



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Dissertação para obtenção do grau de Mestrado em Oceanografia Aplicada

**MASSAS DE ÁGUA E CIRCULAÇÃO RESIDUAL NO ESTUÁRIO DOS BONS SINAIS**

**Autora**

Anabela Colaço Cafermane



UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Dissertação para obtenção do grau de Mestrado em Oceanografia Aplicada

**Supervisor**

Professor Doutor, António Mubango Hogueane

---

Quelimane, Abril de 2021

**Dedicatória**

À minha família, em particular aos meus filhos.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida e por tudo que tem feito por mim;

Ao meu supervisor, Professor Doutor, António Mubango Hogueane, pelo seu apoio na produção desta dissertação;

Aos Mestres, Nataniel Naftal e Noca Bernado Furaca, pelos conselhos dados, apoio e acompanhamento na colecta de dados, processamento e obtenção dos resultados, reitero a minha gratidão a vós.

Ao Doutor, Avelino Ângelo Adolfo Langa, pela força e discricção de alguns resultados;

À minha mãe, Marziria Maurício, minha irmã Carlota Colaço Cafermane e aos meus filhos, Mujovo de Aberto Chal Lima e Jaime Manuel Pinto Júnior, pelo apoio moral compreensão, acima de tudo, pelo amor incondicional que sempre me proporcionaram.

Aos meus colegas do curso, Carlota Alves Emílio, Banito Magestade, Esmael Marimo, Cristecio Mundulai e Humberto Mabota pelo apoio, amizade durante este percurso, muitíssimo obrigada;

Aos meus amigos e colegas de trabalho que de forma directa ou indirectamente, contribuíram para a concretização desta dissertação vão os meus sinceros agradecimentos do fundo do coração, espero que continuem sendo mais compreensivos para com os demais.

Ao projecto Estuarize-WIO, WIOMSA e MASMA vai a minha gratidão pelo financiamento da bolsa e sinceramente espero que continue com o mesmo gesto aos demais estudantes com necessidades como eu, porque precisam.

**Declaração de honra**

Eu, **Anabela Colaço Cafermane**, declaro por minha honra que esta dissertação nunca foi apresentada numa outra Universidade para obtenção de qualquer grau académico e que ela constitui o resultado do meu trabalho individual. Cada ideia trazida de outros trabalhos foi devidamente citada e referenciada. Esta dissertação é apresentada na sequência do cumprimento dos requisitos para obtenção do grau de Mestrado em Oceanografia Aplicada, na Universidade Eduardo Mondlane.

---

**(Anabela Colaço Cafermane)**

## **Resumo**

As massas de água e circulação residual nos estuários fazem parte do conjunto de processos que determina a troca de calor, distribuição do sal e organismos biológicos à deriva neste ecossistema. Por essa razão o estudo das massas de água e circulação residual é relevante, tanto no âmbito científico bem como ecológico. O presente trabalho visou descrever a circulação residual das massas de água do estuário dos Bons Sinais e classificá-lo baseando-se na equação de Hansen e Rattray. Para a materialização do estudo foram usados dados sazonais medidos numa estação fixa durante um ciclo de maré e dados medidos ao longo do Estuário. Os resultados obtidos concernente, aos gradientes longitudinais da salinidade e densidade indicaram que, o estuário foi dominado pela água do rio durante a estação chuvosa e pelas marés durante a estação seca, e a coluna de água permaneceu parcialmente misturada nas duas estações. De realçar que os perfis verticais calculados pela média das marés da estação fixa do estuário revelaram: temperatura uniforme em toda a profundidade, mais quente durante a estação chuvosa; salinidade baixa e estratificada em profundidade durante a estação chuvosa, perfil homogêneo em profundidade durante as estações seca e de transição e densidade uniforme em profundidades mas, com valores elevados durante a estação seca. O perfil vertical da velocidade apresentou um modelo clássico de circulação de duas camadas, com fluxo a jusante intensificando na superfície e fluxo a montante no fundo, durante as estações chuvosa e de transição, quando há descarga de água doce no estuário. As velocidades de fluxo obtidas a partir do modelo calibrado de Hansen e Rattray se ajustaram aos dados observados, confirmando assim que a modelagem proposta pelo Hansen e Rattray é adequada para descrever o fluxo residual do Estuário de Bons Sinais.

**Palavras-chave:** Estuário, Gradiente de densidade da água, perfil vertical e horizontal, circulação residual, modelo de Hansen e Rattray.

## **Abstrat**

The water masses and residual circulation in the estuaries are part of the set of processes that determine heat exchange, salt distribution and biological organisms adrift in this ecosystem. This fact makes the study of water masses and residual circulation relevant for both the scientific community and ecological processes. The main objective of the present work was to understand the behavior of the water masses and the residual circulation pattern of the Bons Sinais estuary and to classify it based on the Hansen and Rattray equation. For the materialization of the study, seasonal data of water temperature, salinity and currents measured at a fixed station during a tide cycle and data measured across the Estuary were used. The result obtained concerning the longitudinal gradients in salinity and density indicated that the estuary was dominated by the river during the rainy season and by the tide during the dry season, but the water column remained partially mixed in both seasons. Tidally averaged vertical profiles of temperature and salinity of the fixed station of the estuary revealed uniform temperature throughout the depth, warmer during the rainy season; lower salinity and stratified in depth during the rainy season, vertical homogeneous during the dry and transition seasons; and uniform density in depths but with high values during dry seasons. The vertical velocity profile presented a classic two-layer circulation model, with downstream flow intensifying on the surface and upstream flow at the bottom, during the rainy and transition seasons, when fresh water is discharged into the estuary. The flow velocities obtained from the calibrated Hansen and Rattray model adjusted to the observed data, confirming that the model proposed by Hansen and Rattray is adequate to describe the residual flow of the Bons Sinais Estuary.

**Key words:** Estuary, water density gradient, vertical profile and horizontal, residual circulation, Hansen and Rattray model.

## Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Objectivos.....	2
2. Metodologia .....	4
2.1. Área de Estudo.....	4
2.2. Materiais e método .....	5
2.3. Determinação grau de estratificação no Estuário .....	6
2.4. Cálculo de Residual Vertical de Temperatura, Salinidade, Densidade e Velocidade .....	7
2.5. A classificação do estuário através da equação/modelo de Hansen & Rattray.....	<b>Erro!</b>
<b>Marcador não definido.</b>	
3. Resultados .....	10
3.1. Variação temporal da temperatura de água, salinidade, densidade velocidade e anomalia de energia potencial na época seca (30 de Novembro de 2012), chuvosa (06 de Março de 2013) e intermediária (28 de Abril de 2013) .....	10
3.2. Variação espacial da temperatura de água, salinidade, oxigénio e velocidade na época seca (14 de Dezembro de 2016) e chuvosa (28 de Abril de 2017).....	13
3.3. Perfis verticais de temperatura de água, salinidade, densidade e velocidade na época seca (30 de Novembro de 2012), chuvosa (06 de Março de 2013) e intermediaria (28 de Abril de 2013)	17
3.4. Perfis verticais de temperatura de água, salinidade, e velocidade na época seca (14 de Dezembro de 2016) e chuvosa (28 de Abril de 2017).....	18
3.5. Tabela das estatísticas das observações, comparadas com as velocidades modeladas pelas equações ajustadas de Hassan e Rattray e a estimativa das observações .....	21
3.6. Simulação da velocidade de fluxo vertical, com base na Equação de Hansen e Rattray ....	23
4. Discussão dos resultados.....	24
5. Conclusão.....	27
6. Referencias Bibliograficas .....	28



## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Área de estudo. Os círculos vermelhos indicam estações de colheita de amostras com o CTD. Os triângulos pretos são estações de medição das correntes, usando o correntómetro.....	4
<b>Figura 2.</b> Variação temporal da temperatura de água oC, salinidade ppm, densidade kg m-3, velocidade cm s-1 e anomalia de energia potencial J m-3 em profundidade normalizada, na Estação fixa CTD5 no dia 30 de Novembro de 2012. ....	11
<b>Figura 3.</b> Variação temporal da temperatura de água (oC), salinidade, densidade (kg m-3), velocidade (cm s-1) e anomalia de energia potencial (J m-3) em profundidade normalizada, na Estação fixa CTD5 no dia 6 de Março de 2013.....	12
<b>Figura 4.</b> Variação temporal da temperatura de água (oC), salinidade, densidade (kg m-3), velocidade (cm s-1) e anomalia de energia potencial (J m-3) em profundidade normalizada, na Estação fixa CTD5 no dia 28 de Abril de 2013.....	13
<b>Figura 5.</b> Variação espacial da temperatura de água (oC), salinidade, velocidade (cm s-1) e oxigénio (uM) em profundidade normalizada, ao longo do estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016) e época chuvosa (28 de Abril de 2017) .....	15
<b>Figura 6.</b> Variação espacial do oxigénio (uM) e velocidade (cm s-1) em profundidade normalizada, ao longo do estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016) e época chuvosa (28 de Abril de 2017) .....	16
<b>Figura 7.</b> Perfis de temperatura, salinidade, densidade e velocidade média das marés medidos na Estação 5 durante as épocas seca (novembro de 2012), chuvosa (março de 2013) e transição (abril de 2013). ....	18
<b>Figura 8.</b> Perfis de temperaturas médias em (°C) das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016) .....	19
<b>Figura 9.</b> Perfis de temperaturas médias em (°C) das marés medidos ao longo do Estuário na época chuvosa, (28 de Abril de 2017) .....	19
<b>Figura 10.</b> Perfis de salinidade média das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016) .....	20
<b>Figura 11.</b> Perfis de salinidade média das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (28 de Abril de 2017).....	20
<b>Figura 12.</b> Perfis de velocidade (m/s) média das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016) .....	21
<b>Figura 13.</b> Perfis de velocidade (m/s) média das marés medidos ao longo do Estuário na época Chuvosa (28 de Abril de).....	21
<b>Figura 14.</b> Comparação do fluxo residual estimado pela equação de Hansen e Rattray com a estimativa das observações. ....	23
<b>Figura 15.</b> Simulação da velocidade de fluxo vertical, com base na Equação 26. $U_r$ é o fluxo residual; $U_g$ é o fluxo gravitacional; $U$ é a soma de $U_r$ e $U_g$ . ....	24

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1. Posições das estações oceanográficas no Estuário dos Bons Sinais em 2016 e 2017. As medições de perfis verticais de temperatura, salinidade, densidade e velocidade foram feitas na Estação CTD 5 em 2012 (31 de Novembro) e 2013 (6 de março e 28 de Abril).....	5
Tabela 2. Resultados estatísticos do ajuste das observações e da solução analítica de Hansen e Rattray. ....	22

## **1. Introdução**

Os estuários podem ser considerados como sendo, corpos de água semi-fechados bastante dinâmicos que sofrem influências das marés, correntes de maré, tensão de vento e descargas fluviais em combinação com as alterações relativas do nível do mar. Portanto, os processos físicos que controlam os ambientes estuarinos, nomeadamente as misturas, tanto transversais bem como as misturas longitudinais e a circulação são em grande parte conduzidos pelas marés e pelas descargas fluviais (Hoguane *et al.*, 2020).

Desta forma, sendo os estuários ambientes que sofrem influências de águas costeiras, com baixa salinidade e oceânicas com salinidade alta, durante a convergência dessas duas massas de água com teores de salinidades diferentes, é induzida a circulação devido ao gradiente de densidade (Marone *et al.*, 1995).

Neste sentido, a circulação gerada pela diferença de densidade é caracterizada pela presença de águas continentais na superfície e oceânicas na região profunda. A presença da circulação devido a diferença de densidade é extensiva ao estuário dos Bons Sinais (António, 2012).

Entretanto, o estuário dos Bons Sinais, não é uma exceção neste contexto, pois dispõe dessas características da presença de águas continentais e oceânicas, o que consubstancia a diferença da densidade.

Nos estuários, para além da circulação gerada pelo gradiente de densidade é também observada a circulação residual. Circulação causada por um lado, pela diferença de densidade entre as águas do continente e do oceano (Hanssen, 1966), e, por outro, considerada como resultante da interação dos campos da densidade, descarga dos rios e da ramificação não lineares das marés periódicas (António, 2012). A circulação residual torna-se importante pelo facto de permitir trocas de calor, distribuição espacial de nutrientes, dispersão de ovos e larvas entre a região costeira e o ambiente marinho, condicionando desta forma a produtividade primária e a produção pesqueira (Hoguane, *et al.*, 2020).

De realçar que a circulação residual em referencia, observa-se devido esta presença das águas continentais e oceânicas, o que possibilita de forma directa a circulação residual que condicionam o *habitat* dos seres vivos no ambiente aquático.

Para além disso, o conhecimento dos processos envolvidos na hidrodinâmica estuarina é de extrema importância na medida em que estes definem a funcionalidade destes ecossistemas, que inclui a taxa de renovação e mistura das massas de água (Thrush *et al.*, 2004; Hoguane *et al.*, 2020).

A região de que o estuário dos Bons Sinais faz parte (Banco de Sofala), é caracterizada por massas de água dominadas pela combinação de águas continentais e águas oceânicas. É pertinente o estudo das massas de água em estuários, especificamente sob ponto de vista ecológico pela influência que as mesmas têm na distribuição e abundância de espécie que coabitam neste ecossistema (Machaieie, 2012).

Pelo facto de estabelecer-se uma importância ecológica e científica entre a circulação residual e as massas de água, pretende-se no presente estudo analisar as Massas de Água e Circulação Residual no Estuário dos Bons Sinais.

O modelo de circulação residual desenvolvido no presente estudo pode ser aplicado para estimar a distribuição de larvas e prever o recrutamento se for conhecida a densidade de larvas na coluna de água, também poderia ser usado para prever o recrutamento, baseado no fato de que algumas larvas de peixe e crustáceo apresentam uma distribuição vertical de acordo com a estrutura vertical da coluna de água e com o ciclo dia-noite ou com o efeito da luz e, portanto, sujeitas a um transporte passivo distinto.

Por exemplo, Garrison (1999), estudando o comportamento de migração vertical e transporte de larvas em caranguejos brachyuran no rio York, observou que as larvas de Ocypodid exibiram comportamento mais próximas da superfície durante as vazantes, as larvas Pinnotherid foram as mais próximas à superfície durante a noite e durante as marés a vazante, as larvas Panopeid estavam perto do fundo durante as marés iniciais, perto das profundidades médias durante o final das enchentes e início das vazantes, e mais próximo da superfície durante as finais das vazantes, e concluiu-se que esses padrões comportamentais deveriam resultar em distribuições horizontais distintas que correspondia às correntes residuais na coluna de água diferente; e observou que o efeito combinado das larvas e os mecanismos de transporte podem influenciar fortemente no sucesso do recrutamento.

## **1.1.Objectivos**

### **Objectivo Geral**

O objectivo geral do presente trabalho é, estudar a circulação residual no Estuário dos Bons Sinais.

### **Objectivos Específicos**

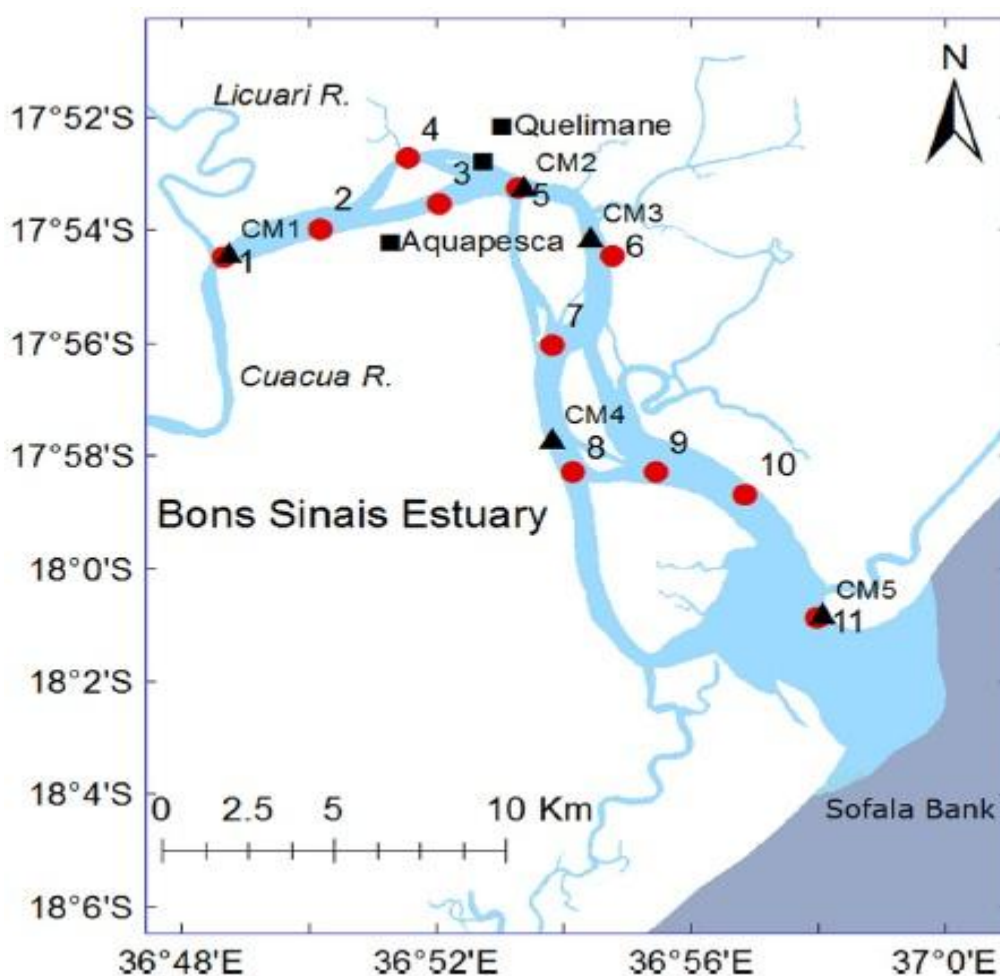
Para a materialização do objectivo principal deste trabalho foram traçados os seguintes objectivos específicos:

- Determinar a variação sazonal da temperatura, salinidade, oxigénio e densidade com a maré;
- Avaliar o grau de estratificação do estuário;
- Estimar a velocidade residual no Estuário dos Bons Sinais.

## 2. Metodologia

### 2.1. Área de Estudo

O Estuário dos Bons Sinais localiza-se na zona centro de Moçambique, na costa oriental de África, entre as Latitudes 17°54' e 18°01' Sul e Longitudes 36°49' e 36°58' Este (Figura 1). Tem aproximadamente 30 km de comprimento, estendendo-se da confluência dos rios Cuacua e Licuari, até a foz, desaguando no Oceano Índico no Banco de Sofala, com 1,5km de largura e 15m de profundidade médias. O estuário apresenta elevada concentração de sedimentos suspensos com fundo lodoso. A elevada carga de sedimentos determina a dinâmica da morfologia, caracterizada pela formação e destruição de ilhas e bancos. O estuário meandra com quatro ilhas principais, orientadas longitudinalmente ao longo do estuário, limitado por densa floresta de mangal.



**Figura 1.** Área de estudo. Os círculos vermelhos indicam estações de colheita de amostras com o CTD. Os triângulos pretos são estações de medição das correntes, usando o correntómetro (Hoguane et al., 2020).

## 2.2. Materiais e método

O estudo foi feito usando dados históricos dos anos de 2012 e 2013 medidos numa posição fixa (CTD5), onde foram feitas medições da temperatura, salinidade e velocidade da corrente da água em profundidade de 30 em 30 minutos, por meio do correntómetro RCM (*Seaguard de Anderaa*).

De referir que, esses dados permitiram definir o grau de estratificação da coluna de água, os perfis verticais do gradiente da densidade e da velocidade da corrente, durante o ciclo de marés. Nos dias 14 de Dezembro de 2016 e 28 de Abril de 2017 foram colhidos dados em 10 posições oceanográficas distribuídas longitudinalmente na área de estudo (**Tabela 1**), e a determinação das coordenadas da localização foi feita por um GPS III *plus* (*Geographic Positioning System*).

Em cada estação foram feitas medições de temperatura, salinidade, oxigénio e velocidade de água em profundidade através de um CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*). Esses dados permitiram descrever a distribuição espacial da temperatura e salinidade ao longo do estuário.

**Tabela 1.** Posições das estações oceanográficas no Estuário dos Bons Sinais em 2016 e 2017. As medições de perfis verticais de temperatura, salinidade, densidade e velocidade foram feitas na Estação CTD 5 em 2012 (31 de Novembro) e 2013 (6 de março e 28 de Abril)

<i>Posição</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
<i>CTD1</i>	17° 15' 16" S	36° 14' 85" E
<i>CTD2</i>	17° 15' 35" S	36° 14' 51" E
<i>CTD3</i>	17° 15' 83" S	36° 14' 55" E
<i>CTD4</i>	17° 15' 52" S	36° 14' 85" E
<b><i>CTD5</i></b>	<b>17° 15' 33" S</b>	<b>36° 15' 65" E</b>
<i>CTD6</i>	17° 15' 98" S	36° 15' 68" E
<i>CTD7</i>	17° 16' 12" S	36° 15' 35" E
<i>CTD8</i>	17° 16' 52" S	36° 15' 98" E
<i>CTD9</i>	17° 16' 52" S	36° 15' 98" E
<i>CTD10</i>	17° 16' 15" S	36° 16' 97" E
<i>CTD11</i>	17° 19' 67" S	36° 16' 32" E

Os perfis verticais da temperatura, salinidade, densidade, velocidade e anomalia de energia potencial foram obtidos com auxílio dos seguintes programas Excel e Ocean DataView (ODV). De realçar que, o grau de estratificação foi determinado pelas equações que abaixo se indicam.

### 2.3. Determinação do grau de estratificação no Estuário

O grau de estratificação no Estuário foi determinado por meio de anomalia de energia potencial da coluna de água. A energia potencial da água numa determinada profundidade ( $EP_s$ ), como é apresentada por (Ibraimo, 2004 e Simpson, 1990):

$$EP_s = \rho g z \quad [4]$$

Onde:  $\rho$  é a densidade de água,  $g$  é a aceleração devido a gravidade,  $z$  é o nível na coluna de água, medido no nível médio do mar e negativo em profundidade.

A energia potencial de mistura nessa profundidade ( $EP_m$ ) é dada por:

$$EP_m = \hat{\rho} g z \quad [5]$$

Onde:  $\hat{\rho}$  é a densidade média na coluna de água. Assim, a anomalia de energia potencial, ou seja, a energia necessária para misturar a água em cada profundidade da coluna de água ( $\phi_z$ ) que é dada por:

$$\phi_z = EP_m - EP_s \quad [6]$$

E a anomalia em toda a coluna de água, ou seja a energia necessária para misturar toda coluna de água ( $\phi$ ), que corresponde à solução numérica é dada pela seguinte fórmula:

$$\phi = \frac{\Delta z}{h} \sum_{z=-h} \phi_z \quad [7]$$

Onde:  $h$  é a profundidade;  $\Delta z$  é o intervalo entre as medições em profundidade. Para o caso em que o intervalo de profundidade é constante, a equação acima [7] pode ser reescrita ou representada da seguinte maneira:

$$\phi = \frac{\sum_{z=-h} \phi_z}{N} \quad [8]$$

Onde: N = número total de medições



## 2.4. Cálculo de Residual Vertical de Temperatura, Salinidade, Densidade e Velocidade

Os perfis residuais de Temperatura (T), Salinidade (S), Densidade ( $\rho$ ) e Velocidade (V) foram analisados a partir de dados medidos no ponto fixo CTD5 no período de ciclo de marés; de baixa-mar à baixa-mar.

Para o cálculo das residuais, primeiro achou-se a média dos valores médios de seguida fez-se a subtração do valor médio em profundidade.

Obtido o valor médio em cada profundidade, obteve-se assim a residual de cada parâmetro em profundidade a partir das seguintes equações:

$$\bullet V_r = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} V dt \quad [9a]$$

$$\bullet T_r = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} T dt \quad [9b]$$

$$\bullet S_r = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} S dt \quad [9c]$$

$$\bullet \rho_r = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \rho dt \quad [9d]$$

Onde:  $\tau = 12.42h$  é o período da maré.

A solução analítica de Hansen & Rattray (1965) foi usada para determinar as correntes residuais. A equação de momento, para 2-D x e z, é definida pelo equilíbrio entre o gradiente de pressão (gradientes barotrópicos e baroclínicos) e a divergência de tensão [10]: onde x [m] é a posição ao longo do canal, medida a partir da superfície, z [m] é o nível de água na coluna da água medido da superfície e negativo para baixo,  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] é a densidade da água, p [N.m<sup>2</sup>] é a pressão, k [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] é a viscosidade turbulenta, u [m] é a velocidade ao longo do canal.

Foi considerando o balanço entre força de pressão e stress interno:  $\frac{\delta P}{\delta x} = \frac{\delta \tau}{\delta z}$  [10]

Suponhamos que:  $\frac{\delta \rho}{\delta x} = \Phi$  [11] e  $\frac{\delta \rho}{\delta x} = 0$  [12]  $\frac{\delta \eta}{\delta x} = \psi$  [13]

Considerando águas pouco profundas:  $\rho_z = \text{Constante}$ . Se,  $P = g\rho(z - \eta)$  [14]

de onde:  $P = g\rho z - g\rho\eta$  [14a] e  $\frac{\delta P}{\delta x} = \eta g \frac{\delta \rho}{\delta x} - g\rho \frac{\delta \eta}{\delta x}$  [14b], substituindo [11] e [13],

obtemos:  $\frac{\delta P}{\delta x} = \eta g \Phi - g\rho \psi$  [14c]

Considerando:  $\tau = -\rho N_z \frac{\delta u}{\delta z}$  [15], de onde,  $\frac{\delta \tau}{\delta z} = -\rho N_z \frac{\delta^2 u}{\delta z^2}$  [16] e substituindo [14c] e [16] temos:  $\eta g \Phi - g \rho \psi = \rho N_z \frac{\delta^2 u}{\delta z^2}$  [18].

A Equação [18] pode ser apresentadas da seguinte forma:  $\frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi - \frac{g \rho}{\rho N_z} \psi = \frac{\delta^2 u}{\delta z^2}$  [19] E, usando a primeira integral teremos:  $\int \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \delta z = \int \frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi \delta z - \int \frac{g}{N_z} \psi \delta z$  [20].

O que resulta em:  $\frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi z - \frac{g}{N_z} \psi z + A$  [21].

Para segunda integral o resultado será:  $u = \frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi z^2 - \frac{g}{N_z} \psi z^2 + Az + B$  [22].

Usando as condições de fronteira em que:  $z = 0$  e  $u = 0$  teremos:  $0 = \frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi (-h^2) - \frac{g}{N_z} \psi (z^2) + B$  [23]

De onde:  $B = -\frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi h^2 + \frac{g}{N_z} \psi h^2$  [23a]

No fundo, a  $z = h$ , substituindo a equação [23a] na [22] teremos:  $u = \frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi h^2 - \frac{g}{N_z} \psi h^2 + Az - \frac{\eta g}{\rho N_z} \Phi h^2 + \frac{g}{N_z} \psi h^2$  [24] usando a regra de simplificação teremos:

$u = Az$  [25] e  $u = Ah$  [25a] de onde  $A = \frac{u}{h}$  [25b]

Sabendo que a descarga do rio (R) estabelece o transporte residual devido as marés cíclicas, ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$R = \frac{g \chi h^3}{3 N_z} + \frac{g \phi h^4}{8 N_z \rho} \quad [26]$$

Considere:  $R = \int_{-h}^0 u dz$

Fazendo a combinação entre (24) e (26) teremos a solução da Dinâmica de Hansen-Rattray Equação 27.

$$u(y) = \frac{g \phi h^3}{48 N_z \rho} (1 - 9y^2 - 8y^3) - \frac{3 R}{2 h} (y^2 - 1) \quad (27)$$

A Dinâmica de Hansen-Rattray nos deu o perfil da velocidade que descreveu a circulação devido a diferença na densidade (1º termo) e correntes residuais (2º termo).

Onde:

$$y = \frac{z}{h} \quad (\text{Profundidade normalizada que varia de } (0 \text{ a } 1))$$

$$u_0 = \frac{R}{h} \quad (28)$$

$$u_s = \frac{g\phi h^3}{48N_z\rho} \quad (29) \quad (u_s = \text{velocidade Superficial})$$

Substituindo as equações 27 e 28 na 26, a solução da Dinâmica de Hansen-Rattray pode-se escrever calculando a média das marés de todas as variáveis e assumindo um gradiente de salinidade horizontal constante e viscosidade turbulenta média das marés constantes,  $k$ , o perfil vertical da velocidade submaré ao longo do canal sem efeitos do vento foi obtido a partir da equação de Geyer & MacCready (2014):

$$U = U_r (1.5 - 1.5\zeta^2) + U_g (1 - 9\zeta^2 - 8\zeta^3) \quad [26]$$

Onde:  $U$  [m] é a velocidade observada com a profundidade, positivo para vazão (inundação),  $U_r$  [m.s<sup>-1</sup>] é a velocidade residual,  $U_g$  [m.s<sup>-1</sup>] é a velocidade gravitacional,  $\zeta = \frac{z}{h}$  é a profundidade normalizada e  $h$  [m] é a profundidade local. A equação [26] foi calibrada por análise de regressão linear usando a velocidade observada, para estimar  $U_r$  e  $U_g$ .

### **3. Resultados**

#### **3.1. Variação temporal da temperatura de água, salinidade, densidade velocidade e anomalia de energia potencial na época seca**

As (**Figura 2, Figura 3 e Figura 4**) apresentam variações temporais da temperatura de água, salinidade, densidade velocidade e anomalia de energia potencial em profundidade normalizada, na Estação Fixa CTD5, no Estuário dos Bons Sinais, no período seco, intermédio e chuvoso. A velocidade da corrente foi considerada positiva para enchente, i.e. para montante.

Durante o período seco, Novembro de 2012 (**Figura 2**), a temperatura de água variou de 28,4°C a 30°C; apresentando assim temperaturas baixas, com temperaturas menores que 28,85°C, na camada do fundo, de manhã, cerca das 10horas e durante a maré vazante. Esta baixa temperatura pode ser da água proveniente dos pântanos de mangal que tenha arrefecido durante a noite.

Enquanto, pelas 14horas a água apresentou-se quente na superfície, com temperaturas maiores que 29°C, provavelmente devido ao aquecimento da camada superficial pela irradiação solar. Depois das 18horas, a camada superficial apresentava baixas temperaturas menores que 28,85°C, provavelmente devido ao arrefecimento superficial durante o período da tarde e do início da noite.

Em consonância com a análise feita, concluiu-se que a salinidade apresentava valores relativamente baixos, menores que 34,4 PSU, no período de manhã, até às 13horas, possivelmente pela influência de água pouco salina durante a maré vazante.

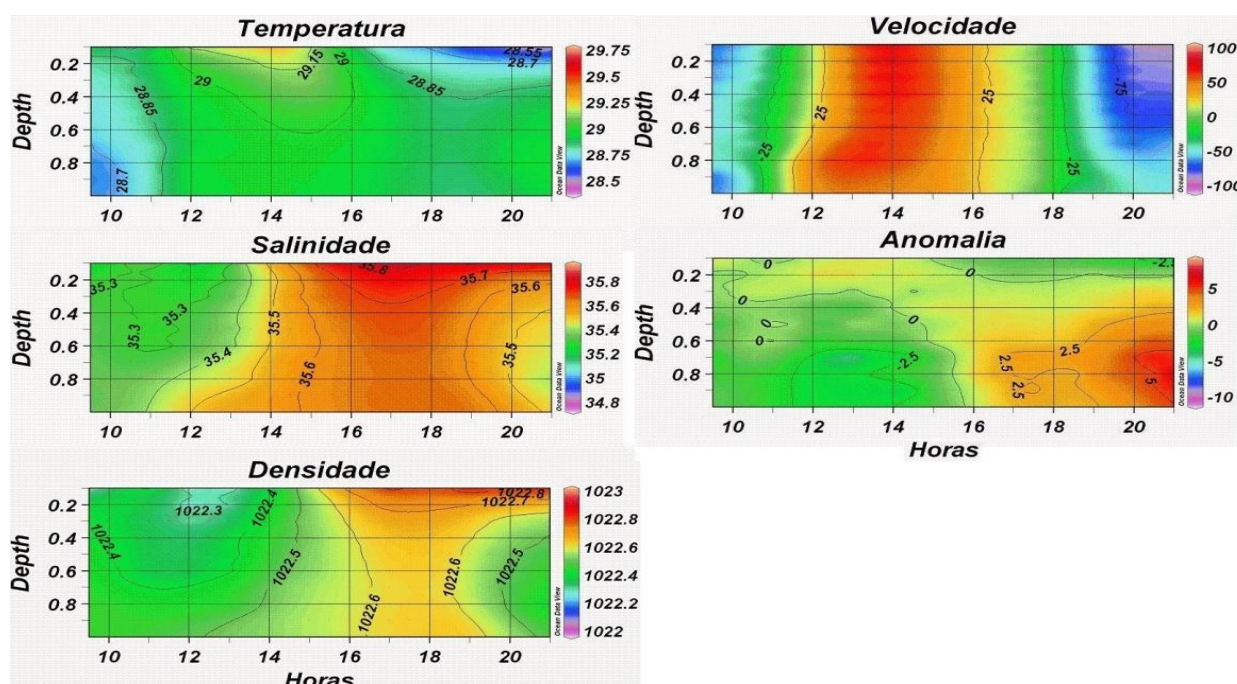
É notável que, entre 12 e 14horas, no pico da corrente de enchente, verifica-se intrusão de água oceânica por baixo de menos salinidade. Máxima salinidade, maior que 35,6 PSU é observada na preia-mar, por volta das 16 as 17horas. Durante a vazante, das 18 as 21horas, verifica-se salinidade elevada maior que 35,7 na superfície, que se considera água proveniente dos pântanos de mangais, que devido a evaporação e lixiviação de sais nos pântanos, durante o dia, eleva-se a sua salinidade.

A densidade de água variou entre 1022 e 1023 kg m<sup>-3</sup>. A variação de densidade segue o padrão da salinidade, com valores baixos e altos onde a salinidade é baixa e alta, respectivamente.

A magnitude da velocidade atingiu cerca de 100cm s<sup>-1</sup>, com pouca assimetria vertical e entre a enchente e vazante.

A anomalia de energia potencial foi da ordem de zero na maioria do tempo, principalmente durante a vazante e enchente; valores superiores a 2,5 J m<sup>-3</sup> foram observados durante a preia-mar e durante a vazante, provavelmente estabelecido pelo gradiente de salinidade entre água mais salgada dos

pântanos de mangais e menos salina proveniente dos rios. As variações verticais nas propriedades de água são praticamente desprezíveis.



**Figura 2.** Variação temporal da temperatura de água  $^{\circ}\text{C}$ , salinidade ppm, densidade  $\text{kg m}^{-3}$ , velocidade  $\text{cm s}^{-1}$  e anomalia de energia potencial  $\text{J m}^{-3}$  em profundidade normalizada, na Estação fixa CTD5 no dia 30 de Novembro de 2012.

Durante o período chuvoso, Março 2013 (Figura 3), a temperatura de água variou de  $29$  a  $31^{\circ}\text{C}$ , com uma bolsa de água fria, menor que  $29^{\circ}\text{C}$ , a superfície, no período de manhã, das 6 as 8 horas, provavelmente devido ao arrefecimento da camada superficial durante a noite; uma camada de água quente maior que  $30^{\circ}\text{C}$  na superfície entre as 10 e 17 horas, ocasionado possivelmente pelo aquecimento superficial durante o dia.

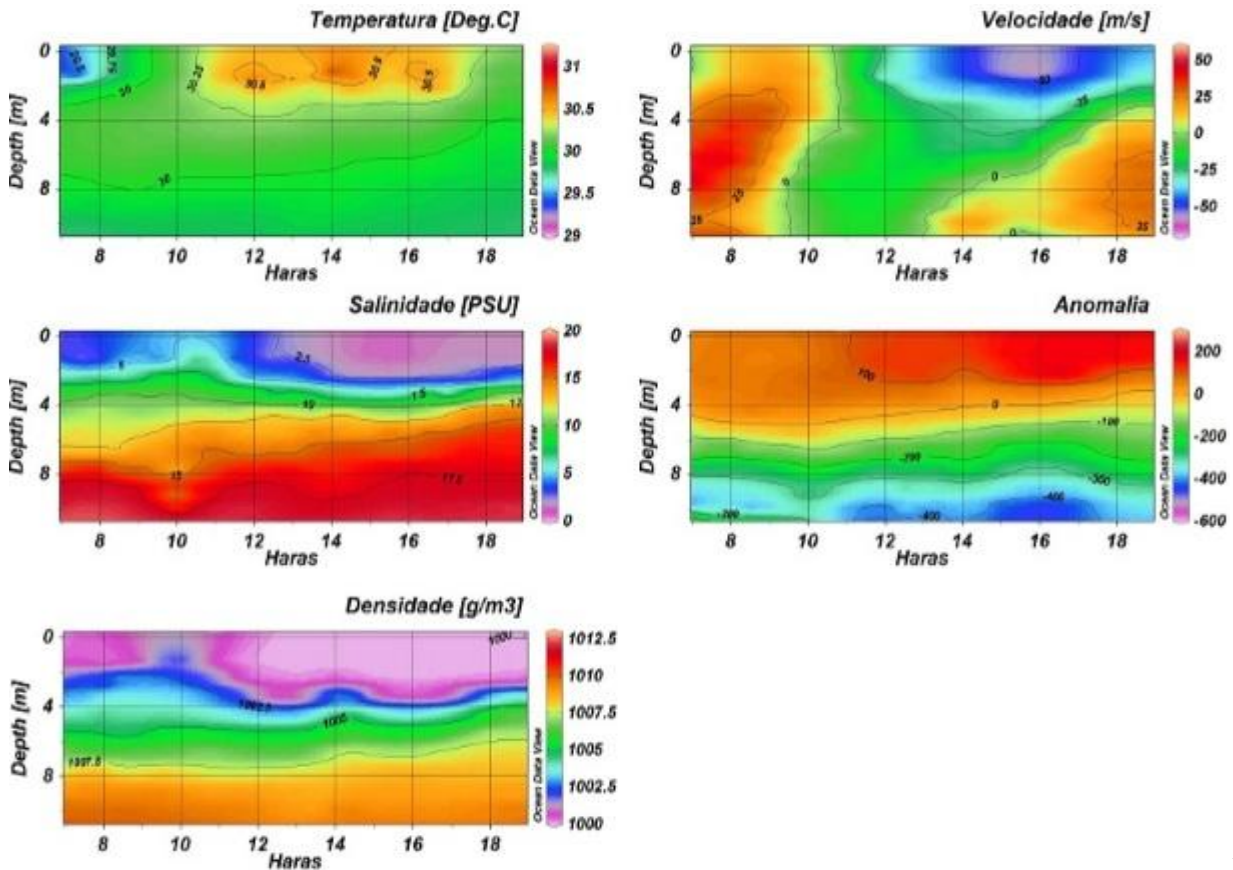
A salinidade variou entre 2 e 20, face a isso, apresenta-se uma clara estratificação vertical, e nos valores mais baixos de salinidade, menores que 5 foi observado na superfície, das 12 até ao fim das observações, isto é, as 18 horas, período em que ocorreu a vazante, e que coincidiu com a estratificação vertical mais elevada (18 pela profundidade inteira).

A densidade de água variou seca cerca de  $1000 \text{ Kg m}^{-3}$  na superfície valores de água doce e  $1007.5$  no fundo, apresentando pouca variação na profundidade e no tempo.

A magnitude da velocidade atingiu cerca de  $60 \text{ cm s}^{-1}$ , sendo que o período das 6 até as 10 horas foi caracterizado pela enchente e das 11 até as 18 horas pela vazante. De realçar que, observou-se

variação vertical na velocidade, com velocidades mais elevadas na superfície, e, durante a vazante observou-se que a camada superficial se deslocava para jusante e a camada do fundo para montante.

As velocidades de vazante foram mais fortes que as de enchente, sugerindo assimetria de marés. A anomalia de energia potencial nas camadas superficiais foi cerca de  $-6 \text{ J m}^{-3}$ , diminuindo ligeiramente com a profundidade até atingir valor de  $0 \text{ J m}^{-3}$ , o que sugere uma coluna de água parcialmente estratificada.



1

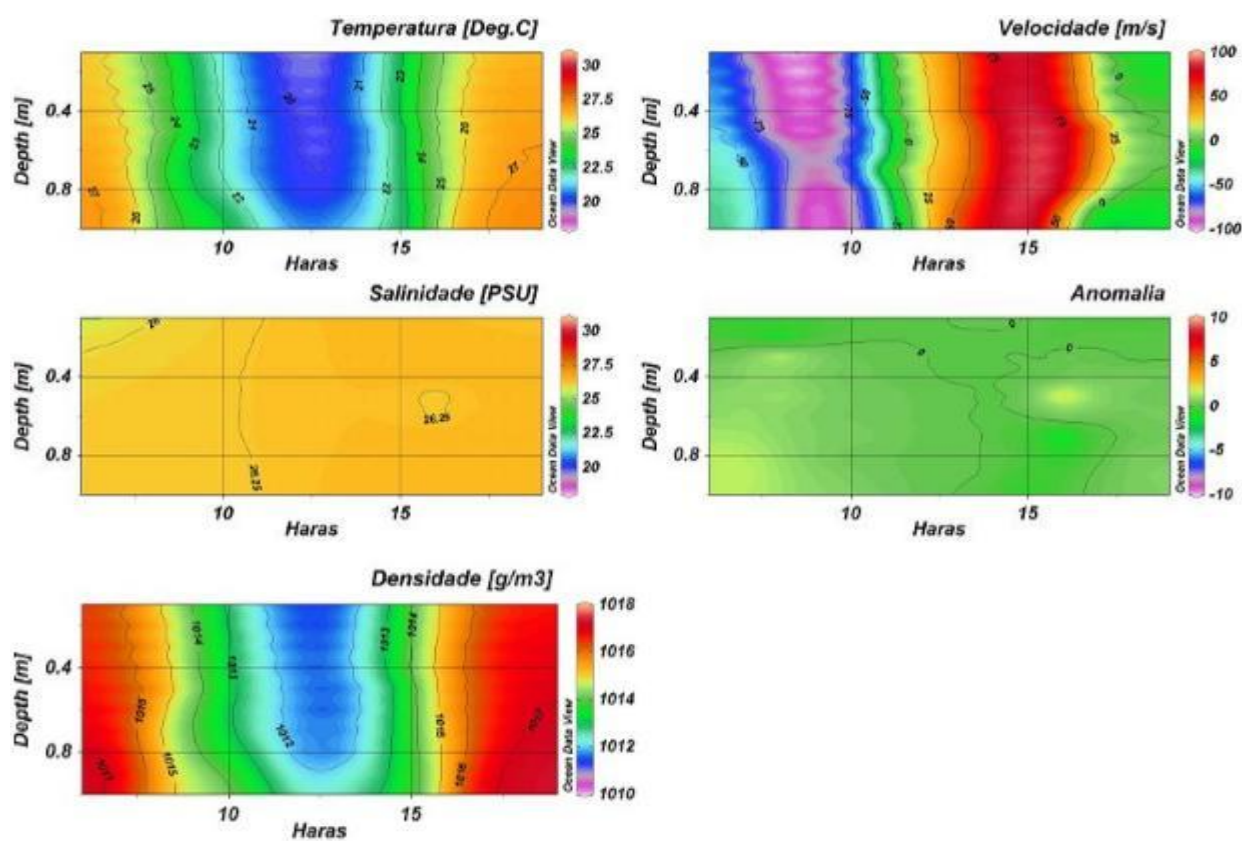
**Figura 3.** Variação temporal da temperatura de água ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidade, densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ ), velocidade ( $\text{cm s}^{-1}$ ) e anomalia de energia potencial ( $\text{J m}^{-3}$ ) em profundidade normalizada, na Estação fixa CTD5 no dia 6 de Março de 2013.

Durante o período intermediário, Abril 2013 (**Figura 4**), a temperatura de água variou de  $25$  a  $27^{\circ}\text{C}$ , homogénea na vertical, com uma pequena bolça de água fria, menor do que  $26^{\circ}\text{C}$ , a superfície, no período da manhã, até as 8 horas devido ao arrefecimento da camada superficial durante a noite.

A salinidade variou entre 20 e 26, homogéneo em profundidade e apresentado gradiente temporal, o que se traduz num gradiente horizontal.

A densidade de água foi cerca de 1010 à 1017kg m<sup>-3</sup>, misturado em profundidade e com gradiente temporal, a semelhança do perfil da temperatura.

A magnitude da velocidade atingiu cerca de 100cm s<sup>-1</sup>, na vazante entre 7 e quase 12horas, altura em que observou-se a baixa-maré e a enchente teve lugar entre 12 e 17horas. Não houve assimetria vertical com as marés. A anomalia de energia potencial foi da ordem de zero em toda a coluna e durante todo o tempo, sugerindo mistura efectiva na vertical.



**Figura 4.** *Varição temporal da temperatura de água (°C), salinidade, densidade (kg m<sup>-3</sup>), velocidade (cm s<sup>-1</sup>) e anomalia de energia potencial (J m<sup>-3</sup>) em profundidade normalizada, na Estação fixa CTD5 no dia 28 de Abril de 2013.*

### 3.2. Variação espacial da temperatura de água, salinidade, oxigénio e velocidade

As Figuras 5 e Figura 6 mostram a distribuição longitudinal da temperatura, salinidade, oxigénio e velocidade média da água no estuário dos Bons Sinais durante a época seca (14 de Dezembro de 2016) e Chuvosa (28 de Abril de 2017).

No entanto, observou-se que na época seca a temperatura apresentou um perfil homogêneo da superfície ao fundo, variando de 29,9°C a jusante e 30,5°C a montante. Enquanto, na época chuvosa observou-se que a temperatura variou de 26,3°C a jusante e aos 10Km de distância atingiu 26,4°C na superfície que decresceu até a montante, chegando a atingir 26,2°C.

Portanto, o perfil de salinidade mostrou-se ser dominado pelas marés em toda coluna da água da jusante a montante, que atingiu 35 na boca do estuário, a partir dos 10km à 25km foram observados valores de 34.75 que se estendeu até os 30km no fundo e na superfície voltou a atingir 35. Na época chuvosa observou-se baixa salinidade devido a entrada da água doce proveniente dos rios e pântanos adjacentes ao rio de Bons Sinais, que variou de 23.5 a jusante e 10 a montante.

As correntes na época seca foram dominadas pelas marés apresentando valores máximos de  $100\text{ms}^{-1}$  na enchente e na vazante cerca de  $50\text{ms}^{-1}$ . Na época chuvosa foram observados valores máximos de  $100\text{ms}^{-1}$  na vazante perto da confluência e na superfície que variaram até atingir  $75\text{ms}^{-1}$  na enchente perto da boca do Estuário, respectivamente.



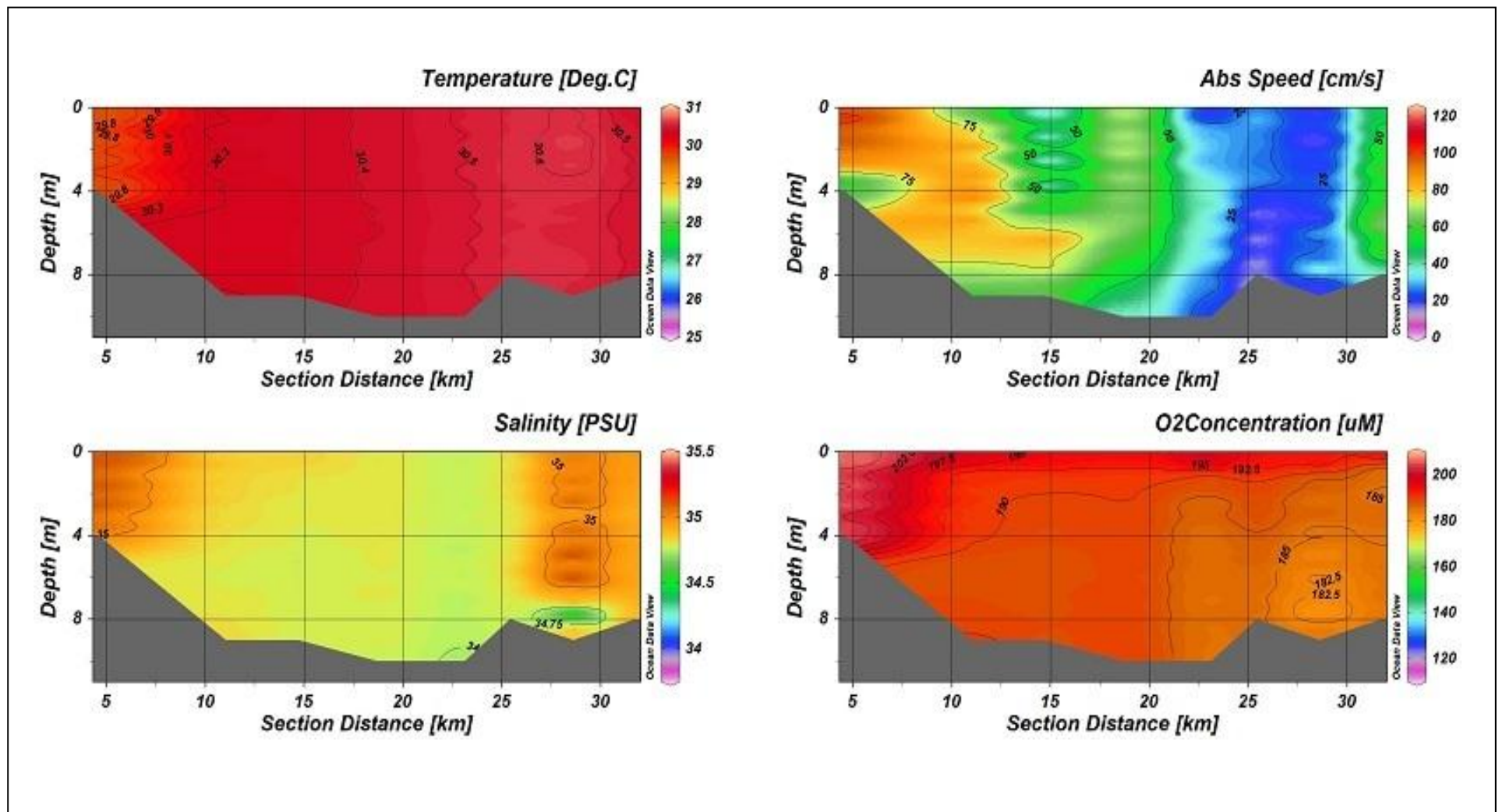


Figura 5. Variação espacial da temperatura de água (oC), salinidade, velocidade (cm s-1) e oxigênio ( $\mu\text{M}$ ) em profundidade normalizada, ao longo do estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016)

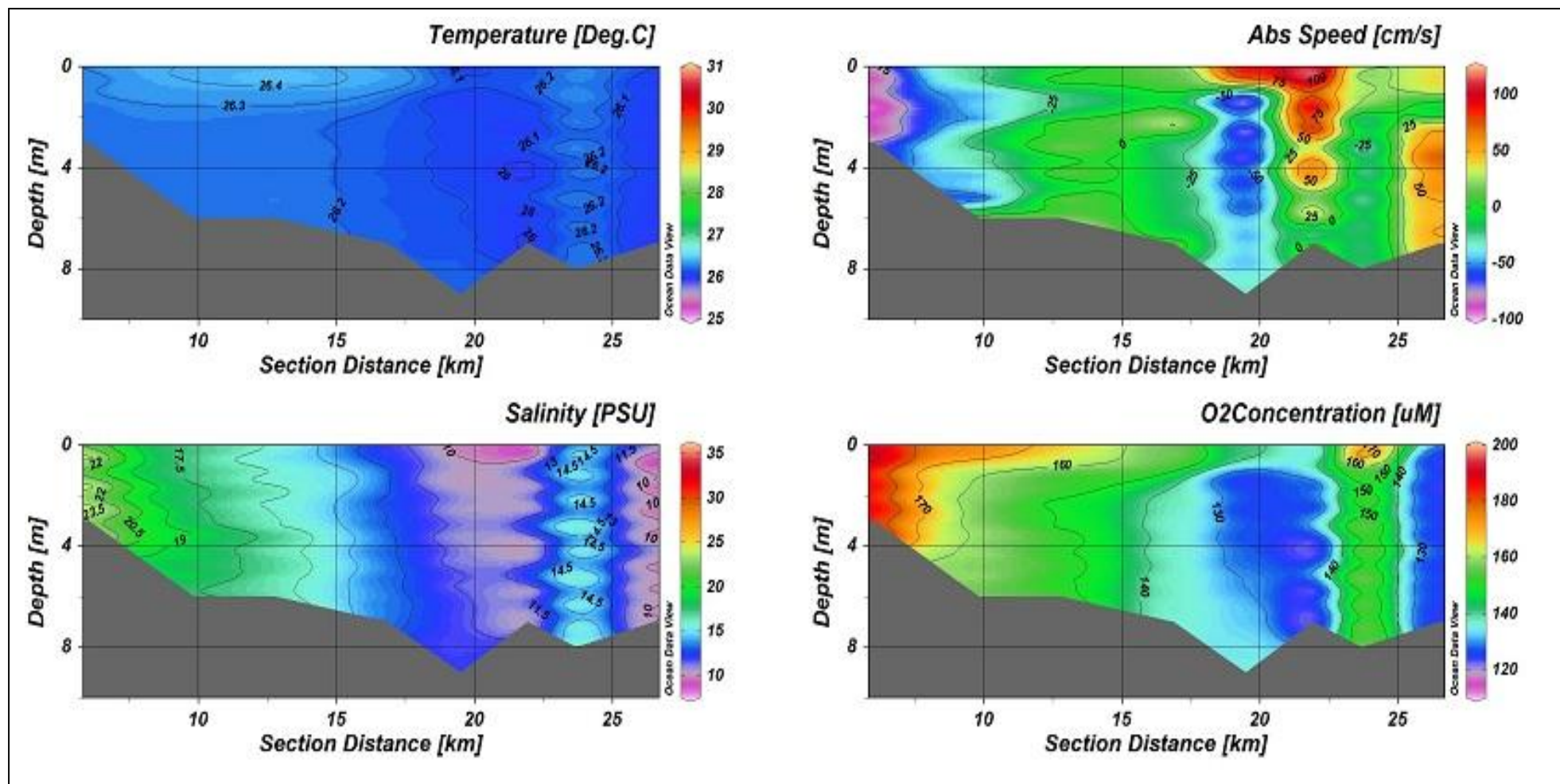


Figura 6. Variação espacial da temperatura de água (oC), salinidade, velocidade (cm s-1) e oxigênio (µM) em profundidade normalizada, ao longo do estuário na época chuvosa (28 de Abril de 2017)

### **3.3. Perfis verticais de temperatura de água, salinidade, densidade e velocidade**

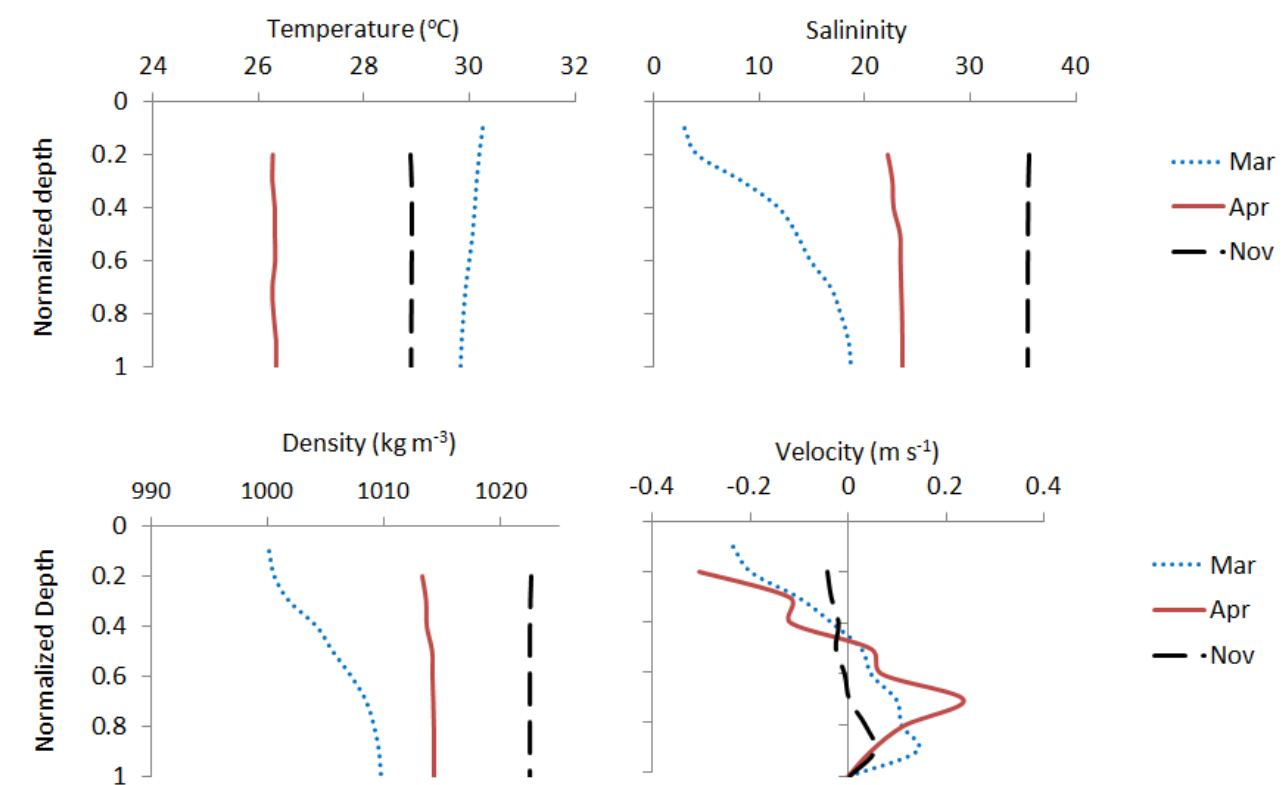
A (Figura 7) apresenta os perfis verticais, integrados no período de marés, da temperatura de água, salinidade, densidade e velocidade, para os períodos seco, chuvoso e intermediário.

Os perfis verticais da temperatura de água apresentaram homogeneidade em profundidade, com temperaturas a variarem entre 29-30°C para o período de verão (Novembro 2012 e Março 2013) e cerca de 26°C para o mês de Abril, período de transição para inverno.

A salinidade apresenta dois tipos de perfis verticais, sendo homogênea para os meses de Novembro, período seco e Abril, período intermediário, com valores de 35 e 21, respectivamente. No mês de Março, período chuvoso, o perfil apresenta estratificação, com uma cunha salina, sendo a água doce na superfície e água salina no fundo, respectivamente.

Por outro lado, notou-se que os perfis verticais da densidade não apresentaram essa estratificação, houve compensação dos efeitos de salinidade e da temperatura na densidade. A densidade foi homogênea com valores oceânicos em Novembro, no período seco e valores estuarinos em Março e Abril.

Os perfis da velocidade apresentaram uma forte assimetria vertical (14-25cm s<sup>-1</sup>), com velocidades de vazante maiores na ordem de 25cm s<sup>-1</sup> na superfície e de enchente, na ordem de 14cm s<sup>-1</sup> no fundo indicando uma forte componente de circulação devido a gradiente de densidade durante o período chuvoso (Março) e intermediário (Abril), sugerindo a dominância de rio na hidrodinâmica do estuário. Neste contexto, o período seco (Novembro) houve uma fraca assimetria vertical menor que 5cm s<sup>-1</sup>, sugerindo-se fraco efeito de gradientes de densidade e forte dominância de marés na hidrodinâmica.



**Figura 7.** Perfis de temperatura, salinidade, densidade e velocidade média das marés medidos na Estação 5 durante as épocas seca (Novembro de 2012), chuvosa (Março de 2013) e transição (Abril de 2013).

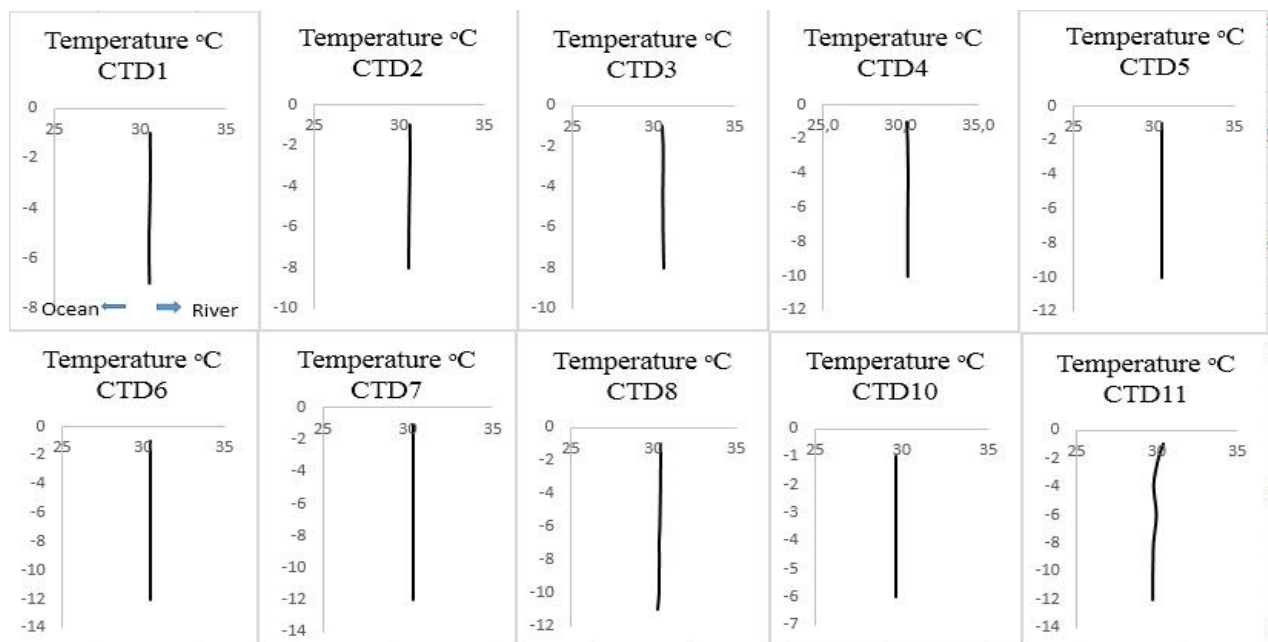
### 3.4. Perfis verticais de temperatura de água, salinidade, e velocidade

Em consonância com as Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13 mostraram a variação vertical da temperatura da água, salinidade e velocidade na época seca (Dezembro 2016) e chuvosa (Abril 2017). Enquanto, para os perfis de temperatura mostraram valores de aproximadamente 30°C da superfície ao fundo com uma pequena variação na Estação 11, na época seca e na época chuvosa, onde os valores variaram de 26°C a 30°C.

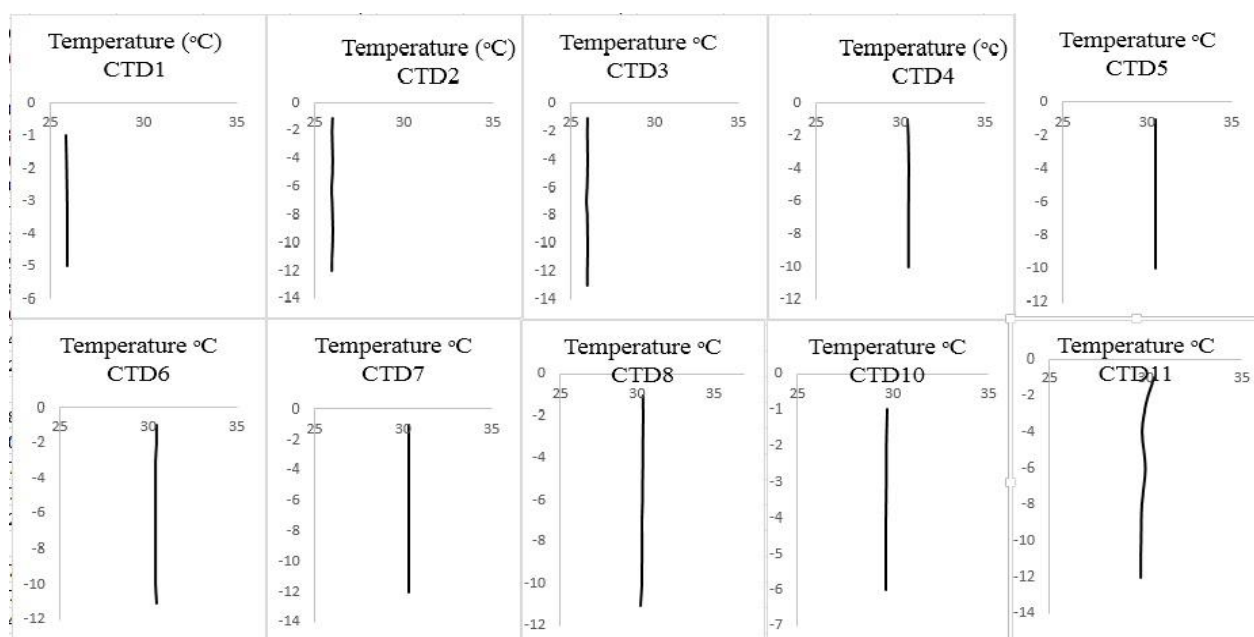
Observou-se ainda a variação da salinidade na Estação 1 com maiores valores na superfície e menores no fundo provavelmente este aumento da salinidade na superfície é derivado pelas águas quentes vindas dos pântanos de mangal que transportaram consigo sais durante a vazante, enquanto, nas outras estações a salinidade observada foi de 35 da superfície ao fundo e isso mostrou que o estuário foi dominado pelas marés na época seca.

Portanto, durante a época chuvosa observou-se que a entrada de água com salinidade baixa variou de 7 à 8 na superfície e 20 no fundo nas estações 1, 2 e 3; nas estações de 4 à 11 foi observada qua a

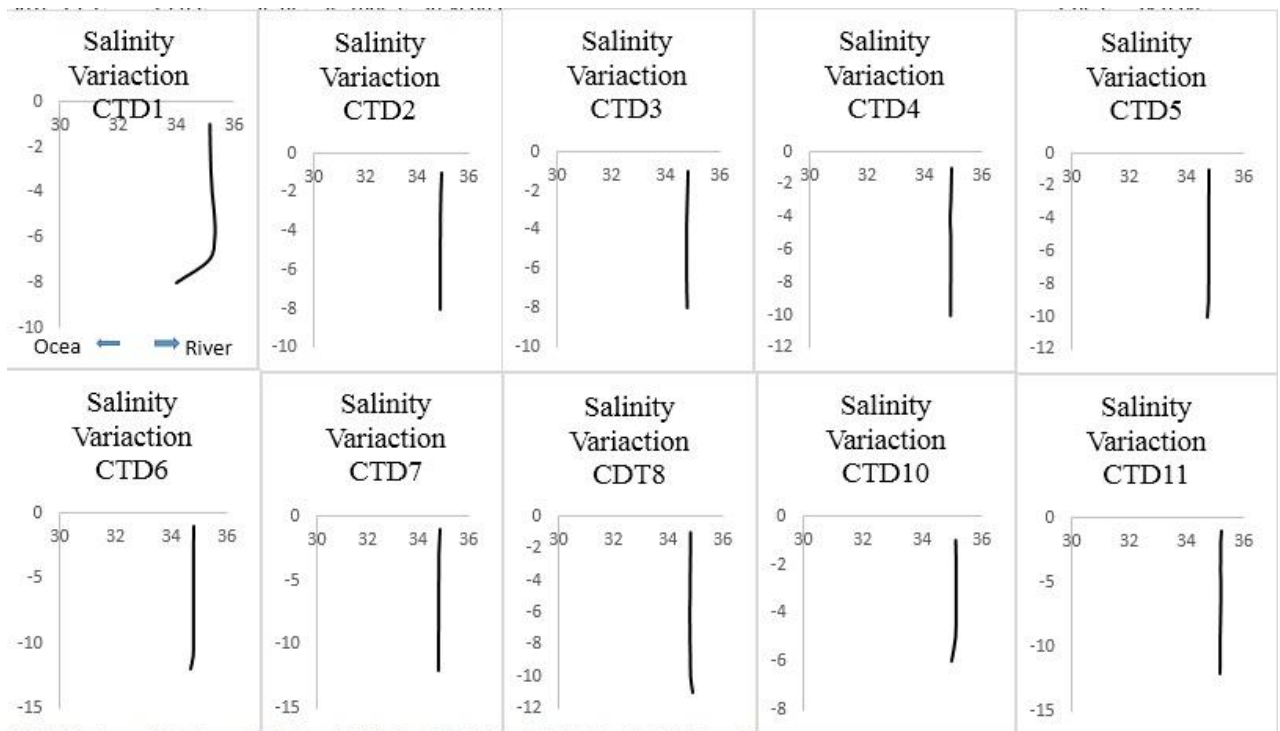
salinidade era de 35 da superfície ao fundo. Os valores da corrente mostraram simetria vertical, variando de  $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  à  $150\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , desde a enchente assim como na vazante na época seca. Na época chuvosa, os valores variaram para vazante  $100$  e  $150\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , enquanto na enchente foram de  $10$  e  $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente.



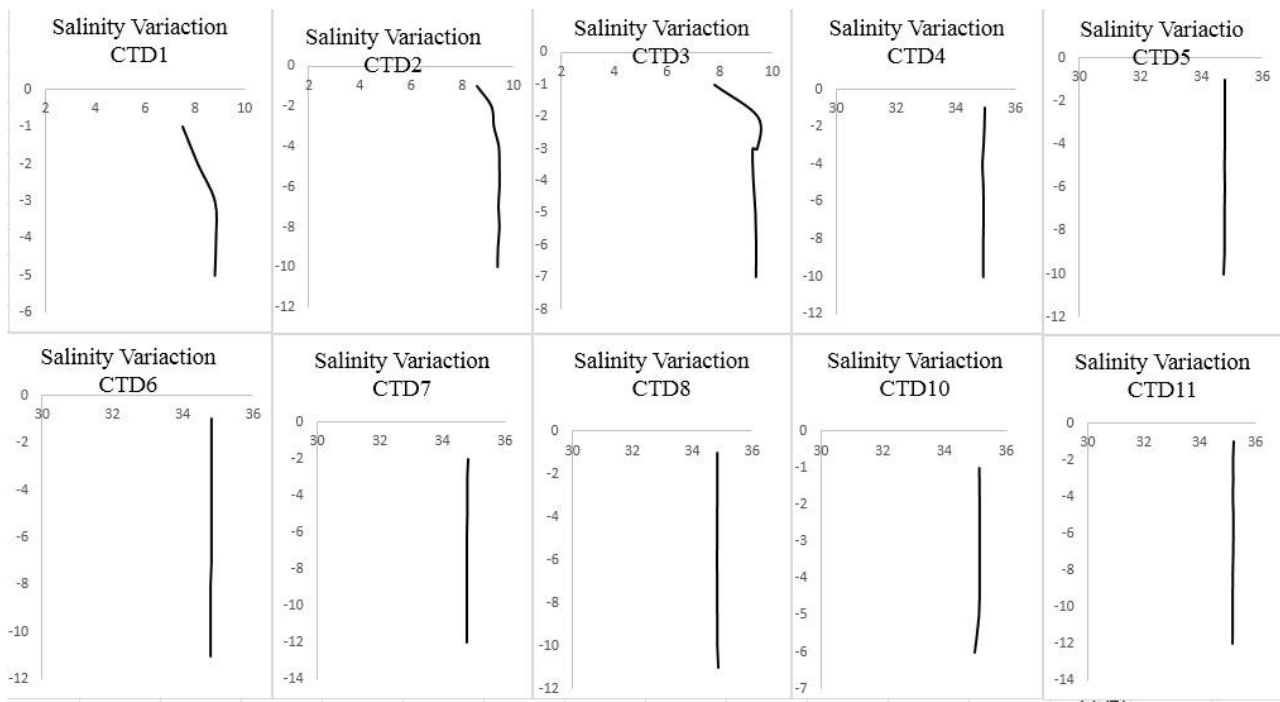
**Figura 8.** Perfis de temperaturas médias em ( $^{\circ}\text{C}$ ) das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016)



**Figura 9.** Perfis de temperaturas médias em ( $^{\circ}\text{C}$ ) das marés medidos ao longo do Estuário na época chuvosa, (28 de Abril de 2017)



**Figura 10.** Perfis de salinidade média das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016)



**Figura 11.** Perfis de salinidade média das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (28 de Abril de 2017)

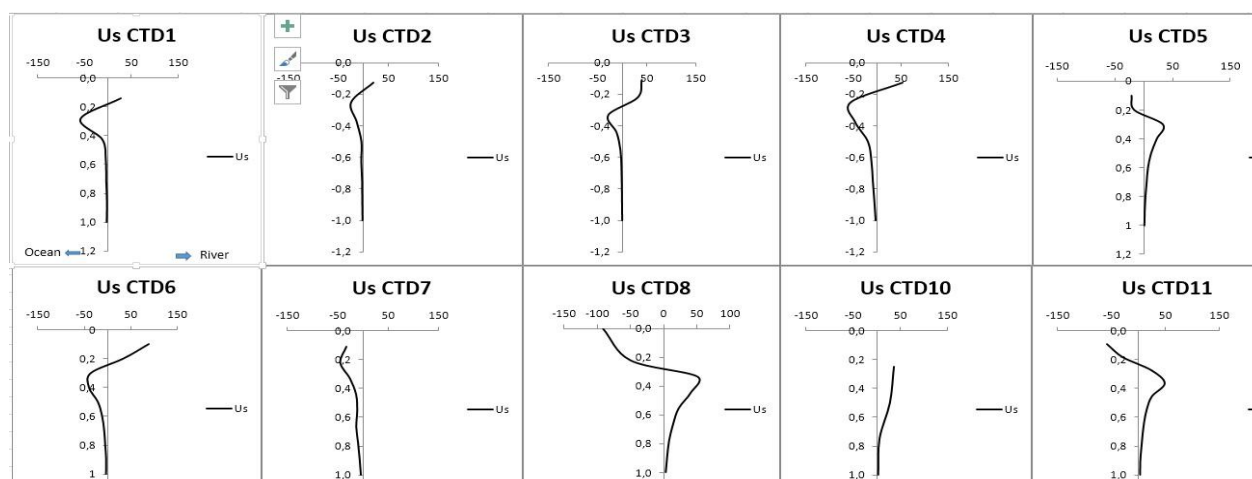


Figura 12. Perfis de velocidade (m/s) média das marés medidos ao longo do Estuário na época seca (14 de Dezembro de 2016)

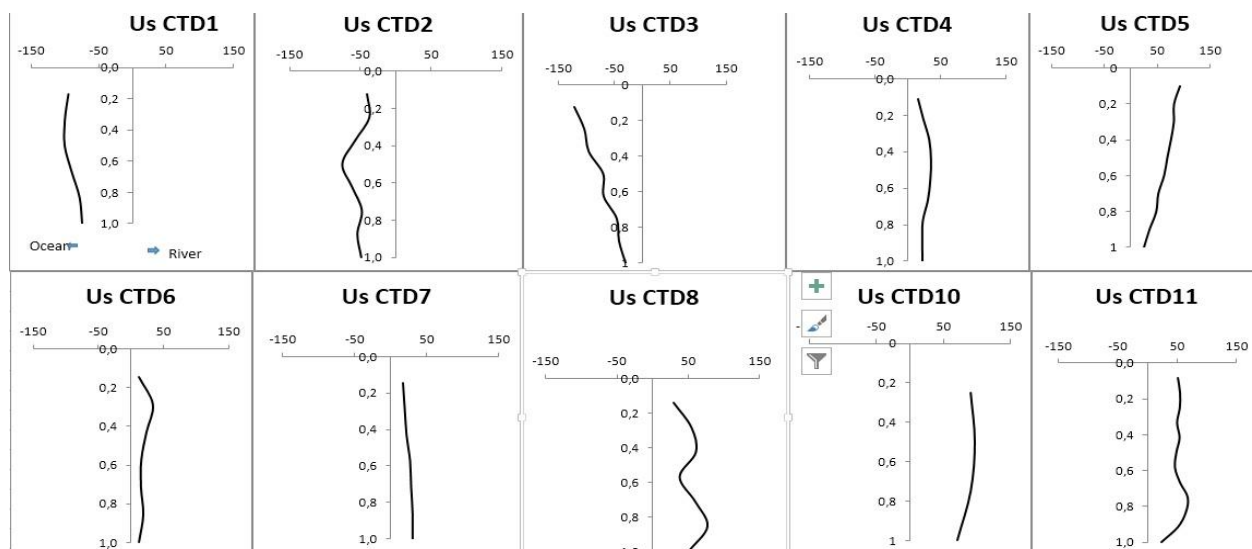


Figura 13. Perfis de velocidade (m/s) média das marés medidos ao longo do Estuário na época Chuvosa (28 de Abril de)

### 3.5. Tabela das estatísticas das observações, comparadas com as velocidades modeladas pelas equações ajustadas de Hassan e Rattray e a estimativa das observações

A Equação [26] e o fluxo residual observado levou ao resultado apresentado na Tabela 2. Durante a estação chuvosa (Março de 2013), o fluxo residual foi estimado em cerca de  $0,14\text{m s}^{-1}$ , em face do fluxo de água doce; o fluxo gravitacional foi aproximadamente da mesma magnitude, devido ao alto gradiente horizontal de densidade associado com a de salinidade.

Durante a época seca (Novembro de 2012), o fluxo residual foi de  $0,07\text{m s}^{-1}$ , na vazante, e o fluxo gravitacional foi menor do que  $0,42 \times 10^{-2}\text{ms}^{-1}$ , provavelmente devido à baixa vazão do rio, junto da fontes de água e gradiente de baixa densidade horizontal, respectivamente.

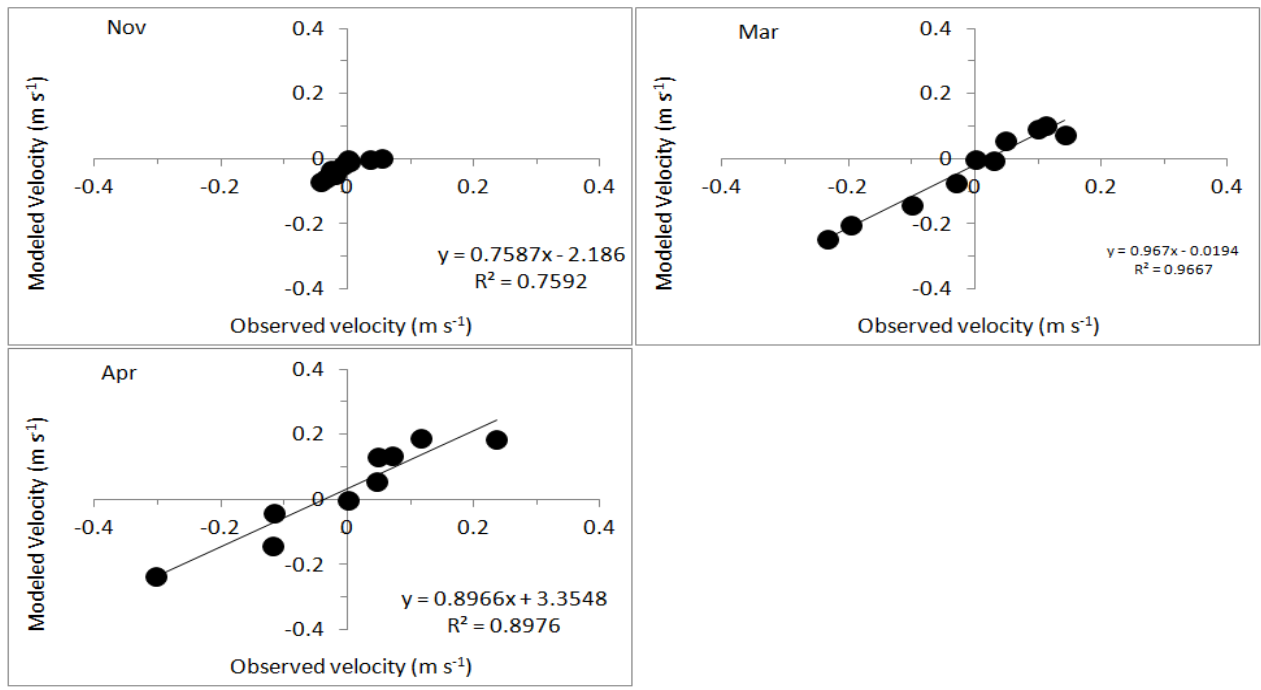
De realçar que, o período intermediário, isto é, Abril de 2013, o fluxo residual foi de  $0,14\text{m s}^{-1}$ , também na vazante, naturalmente devido à drenagem da água doce acumulada aos pântanos durante a época chuvosa; a circulação gravitacional foi de cerca de  $0,15\text{ms}^{-1}$  na época seca, apresentando a mesma ordem de magnitude na época chuvosa, em conformidade com o alto gradiente de densidade horizontal.

A comparação entre as velocidades modeladas pelas equações ajustadas de Hassan e Rattray e a estimativa das observações são apresentadas na Figura 14. Em todas as épocas seca e chuvosa o coeficiente foi 1, com o coeficiente de suavidade de ajuste  $r^2 > 0,9$ , sugerindo um perfeito ajuste, excepto para a estação intermediária em que o coeficiente foi  $r^2=0,5$ , significando que a observação foi superestimada em dobro. Esta falha do modelo pode ser atribuída ao facto de que, durante a estação intermédia, os insumos de maré e água doce estavam quase em equilíbrio. Assim, o modelo descreve razoavelmente bem, os mecanismos de fluxo residual no Estuário dos Bons Sinais.

**Tabela 2.** Resultados estatísticos do ajuste das observações e da solução analítica de Hansen e Rattray.

Period	Coefficients			SS	MS	F	P	r <sup>2</sup> (%)
	Const (m/s)	Ur (m/s)	Ug (m/s)					
Época seca (Nov)	0.02	-0.04	-0.03	0.006	0.00	9.5	0.01	76
					3		4	
Época chuv. (Mar)	0.02	-0.05	-0.19	0.143	0.07	101.7	0.00	97
					1		0	
Transição (Apr)	0.34	-0.02	-0.30	0.178	0.08	26.3	0.00	90
					9		1	

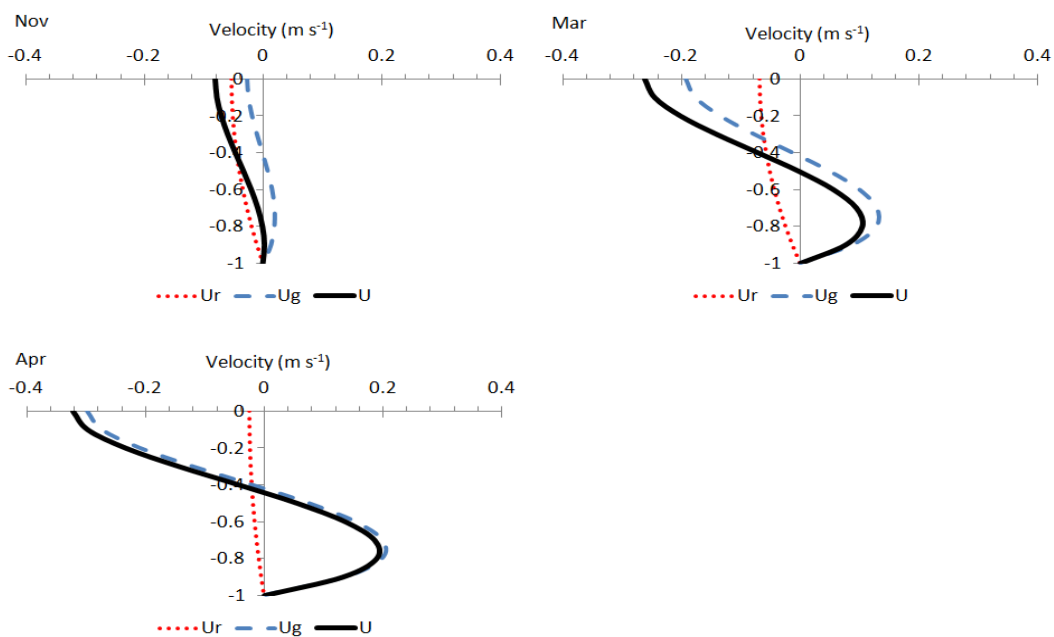




**Figura 14.** Comparação do fluxo residual estimado pela equação de Hansen e Rattray com a estimativa das observações.

### 3.6. Simulação da velocidade de fluxo vertical, com base na Equação de Hansen e Rattray

O modelo de circulação residual (Figura 15) mostra que durante a estação seca, o fluxo residual foi mínimo, o que favoreceu a retenção de larvas no estuário. Na época chuvosa, o fluxo foi elevado, o qual foi facilitado por eventos de inundação do rio, quando há um forte fluxo residual dominado pela vazante.



**Figura 15.** Simulação da velocidade de fluxo vertical, com base na Equação 26.  $U_r$  é o fluxo residual;  $U_g$  é o fluxo gravitacional;  $U$  é a soma de  $U_r$  e  $U_g$ .

#### 4. Discussão dos resultados

Analisadas e comparadas as observações feitas nas duas estações do ano, constatou-se que houve redução nos valores de salinidade na época chuvosa conforme ilustram as **Figura 2 e Figura 4**, por outro lado, a coluna de água apresentou uma estratificação em salinidade reflectindo, assim a influência de água doce proveniente dos rios ou de chuvas locais.

De realçar que, o gradiente vertical da temperatura observada no verão pode ser devido ao arrefecimento na camada superficial durante a noite, como é ilustrado na **Figura 2**, portanto, notou-se que a temperatura foi modificada pelo aquecimento solar durante o dia e arrefecimento, durante a noite e pelos ventos e evaporação.

Por outro lado, foi constatado que a anomalia de energia potencial foi menor no período seco, isto indica que, a coluna da água esteve misturada, enquanto no período chuvoso observou-se maior anomalia de energia potencial, o que resultou da estratificação da coluna de água, segundo a **Figura 4**, resultado que está de acordo com as observações de Mabota (2009).

Os perfis verticais das residuais da temperatura de água, face a **Figura 7** apresentaram homogeneidade em profundidade, com temperaturas a variarem entre 29 e 30°C para o período seco e chuvoso e cerca de 26°C para período intermédio, indicando ter havido diferenças sazonais, e não ter havido diferenças significativas na temperatura de água em profundidade ao longo do ciclo de marés. A homogeneidade da temperatura na coluna de água deve-se ao facto de que a profundidade do estuário ser pequena, correspondente a de 15m em média, o que permite maior difusão da temperatura isto está em concordância com Dyer (1997), citado por Duxbury (1997), Kjerfve et al. (2002) e Hogue et al. (2020).

Os perfis verticais da residual de salinidade, em consonância com a **Figura 7** apresentaram dois tipos, sendo homogénea para o período seco, enquanto, o estratificado parcialmente estratificado para os períodos chuvoso e intermediário, com uma cunha salina no fundo e na água doce da superfície (Maccready&Geyer, 2010). A mistura no período seco deve se provavelmente a acção das marés, que são cerca de 4-5 m nas marés vivas, e que na ausência de estratificação foram eficientes em misturar a coluna de água. A estratificação observada no período chuvoso se deve a descarga de água doce.

Os perfis verticais da densidade (**Figura 7**) apresentam essa estratificação, pois mostra efeitos de salinidade e da Temperatura na densidade. A densidade é estratificada com valores oceânicos no período seco e valores estuarinos no período chuvoso como proposto por Geyer, W.R., Trowbridge, J.H., Bowen, M.M., (2000)

Os perfis das residuais da velocidade (**Figura 7**) apresentam uma certa simetria vertical, com maiores valores de velocidade ( $\sim 20 \text{ cm s}^{-1}$ ), para a jusante, na superfície e para a montante, no fundo, de igual magnitude, sugerindo ter havido o efeito conjugado das marés e da descarga do rio na hidrodinâmica do estuário. No período seco houve baixos valores de velocidade residual sugerindo a dominância de marés na hidrodinâmica, o que esta em concordância com Dyer (1996).

O modelo apresentou um fluxo, a jusante forte durante a época chuvosa e fraco a montante durante a época seca, que pode levar a um transporte de massa de água na época chuvosa e seca ou retenção de larvas na época seca, que de acordo com Lazzari *et al.*, (1993), que investigou o movimento vertical das larvas de *Clupea harengus* e o fluxo de maré residual no estuário e observou que as larvas se moviam para o mar ou para a margem de acordo com o fluxo residual e que o transporte para o mar estava associado a alto escoamento superficial, e concluiu que larvas entrariam no estuário durante o inverno em anos de baixo escoamento e seriam expulsas do estuário quando o escoamento for alto, e advertiram que a severa mortalidade de larvas que permaneciam em estuários durante o inverno poderia afectar negativamente o recrutamento.

Para Teodósio e Garel (2015) estudando a retenção de larvas de peixe no estuário do Guadiana, observaram que as larvas de habilidades diferentes a serem retidas dentro de áreas de berçário, como nadar contra as correntes axiais, a migração vertical e o uso de fluxos do montante residuais. No entanto, eles ressaltaram que, durante os eventos de inundação de água doce, todas as larvas provavelmente são expelidas do estuário para as águas costeiras adjacentes, com o risco de sua sobrevivência.

De acordo com Gammelsrod (1992) a migração das larvas do camarão peneídeo da desova, em águas costeiras para o viveiro, nos estuários e mangais do Banco de Sofala, onde está localizado o estuário dos Bons Sinais, ocorre durante a estação seca, quando, de acordo com o descoberto no presente estudo, ocorre circulação residual dirigida pelas marés com fluxo líquido a montante, e o evento de inundação do rio coincide com a entrada de juvenis para a área de recrutamento, também de acordo com os resultados obtidos a partir deste estudo.

No entanto, mais pesquisas são necessárias, que devem se concentrar no acoplamento da desova a sistemas de transporte oceanográfico natural para ovos e larvas, a partir do Estuário de Bons Sinais,

usando o modelo desenvolvido no presente estudo, com o objectivo final de quantificar os mecanismos de transporte das larvas da desova para locais de recrutamento, assim como, prever o recrutamento e capturas.

As larvas que entram no estuário durante a estação seca, através da entrada das marés, provavelmente serão retidas até serem enxaguadas durante as inundações de água doce (Teodósio & Garel, 2015) principalmente na época chuvosa.

Da mesma forma, o movimento vertical das larvas do arenque *Clupea harengus* e as larvas transportadas pelo fluxo residual estuarino moveram-se para dentro do estuário ou para o mar de acordo com o fluxo residual (Lazzarri *et al.*, 1993). Os camarões *penaeid* são um importante recurso pesqueiro no Oceano Índico Ocidental, onde são capturados por pescadores artesanais em estuários e por arrastões industriais que operam em bancos de área (Munga *et al.*, 2013, 2014, Hogueane & Armando 2015).

As pescarias apresentam forte sazonalidade, associada com a disponibilidade de juvenis de camarão ou adultos para a pesca, conforme observado por Deshmukh *et al.*, (2004), e posteriormente por Temming *et al.*, (2017).

As fêmeas adultas de várias espécies desovam no Banco de Sofala, após o que as larvas entram nos estuários e áreas de berçário durante a estação seca, quando a circulação residual estuarina é mais fraca e impulsionada pelas marés (Gammelsrød, 1992).

## 5. Conclusão

Durante o período seco a temperatura, salinidade e densidade da água foi homogénea em profundidade, ao longo do Estuário. Enquanto, no período chuvoso a temperatura água oceânica apresentou-se relativamente fria na foz e água do rio quente, tendo-se verificado pequena estratificação vertical na superfície, perto da confluência.

Entretanto, a salinidade diminuiu da foz para montante verificando-se uma pequena estratificação, no período chuvoso. Por outro lado, a densidade aumentou da confluência para a foz com um pequeno gradiente vertical.

Pelo facto de, o Estuário ter uma menor profundidade, a temperatura da água foi homogénea em todos os períodos. Isto é, a salinidade foi homogénea para o período seco e estratificado durante os períodos chuvoso e intermediário. Como também, a densidade foi homogénea com valores oceânicos no período seco e valores estuarinos no período chuvoso. A densidade parece ter sido mais determinada pela salinidade com pequena influência da temperatura durante o período de estudo.

Diante da análise feita concluiu-se que houve uma componente de circulação residual devido ao gradiente de densidade durante o período chuvoso e intermediário. A circulação residual do estuário dos Bons Sinais foi determinada pelas marés na época seca, e, pela combinação das marés e descargas dos rios na época chuvosa.

Portanto, o modelo de circulação residual desenvolvido neste estudo mostrou que pode ser aplicado para simular a dispersão de larvas e padrões de recrutamento de peixes dependentes do estuário e pode fornecer uma estrutura para teste de hipóteses em estudos de história de vida.

É certo sublinhar que o Estuário dos Bons Sinais, em relação aos importantes locais de pesca do Banco de Sofala, fornece uma localização espacialmente bem posicionada para estudos *in situ* das mudanças ambientais e seus efeitos nas quantidades capturadas e composição de espécies na pesca.

Em suma, o modelo clássico de duas camadas de Hansen e Rattray forneceu uma solução analítica simples, que conseguiu quantificar a circulação residual fundamental, de uma forma que é fácil de interpretar para decisões de gestão.

## 6. Referencias Bibliograficas

- António, M. H. (2012). *Hydrodynamic of the Bons Sinais Estuary*. Dissertação de mestrado. Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane.
- Deshmukh, V. D.; Hule, A. S.; Mane, S. J.; Sawant, M. S.; (2004). *Fishery and biology of penaeid prawns at Harnaii, Maharashtra*. Journal of the Indian Fisheries Association 31: 47-63. Available through: [http://aquaticcommons.org/17410/1/JIFA31\\_047.pdf](http://aquaticcommons.org/17410/1/JIFA31_047.pdf).
- Dyer K. R. (1995). Sediment Transport Processes in Estuaries -Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. In Perillo GME (eds) Developments in Sedimentology, Elsevier, Vol.53, pp423- 449. SN-0070-4571. doi: [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(05\)80034-2](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(05)80034-2). Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0070457105800342>.
- Duxbury, A.C., 1997. An Introduction of the World's Oceans, fifth ed. Wm. C. BrownsPublishers, Dubuque IA, p. 504.
- Gammelsrød T. & Hogueane A. M (1995). *Watermasses, currents and tides at the Sofala Bank*, November 1987. Revista de Investigação Pesqueira, Maputo, 22: 37-60.
- Gammelsrød T. (1992). *Variation in shrimp abundance on the Sofala Bank, Mozambique, and its relation to the Zambezi River runoff*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 35(1): 91-103. [doi: 10.1016/S0272-7714(05)80058-7].
- Garrison, L. P. (1999). *Vertical migration behavior and larval transport in brachyuran crabs*. Marine Ecology Progress Series 176: 103-113. Available through: <https://www.int-res.com/articles/meps/176/m176p103.pdf>.
- Geyer, W. R. & MacCready, P. (2014). *The Estuarine Circulation*. Annual Review of Fluid Mechanics 46: 175–97 [doi: 10.1146/annurev-fluid-010313-141302].
- Geyer, W.R., Trowbridge, J.H., Bowen, M.M., 2000. The dynamics of a partially mixed Estuary. J. Phys. Oceanogr. 30, 2035–2048. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)03<2035:TDOAPM>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(2000)03<2035:TDOAPM>2.0.CO;2).
- Hansen, D .V. and Rattray, M. Jr. (1966). *New dimensions in estuary classification*. Limnology and Oceanography 11: 319-326.
- Hansen, D. V & Rattray M. Jr. (1965). *Gravitational circulation in straits and estuaries*. Journal of Marine Research 23:104–122.
- Hogueane, A. M. & Armando, E. V. (2015). *The influence of the river runoff in the artisanal fisheries catches in tropical coastal waters–The case of the Zambezi River and the fisheries catches in the northern Sofala Bank, Mozambique*. Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management 15(4): 443-451.
- Hogueane, A. M. (1999). *Sea level measurement and analysis in the Western Indian Ocean*.

- Hoguane, A. M.; Gammelsrød, T.; Mazzilli, S.; Antonio, M. H.; da Silva N. B. F. (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* 37: 101352. [doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101352>]
- Ibraimo, D. J. (2004). *Grau de estratificacao da coluna de agua na baia de Maputo. Trabalho de licenciatura*. Universidade Eduardo Mondlane.
- Lazzari, M. A.; Stevenson, D. K.; Shaw, R. F. (1993). *Influence of Residual Circulation and Vertical Distribution on the Abundance and Horizontal Transport of Larval Atlantic Herring (Clupea harengus) in a Maine Estuary*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 50(9): 1879-1890. Available through: <https://doi.org/10.1139/f93-210>
- Kjerfve, B., Perillo, G.M.E., Gardner, L.R., Rine, J.M., Dias, G.T.M., Mochel, F.R., 2002. Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. In: Healy, T.r., Wang, Y., Healy, J.-A. (Eds.), *Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Functions*. Elsevier, Amsterdam, N.Y., pp. 479–532.
- Li, C. (1997). *Tidally driven residual circulation in shallow estuaries with lateral depth variation*. *Journal of geophysical research* 102(C13): 27,915-27,929. Available through: <https://www.researchgate.net/publication/240486913>
- Mabota, H. S. (2009). *Grau de Estratificação da coluna de água no Estuário dos Bons Sinais*. Trabalho de licenciatura. Escola Superior de Ciências Mrinhas e Costeira. Universidade Eduardo Mondlane.
- Maccready, P.; Geyer, W. R. (2010). *Advance in Estuarine Physics*. *Annual Review of Marine Science*. Vol. 2: 35-58. DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081015.
- Machaieie, H. A. (2012). *Water Masses Circulation and Fronts in Sofala Bank*. Dissertação de mestrado. Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane.
- Mazzilli, S. (2015). *Understanding estuarine hydrodynamics for decision making in data-poor coastal environments*. PhD thesis. Fitzwilliam College, Cambridge Coastal Research Unit, Department of Geography, University of Cambridge. 335pp.
- Munga, C. N.; Mwangi, S, Ong'anda, H.; Ruwa, R.; Manyala, J.; Groeneveld, J. C.; Kimani, E.; Vanreusel, A. (2013). *Species composition, distribution patterns and population structure of penaeid shrimps in Malindi-Ungwana Bay, Kenya, based on experimental bottom trawl surveys*. *Fisheries Research* 147: 93-102.
- Simpson, J. H.; Brown, J.; Matthews, J. e Allen, G. (1990). *Tidal Straining, Density Currents, and Stirring in the Control of Estuarine Stratification*. *Estuaries*, 13(2): 125–132.

Steen, J. E. e Hogueane, A. M. (1992). *Circulação e distribuição de massas de água na zona económica e exclusiva de Moçambique*. Revista de Investigação Pesqueira, Maputo.

Teodósio, M. A. e Garel, E. (2015). Linking hydrodynamics and fish larvae retention in estuarine nursery areas from an ecohydrological perspective. *Ecohydrology & Hydrobiology* 15(4): 182 – 191. SN - 1642-3593 [doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.08.003>]. Available through: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1642359315000476>