes do Zambeze, não são regulamentados e os seus escoamentos dependem das chuvas diretas para a sua captação.

A média anual da descarga total de água doce ( $Q_f$ ) devido ao aporte fluvial da bacia de drenagem e a entrada/saída de água doce através da superfície livre do canal estuarino igual a  $15.79 \text{ m}^3/\text{s}$ , mostrou uma magnitude duas vezes menor a de obtido por (Bonetti Filho & Miranda, 1997) no seu trabalho versando a estimativa da descarga de água doce no sistema estuarino.

Apresentou a máxima no mês de fevereiro com intensidade igual a  $46.10 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $-3.30 \text{ m}^3/\text{s}$  representando a mínima no mês de outubro, apresentando maior concordância com os obtidos por (Ferraz, 2009), onde apresentou a máxima no mês de fevereiro com intensidade igual a  $42.82 \text{ m}^3/\text{s}$  e mínima no mês de outubro  $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ , como foi observado no presente trabalho. Portanto, essa diferença de magnitude pode estar associada ao uso de séries temporais diferentes, onde no trabalho feito por (Ferraz, 2009) a série temporal é correspondente aos anos (1967 a 1981), enquanto no presente trabalho a série temporal foi de 1992 a 2022.

Restrição no emprego da descarga estimada deve se as características fisiográficas do sistema, uma vez que o aporte de água doce não é proveniente de fonte única situada na confluência do rio, como no caso de um estuário clássico, mas da contribuição de vários afluentes ao longo do canal estuarino. Desta feita, o canal estuarino além do rio Cua-Cua e Licuar no tempo chuvoso recebe as águas no canal oriunda doutros afluentes como rio Chipoca, Inhangulue e Macanga.

## 5.2. Parâmetro hidrológico e componentes da velocidade

As variações longitudinais da Temperatura, Salinidade e Densidade durante a condição da maré de sizígia de 17 a 23 de julho de 2011 (vide figura (13) e (14)). A coluna de água foi misturada termicamente, com pequenas diferenças ao longo do estuário, onde água de baixa temperatura (21,6 – 22 °C) foi observado nas zonas profundas próximo à foz e água com temperatura ligeiramente alta (22,4 – 22,5 °C) foi observada na zona superficial.

A salinidade diminuiu de 30.79 PSU na boca para 11.49  $\text{Km} \cdot \text{m}^{-3}$  PSU na confluência de rios Cua-Cua e Licuar. O perfil de densidade (vide figura.11(c)) exibiu o mesmo padrão de salinidade com altos valores correspondentes a 20.45  $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$  na boca e valores baixos 8.95  $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$  na região da confluência captação. Portanto, a coluna de água foi misturada verticalmente durante o período de amostragem de sizígia.

Em geral, os valores da salinidade na condição da maré de quadratura, diminuíram de 29.09 PSU para 2.64 PSU, da foz para a confluência dos rios Cua-Cua e Licuar (vide figura 23). A baixa salinidade observada durante este período, deveu-se à chuva conforme mostrado na série temporal de dados de precipitação da Estação Meteorológica de Quelimane (vide figura 29 em anexo). De acordo com a figura (23), a intrusão do sal na condição de quadratura alcança uma distância de aproximadamente 12 km da boca do estuário em direção a confluência.

De igual modo, na condição de quadratura, a coluna de água foi misturada termicamente, apresentando pequenas diferenças ao longo de estuário, onde as altas temperaturas são verificadas na boca do estuário com variação de 26.4 a 26.8 °C e águas de baixa temperatura são verificadas na confluência dos rios com temperatura não superior a 26 °C. Assim, com base nos perfis da salinidade, mostrou que a coluna de água na condição de maré de sizígia, assim como na quadratura o EBS é dado como uma coluna mista a parcialmente mista, com dominância da estratificação na condição de quadratura.

Observa-se que, nas duas condições da maré, as velocidades das correntes na superfície são mais fortes do que as da camada mais profunda, podendo estar associado a atrito provocado pela menor profundidade do estuário. As correntes de vazante foram mais fortes e duradouras do que a enchente, mostrando claramente a assimetria velocidade da maré no estuário do Bons Sinais e dominância na vazante. A assimetria da maré no EBS com a dominância e maior fluxo na vazante, pode estar associado a resposta da alta rugosidade do fundo, como consequência da presença da vegetação do mangal, conforme relatado por (Kurniawan, *et al.*, 2014). Quanto a assimetria encontrada nesse trabalho, corrobora com encontrada por (Mazzilli, 2015; Hoguane, *et al.*, 2020) versando sobre a hidrodinâmica do estuário do Bons Sinais, como o presente trabalho.

### 5.3. Transporte do sal

Em geral, os resultados demonstraram que o transporte do sal no EBS nas duas condições da maré variou concomitantemente com a oscilação da velocidade e da onda de maré. Durante a enchente, os valores de transporte tornavam-se negativos, caracterizando a entrada do sal, enquanto que na vazante, os valores de transporte foram positivos, representando o transporte do sal para fora do estuário.

Na condição da maré de sizígia, assim como na condição de quadratura, os resultados indicaram que o transporte advectivo devido à descarga fluvial representado por 1º termo é o principal mecanismo de transporte de sal neste estuário, com participação de 90.06 % na maré de sizígia e, de 69.68 % na condição da maré de quadratura no que concerne o transporte total do sal. A componente da difusão turbulenta foi o segundo termo no transporte do sal nas duas condições de maré, com participação de 5.96 % na condição de sizígia e 18.45 % na condição de quadratura.

O terceiro termo em importância no que concerne o transporte total do sal, foi a componente da circulação gravitacional, com participação de 3.11 % na condição de sizígia. Enquanto que, na condição de quadratura o terceiro termo em importância no transporte foi a deriva de Stokes, com participação de 4.79 % e, pode estar relacionado com a alteração do nível de água (D'Aquino, 2010) no sistema estuarino durante o período de amostragem.

A circulação gravitacional é um padrão de fluxo residual resultante da diferença de densidade entre a água doce da descarga fluvial e água costeira (Paiva, 2020). A importância do transporte total do sal no presente trabalho devido a parcela da circulação gravitacional na condição de sizígia, pode estar associado a precipitação verificada durante oito dias consecutivos antes da amostragem (vide figura.28) em anexo. Diferentemente de resultado obtido por (Paiva, 2020) que segundo autor, a importância do transporte total do sal devido a circulação gravitacional deveu-se a menor energia disponível induzida pela maré, o que permitiu maior desenvolvimento da circulação gravitacional e do transporte por esse mecanismo.

Segundo Paiva (2020), o transporte de volume pode ser utilizado para a avaliação da importação ou exportação de propriedades no sistema estuarino. Realizado o somatório das parcelas do transporte do sal em cada condição da maré (sizígia e quadratura) foi possível estimar se o estuário apresentou comportamento de exportador ou importador do sal. Destarte, o transporte total calculado foi de  $69.245 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$  e  $-31.523 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$  para sizígia e quadratura, respectivamente. Desta feita, o EBS na condição da maré de sizígia caracterizou-se como um importador e na condição de quadratura o estuário comportou-se como um exportador do sal. Estas características de mobilidade do sal corroboram com as encontradas por (Souza, 2015) no estuário São Francisco.

A importância do transporte do sal no EBS associado a descarga de água doce no canal estuarino nas duas condições de maré merece uma atenção especial, pois o esperado seria uma contribuição praticamente irrelevante no que concerne o mecanismo de transporte de sal associado a parcela da descarga de água doce, conforme descrito anteriormente por (Mazzilli, 2015) que o aporte de água doce no EBS é pequena. Portanto, este fato pode estar associado à precipitação verificada durante 8 dias consecutivos antes do início de coleta de dados, também pode estar associada a conexão dos rios Chipoca, Inhangulue e Macanga que são encontrados ao longo do canal estuarino.

Destarte, mesmo sem medições diretas e quantitativas de material particulado em suspensão (MPS) no estuário do Bons Sinais, pode-se através do comportamento hidrodinâmico e do transporte de sal, inferir o transporte de MPS de forma qualitativa. Estes resultados permitem classificar este estuário quanto ao transporte de sedimentos, como um importador de sedimentos em suspensão na maré de sizígia e na quadratura como um exportador de sedimentos em suspensão, concordando assim com os resultados de (Muholove, 2019) sobre “*Hidrodinâmica e fluxo de sedimentos suspensos sob influência de maré*” feita na mesma área de estudo que o presente trabalho.

#### **5.4. Índices Estuarinos**

A variedade de condições hidrográficas, topográficas e climáticas dos estuários é tão diversificada, apresentando situações muitas vezes conflitantes, que impossibilitam generalizações oceanográficas (Miranda, *et al.*, 2002). Os critérios de classificação desses ambientes costeiros foram desenvolvidos com intuito de comparar diversos estuários, organizando-os adequadamente com uma base de dados e estabelecendo uma estrutura de princípios gerais de estabelecimento.

Segundo Dyer (1997) a competição entre a estratificação vertical e a mistura desempenha um papel crucial na dinâmica estuarina, pois quando o fluido é estratificado o gradiente de densidade causa resistência a troca de momento por turbulência, sendo necessário um cisalhamento extra de velocidade para causar mistura. Destarte, de modo a aferir essa competição no EBS foi calculado o número adimensional de Richardson ( $R_i$ ) nas duas condições de marés.

Desta feita, nas duas condições das marés o Estuário do Bons Sinais apresentou valores de número adimensional de Richardson superiores a 0.25 mostrando assim a dominância da estratificação sobre a turbulência ( $R_i > 0.25$ ) em vários pontos de amostragem, com exceção das estações (EBS3, EBS4 e EBS11) na condição de sizígia e (EBS7, EBS8 e EBS11) na condição de quadratura que apresentaram valores de  $R_i < 0.25$  configurando o domínio da capacidade desestabilizadora sobre a estabilizadora. Na condição de quadratura, a EBS1 e EBS2 apresentaram comportamento transicional. A consistência da dominância da estratificação sobre a turbulência neste trabalho está

de acordo com o achado de (Freitas, 2013) no seu estudo sobre “*aspectos hidrodinâmicos do estuário do rio cocó, Brasil*”.

Portanto, a condição de soberania da turbulência à estratificação nas duas condições de maré, provavelmente deve-se ao fato de o estuário do Bons Sinais apresentar morfologia relativamente rasa e estreita (Hoguane, *et al.*, 2020) e estar submetido a uma condição de meso a macro-maré (Mazzilli, 2015), o que favorece a produção de turbulência.

O diagrama de Estratificação-Circulação proposto por Hansen & Rattray (1966) é baseado no cálculo de dois parâmetros, um que representa o nível de estratificação e outro de circulação. Como indicador da estratificação vertical, foi calculado o parâmetro de adimensional de estratificação  $\frac{\delta S}{S}$ , e o parâmetro de circulação  $\frac{U_s}{U_f}$  como indicador da circulação. Com base nos resultados obtidos na condição de maré de sizígia e quadratura (vide figura (18) e (27)), respectivamente, o estuário do Bons Sinais foi caracterizado como bem misturado e fracamente estratificado do tipo 1a de acordo com a classificação proposta por Hansen & Rattray (1966) nas duas condições.

Segundo Miranda, *et al.* (2002) e Pereira, *et al.* (2010) estuários classificados como de subtipos 1a e 1b pelo diagrama de Hansen & Rattray são geralmente considerados como bem misturados, característica típica de estuários dominados por maré com uma amplitude capaz de promover homogeneização vertical da coluna da água e se propagar a consideráveis distâncias estuário acima.

A classificação do EBS de acordo com diagrama de Hansen & Rattray (1966) como um estuário bem misturado e fracamente estratificado corrobora com os resultados encontrados por (Pereira, 2009) no estuário de Caravelas, (Ferreira, 2013) no estuário de Paracauari no período de estiagem e por (Hoguane, *et al.* 2020) no estuário do Bons Sinais, embora usado a classificação de acordo com o número de Simpson (Si) esses autores classificaram o EBS como bem misturado.

Entretanto, é possível identificar nas duas figuras uma variação na posição do ponto, onde na sizígia ele sobe em direção à condição de 1b, embora se mantenha completamente dentro da condição de um estuário verticalmente homogêneo. Essa variação da posição pode ser interpretada como produto da condição de maré e a precipitação verificada antes do início de amostragem, onde na sizígia as correntes de maré estão mais fortes do que na quadratura, promovendo, desse modo, mistura de forma mais efetiva e, conseqüentemente, uma difusão turbulenta maior. Enquanto na quadratura, essa condição é atenuada, propiciando condições de menor turbulência e mistura.

Segundo Dyer (1997), um estuário verticalmente homogêneo ocorre em condições de forte maré e fraca descarga fluvial, o que proporciona intensa mistura e pequena estratificação, respectivamente. Destarte, o EBS goza essas características supracitadas.

Miranda, *et al.* (2002) afirma que, a relação entre a razão do fluxo (R) e o prisma da maré (P) estabelece a importância relativa entre as forçantes de maré e a descarga fluvial. Portanto, no estuário do Bons Sinais durante o período de amostragem a razão R/P foi igual a 3.36 na condição de sizígia e 3.92 na condição de quadratura, indicando contribuições relativamente maiores da forçante da descarga fluvial em relação à forçante da maré.

Um estuário é classificado como altamente estratificado quando a razão do fluxo é superior a unidade (Dyer, 1997). Destarte, a hidrodinâmica do EBS de acordo com a razão do fluxo, responde como um estuário altamente estratificado, dominado por rio. Esse resultado pode estar associado a precipitação verificada dias antes da recolha de dados.

A transição do regime de movimento laminar para turbulento de um fluido é determinada a partir do número adimensional de Reynolds, em homenagem ao físico e engenheiro Inglês Osborne Reynolds que demonstrou pela primeira vez em 1883. Portanto, de modo a caracterizar o regime do movimento no estuário do Bons Sinais, foi calculado o número adimensional de Reynolds na condição da maré de sizígia e quadratura.

No presente trabalho, o número adimensional de Reynolds foi igual a  $5.1 \cdot 10^5$  e  $3.4 \cdot 10^5$  na condição de maré de sizígia e quadratura, respectivamente. Durante o período de amostragem nas duas condições de maré, de acordo com o número adimensional de Reynolds o EBS é caracterizado por um regime totalmente turbulento com uma mistura intensificada.

## **CAPÍTULO VI: Conclusão e Recomendações**

### **6.1. Conclusão**

O estuário dos Bons Sinais é geomorfologicamente caracterizado como um estuário raso, de pequena descarga fluvial e submetido a uma condição de meso a macro-maré. É um estuário altamente morfodinâmico, com estratos lamacentos e grande mobilidade sedimentar responsável pela contínua formação e destruição de ilhas e bancos de areia na foz.

Considerando o período analisado, o estuário dos Bons Sinais é dominado por maré de vazante, apresentando perfis verticais de velocidade homogêneos, embora estratificado em algumas situações na condição de sizígia como em quadratura.

A variação da salinidade e a temperatura apresentaram comportamento homogêneo, e uma estratificação parcial nas duas condições de maré, embora tenham ocorrido diferenças maiores em condição de quadratura nas estações próximas a boca do estuário, em decorrência da menor altura da onda de maré e velocidades menos intensas, propiciando menor mistura.

Os principais mecanismos de transporte de sal foram os termos da descarga fluvial e difusão turbulenta, nas duas condições de maré, seguindo-se a circulação gravitacional na condição de sizígia e deriva de Stokes na quadratura. A importância deste mecanismo de transporte varia ao longo do tempo em resposta a variação das condições de maré. Nas duas condições de maré, o principal mecanismo de transporte é assumido pela descarga fluvial, porém não devido ao aporte de água doce no sistema e sim a conexão existente com os afluentes (Chipoca, Inhangulue e Macanga) e a precipitação verificada durante o período.

Quanto ao transporte do sal, o estuário dos Bons Sinais comportou-se como um importador do sal na condição de sizígia e exportador na condição de quadratura. Isso está relacionado com assimetria de velocidades das correntes de maré e a relevante amplitude de maré a qual está submetido. Portanto, mesmo sem medições diretas e quantitativas de material particulado em suspensão (MPS) no estuário dos Bons Sinais, pode-se através do comportamento hidrodinâmico e do transporte de sal, inferir o transporte de MPS de forma qualitativa.

A hidrodinâmica do EBS de acordo com a razão do fluxo, responde como um estuário altamente estratificado, dominado por rio. Esse resultado pode estar associado a precipitação verificada dias antes da coleta de dados. E, quanto ao número adimensional de Reynolds, o EBS é caracterizado por um regime totalmente turbulento com uma mistura intensificada. De modo geral, a descarga fluvial e maré são destacados como as principais forçantes físicas que controlam a hidrodinâmica do estuário dos Bons Sinais.

Assim, de acordo com número adimensional de Richardson, o estuário mostrou a dominância da estratificação sobre a turbulência na maré de sizígia e quadratura, embora nessa última registrou-se mais momentos de estabilidade na coluna de água. Por fim, a partir do diagrama de Estratificação-Circulação proposto por Hansen & Rattray (1966), constata-se que o estuário é verticalmente homogêneo (1a) com transporte de sal realizado por difusão turbulenta tanto em condição de sizígia, quanto em quadratura.

## **6.2. Recomendações**

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Que se analise os mecanismos do transporte de sal em duas estações diferentes, estação seca e chuvosa, com intuito de analisar a influência da variação sazonal no transporte;
- Que se inclua a influência do vento no transporte do sal no estuário de Bons sinais, de modo a aferir a sua influência.

## Referências Bibliográficas

- Bérgamo, A. L. (2000). *Características da Hidrografia, Circulação e Transporte do Sal: Barra de Cananéia, Sul do Mar de Cananéia e Baía do Trapandé*. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- Bianchi, T. (2007). *Biogeochemistry of estuaries*. New York: Oxford University Press.
- Bonetti Filho, J., & Miranda, L. (1997). *Estimativa da descarga de água doce no sistema estuarino lagunar de Cananéia-Iguape*. Braasil: Instituto de Oceanográfico.
- Bowden, K. (1967). *Circulation and Diffusion*. Washigton: American Association of the Advancemant.
- D'Aquino, C. d. (2010). *Processos de Transporte e retenção de sedimentos finos em estuários dominados por rios*. Porto Alegre: Instituto de geociências-Universidade Federal do Rio Grande Sul.
- D'Aquino, C., Silva, F. d., Couceiro, M., & Pereira, M. (2011). *Transporte de Sal e Hidrodinâmica do Estuário do Rio Tubarão*. Brasil.
- Delgado, A. L. (2011). *Caracterização Hidrodinâmica e Sedimentar do Estuário do Rio Minho*. Portugal.
- Dyer, K. (1973). *Estuaries: A Physical Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Dyer, K. (1997). *Estuaries: A Physical Introduction*. New York: John Wiley & Sons.
- Ferraz, T. M. (2009). *Estudo da Renovação da água no Estuário do Bons Sinais a partir do Modelo de Prisma de Marés e Fracção de água doce*. Quelimane: UEM-Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras.
- Ferraz, T. M. (2014). *ESTUDO DA HIDRODINÂMICA E RENOVAÇÃO DA ÁGUA NO ESTUÁRIO DOS BONS SINAI*. Quelimane : Universidade Eduardo Mondlane\_ESCMC.
- Ferreira, G. P. (2013). *HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA REGIÃO FLUVIO-ESTUARINA DO RIO PARACAUARI*. ILHA DE MARAJÓ.
- Franklin-Silva, L., & Schettini, C. (2003). *AVALIAÇÃO DA DINÂMICA LATERAL E DOS MECANISMOS DE TRANSPORTE NO ESTUÁRIO DO RIO CAMBORIÚ*. Brasil: Universidade do Vale do Itajaí.

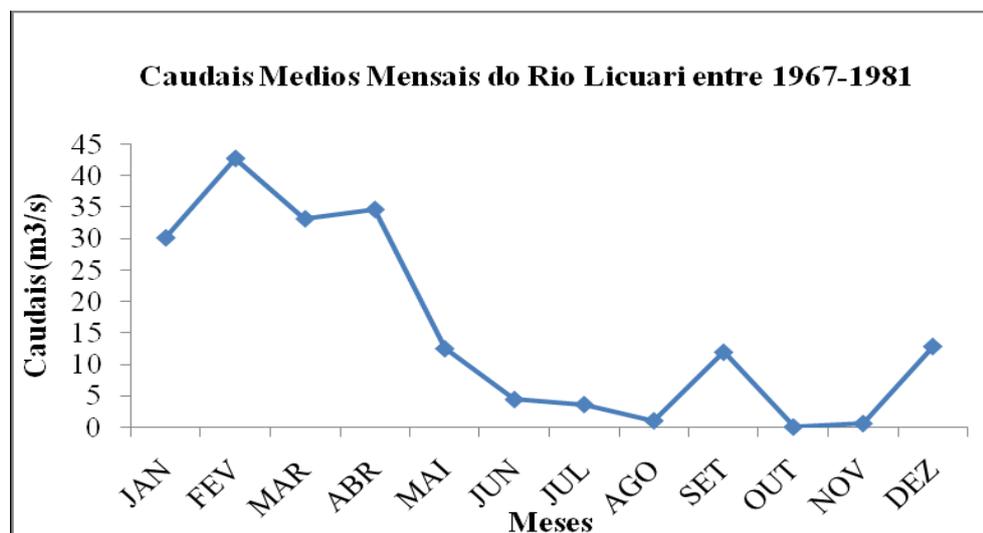
- Freitas, P. P. (2013). *ASPECTOS HIDRODINÂMICOS DO ESTUÁRIO DO RIO COCÓ, FORTALEZA, CEARÁ, BRASIL*. Fortaleza.
- Hobbie, J. (2000). *Estuarine science: the key to progress in coastal ecological research*. Washington, DC: Island Press.
- Hoguane, A. M., Gammelsrød, T., Mazzilli, S., António, M. H., & Silva, N. B. (2020). *The hydrodynamics of the Bons Sinais Estuary: The value of simple hydrodynamic tidal models in understanding circulation in estuaries of central Mozambique*. Regional Studies in Marine Science.
- Kennet, J. (1982). *Marine Geology*. EngleWood Cliffs: Prentice-Hall, Inc.
- Kjerfve, B. (1989). *Estuarine Characteristics, Circulation and Physical Processes*. Now York.
- Kjerfve, B. (1990). *Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems*. New Dehli: UNESCO/UNDP.
- Kurniawan, A., Hasan, G., Ooi, S., Kit, L., Loh, L., & Bayen, S. (2014). *Compreendendo as características do fluxo hidrodinâmico em um ecossistema modelo de mangue em Cingapura*. Cingapura: APCBEE.
- Lins, P. A. (2002). *Hidrologia e Hidrodinamica do Baixo Estuario do Rio Ipojuca*. Recife.
- Magestade, B. B. (2021). *MODELAGEM NUMÉRICA DA DINÂMICA DA MARÉ NO ESTUÁRIO DOS BONOS SINAIAS*. Quelimane: Dissertação de mestrado. Universidade Eduardo Mondlane\_ESCMC.
- Mazzilli, S. (2015). *Understanding Estuarine Hydrodynamics for Decision Making in data-poor Coastal Environments*. Inglaterra: Tese de Doutorado. Universidade de Cambridge.
- Miguel, L. L., Nehama, F. P., & Castro, J. W. (2017). *A MECÂNICA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO ESTUÁRIO DO RIO MACUSE, MOÇAMBIQUE, SUDESTE DE ÁFRICA*. Brasil: Revista Brasileira de Geomorfologia.
- Miranda, L., Castro, B., & Kjerfve, B. (2002). *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. . São Paulo: Universidade de São Paulo – EDUSP. .

- Muholove, M. E. (2019). *Hidrodinâmica e fluxo de sedimentos suspensos sob influência de maré no bairro dos pescadores no estuário dos bons sinais, Zambézia - Quelimane*. Quelimane : UEM- Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras.
- Officer, C. (1976). *Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters)*. New York : Wiley interscience.
- Paiva, B. P. (2020). *Hidrodinâmica e troca de materiais no estuário do rio São Francisco (AL/SE): efeitos da morfologia e barragens*. São Paulo: Tese de doutorado apresentada ao Instituto oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do grau de doutor em oceanografia geológica .
- Pereira, M. D. (2009). *Caracterização sazonal da hidrodinâmica e do transporte de material particulado em suspensão em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas*. Porto Alegre: Universidade Federal do rio grande sul.
- Pereira, M. D., Siegle, E., Miranda, L. B., & Schettini, C. A. (2010). *HIDRODINAMICA E TRANSPORTE DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO SAZONAL EM UM ESTUÁRIO DOMINADO POR MARÉ: ESTUÁRIO DE CARAVELAS (BA)*. Brasil: Revista Brasileira de Geofísica.
- Pritchard, D. (1952). *Estuarine Hydrography*. Advances in Geophysics.
- Rosman, P. (2010). *Modelagem de Hidrodinâmica Ambiental, Qualidade de Água e Processos Sedimentológicos em Rios Conexos à UHE Estreito*. Rio de Janeiro: Fundação Coppetec - Projeto PENO-10702 e CESTE - Consórcio Estreito Energia.
- Silva, A. F. (2011). *CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS DO ESTUÁRIO DA BEIRA, MOÇAMBIQUE*. Rio de Janeiro: COPPE.
- Souza, R. M. (2015). *CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E ESTIMATIVA DO TRANSPORTE DE SAL NO ESTUÁRIO DO RIO SÃO FRANCISCO - ALAGOAS*. Brasil: Universidade Federal de Alagoas.
- Stommel, H. (1953). *The role of density currents in estuaries*. *PROCEEDINGS: MINNESOTA INTERNATIONAL HYDRAULICS CONVENTION*. Minneapolis: University of Minnesota.

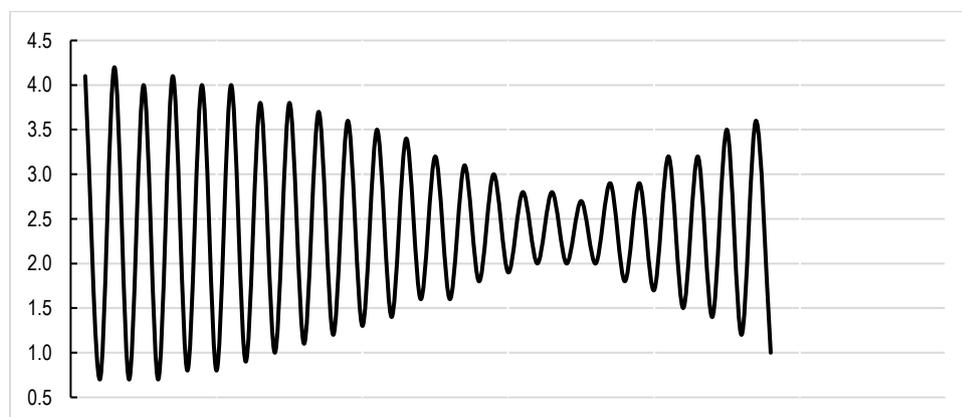
## Anexos

**Tabela 3:** Variação sazonal da temperatura, evaporação, precipitação, evapo-transpiração estimada, razão do escoamento superficial, Escoamento superficial e variação sazonal do aporte pluvial médio no EBS.

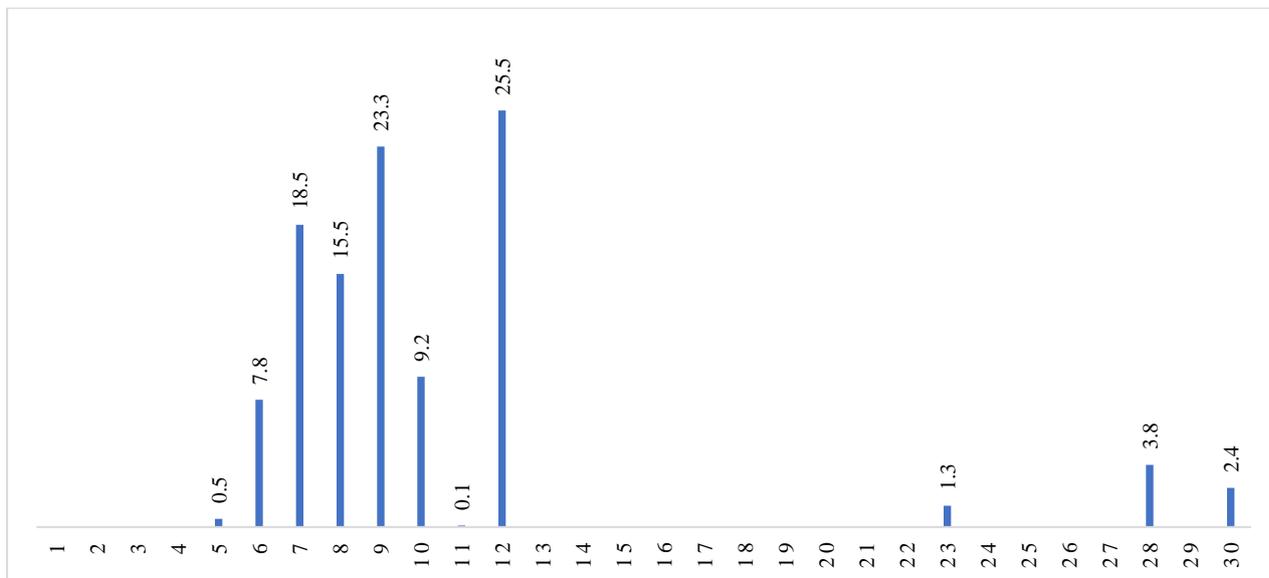
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T (°C)	27.8	27.6	27.2	25.6	23.4	21.6	21.2	22.2	24.2	25.9	27.4	24.9
T (K)	300.8	300.6	300.2	298.6	296.4	294.6	294.2	295.2	297.2	298.9	300.4	297.9
P (mm)	301.2	226.4	194.1	111.3	52.3	53.3	66.4	18.9	10.4	18.5	54.6	182.6
E (mm)	100.3	86.7	90.7	89.2	88.7	78.6	84.5	104.5	127.9	163.7	168.4	134.7
<b>E<sub>0</sub> (mm)</b>	144.9	139.5	138.3	128.6	117.3	108.1	111.0	114.0	124.2	134.3	143.8	135.8
$\Delta f/P$	0.618	0.540	0.491	0.315	0.106	0.132	0.188	0.002	0.000	0.001	0.072	0.475
$\Delta f$	186	122	95	35	6	7	12	0	0	0	4	87
<b>Q<sub>d</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	2.3	1.6	1.2	0.3	-0.4	-0.3	-0.2	-1.0	-1.3	-1.6	-1.3	0.5



**Figura 28:** Caudais médios mensais do rio Licuar entre 1967-1981



**Figura 29:** Variação da maré no estuário de Bons Sinais durante o período de amostragem, de 17 a 29 de julho de 2011, de acordo com dados da altura da maré extraídos na plataforma do instituto hidrográfico.



**Figura 30:** Precipitação diária do mês de julho de 2011 em mm/dia, com base nos dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) Quelimane.

**Tabela 4:** Proporção média diária (p) de horas de luz na latitude 17° S

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
p	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30

### Propriedades e variáveis físicas

$$T_s = \bar{\rho}(u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \bar{u}_s S_s + h_a \langle \bar{u}' s' \rangle + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle)$$

$T_s$  = Transporte total do sal

$u_a = \langle \bar{u} \rangle$  Valor estacionário do componente Ox de velocidade

$\langle \bar{S} \rangle = \bar{S}$  Valor médio na coluna de água de valores de salinidade estacionários

$h_a$  = Média da profundidade no tempo dada por  $\langle h \rangle$

$S_a = \langle \bar{S} \rangle$  Valor estacionário da salinidade

$h_t$  = Variação da coluna da água em um ciclo de maré

$u_t = \bar{u} - u_a$  Parcela Barotrópica da velocidade (Variação instantânea da média na profundidade em um ciclo de maré em relação a  $u_a$ )

$u_s = \langle u \rangle - u_a$  Parcela Baroclínica da velocidade (Variação da média da velocidade no tempo ao longo da coluna de água)

$u_s$  = Velocidade na superfície

$S_s = \langle S \rangle - S_a$  Parcela Baroclínica da Salinidade

$S_t = \bar{S} - S_a$  Parcela Barotrópica da Salinidade

$\bar{u}'$  = desvio médio da velocidade

$\bar{u}$  = Velocidade média na coluna de água

$\langle \bar{u} \rangle = u_a \approx u_f$  Valor estacionário do componente Ox de velocidade

$u_f, u_f(x, t)$  Velocidade gerada pela descarga fluvial ou de água doce

$\bar{\rho}$  = Densidade média na coluna de água

$s'$  = Desvio de salinidade, flutuação