



Universidade Federal da Bahia

GEORGE LUCAS SILVA DE OLIVEIRA

**A VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA DENSIDADE DA ÁGUA
DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS: AVALIAÇÃO COM MODELAGEM
NUMÉRICA**

Monografia apresentada ao Colegiado do Curso de Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Guilherme Camargo Lessa

Salvador
2025

AGRADECIMENTOS

Antes de qualquer coisa quero agradecer imensamente aos meus pais e a minha irmã sem o apoio e carinho deles eu não teria chegado nem perto daqui, foram anos de “puxões de orelha”, palavras de incentivo e total apoio para que eu me tornasse o que sou hoje, que mesmo eu sendo uma pessoa difícil e muitas vezes insuportável continuaram do meu lado e não desistiram de mim em nenhum momento, que quando caía a luz e eu começava a surtar mantinham a calma e me acolhiam, e isso foram apenas alguns dos poucos momentos que me lembrei agora porém tiveram muito mais.

Quero agradecer muito ao meu Orientador, o Professor Doutor Guilherme Camargo Lessa, comecei a trabalhar com ele em 2021 e são incontáveis as coisas que aprendi nesse curto período, foram muitos embarques e muitos momentos que eu exauri a paciência dele como no último semestre para fazer o TCC ele me passou uma tarefa simples e me deu um prazo de duas semanas e eu não fiz nada e mesmo assim continuou sendo parceiro e me ensinando muito, um grande exemplo de professor e profissional.

Quero agradecer também aos meus colegas de faculdade que viveram esse tempo comigo e me aguentaram todos esses anos, com minhas trocas de humor aleatórias e dormidas constantes, principalmente meus amigos do “Zé apenas Geo” que “rolêzaram” comigo tantas vezes e viveram as maluquices que eu inventava, sem eles a faculdade teria sido chata e pacata e meus colegas fora da faculdade principalmente o “Para quem pode meu amor” e os “Joojaldos” que em sua maioria estão comigo desde a época do colégio me apoiando e deixando a vida mais leve e que com certeza sem eles teria tido um piripaque em algum momento.

Quero agradecer aos outros professores que tive aulas, muito aprendizado foi passado, muita experiência e pedir desculpas pelas vezes que dormi nas aulas, minha rotina de sono era uma maluquice. E não menos importante agradecer muito a Ritinha que me ajudou muito com vários problemas no SIAC e depois no SIGAA.

“I believe that the point of life is enjoying who you share it with”

RESUMO

Este trabalho analisa a variabilidade espaço-temporal da densidade da água na Baía de Todos os Santos (BTS), utilizando modelagem numérica hidrodinâmica de alta resolução com o modelo ROMS e dados observacionais coletados entre 2012 e 2015. A BTS, um sistema estuarino tropical bem misturado, apresenta sua circulação sub-mareal fortemente influenciada por gradientes de densidade, além de forçantes barotrópicos como a maré e o vento em águas rasas. Os resultados indicam que, durante eventos de seca extrema, ocorrem inversões do gradiente longitudinal de densidade, formando rolas de densidade que alteram a circulação gravitacional estuarina típica. A análise interanual identificou variações cíclicas de densidade com período de 4,6 anos e evidências de eventos de hiperdensidade semelhantes ao de 2013 nos anos de 2017 e 2018. A análise EOF permitiu regionalizar a baía e identificar padrões de variabilidade associados a fontes fluviais e regimes térmicos distintos. As correlações entre gradiente de densidade e cisalhamento vertical da corrente indicaram uma distância típica de influência de pelo menos 15 km. Os resultados demonstram a importância do monitoramento de longo prazo e da modelagem numérica para compreender a dinâmica estuarina e oferecer subsídios à gestão ambiental da BTS em um contexto de mudanças climáticas e pressões antrópicas crescentes.

Palavras-chave: Baía de Todos os Santos, circulação estuarina, gradiente de densidade, modelagem numérica, variabilidade interanual.

ABSTRACT

This study analyzes the spatiotemporal variability of water density in the Todos os Santos Bay (BTS), employing high-resolution hydrodynamic numerical modeling using the ROMS model and observational data collected between 2012 and 2015. BTS, a well-mixed tropical estuarine system, exhibits subtidal circulation that is strongly influenced by density gradients, as well as barotropic forcings such as tides and winds. The results indicate that extreme drought events lead to inversions of the longitudinal density gradient, forming density plugs that modify the typical estuarine gravitational circulation. The interannual analysis identified cyclic density variations with a 4.6-year period and evidence of hyperdensity events similar to that of 2013 also occurring in 2017 and 2018. The EOF analysis enabled the regionalization of the bay and the identification of variability patterns associated with fluvial sources and distinct thermal regimes. Correlations between density gradients and shear indicated a typical influence distance of at least 15 km. The results highlight the importance of long-term monitoring and numerical modeling to understand estuarine dynamics and support environmental management of BTS in the context of climate change and increasing anthropogenic pressures.

Keywords: Todos os Santos Bay, estuarine circulation, density gradient, numerical modeling, interannual variability.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
1	Introdução
1	
2Características da Área de Estudo	
3	
3	Metodologia
5	
3.1Dados Observacionais	
5	
3.2Simulações Numéricas	
5	
4	Resultados
9	
4.1Validação do Modelo Numérico	
9	
4.1.1Campanhas de 2012 a 2014	
9	
4.1.2Sondas Fundeadas entre 2013 e 2015	
12	
4.2Campo de Densidade no ano de 2013	
13	
4.3Variabilidade espacial em 2013	
15	
4.4Variabilidade Temporal 2008-2021	
20	
5	Discussão
21	
6	Conclusão
23	

7	Referências Bibliográficas	
24		
8		Anexos
25		
8.1	Anexo	A
25		
8.2	Anexo	B
26		
8.3	Anexo	C
27		

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa com os pontos das campanhas feitas de 2012 a 2014 e das sondas fundeadas	2
Figura 2 - Grade utilizada na Simulação numérica, mostrando a resolução da grade mãe (Área externa) e da grade filha (Área em Vermelho), estações em vermelho e amarelo são as inserções de rio.....	6
Figura 3 – Localização das estações extraídas do modelo e perfil longitudinal ao longo do trajeto	9
Figura 4 - Viés das campanhas realizadas em 2012-2014.....	10
Figura 5 - Valores de RMSE obtidos para as campanhas realizadas entre 2012 e 2014. O gráfico superior apresenta os valores de RMSE para os dados de superfície, enquanto o inferior exibe os valores correspondentes aos dados de fundo.	12
Figura 6 – Valores de RMSE e Viés do campo de densidade nos anos de 2012 a 2014. Campanhas em vermelho são no verão, em azul no período de inverno.....	12
Figura 7 - Séries temporais de densidades observadas e simuladas entre 2012 e 2015	13
Figura 8 - Campo médio mensal de densidade da BTS em 2013.....	14
Figura 9 - Gráficos de Resultados das análises de EOF feitas para o campo de densidade da BTS	15
Figura 10 - Densidade para as estações 15, 17, 20, 24, 27 para todo o ano de 2013 de dados simulados	16
Figura 11-Velocidade longitudinal para as estações 2,4,7,9,14 para todo o ano de 2013 de dados simulados	17
Figura 12 – A) Velocidade Longitudinal no dia 29 de abril as 00:00 ao longo do Transecto B) Densidade no dia 29 de abril as 00:00 ao longo do Transecto C) Velocidade Longitudinal no dia 28 de setembro as 00:00 ao longo do Transecto D) Densidade no dia 28 de setembro as 00:00 ao longo do Transecto	18
Figura 13 - Gradiente de densidade para o ano de 2013	19

Figura 14- Número de estações consideradas no cálculo do gradiente longitudinal de densidade Variabilidade interanual	20
---	----

Figura 15 – A) Série temporal da densidade média vertical simulada das estações 9, 10 e 11, com a série filtrada (período de corte de 4,6 anos) sobreposta B) Variação dos gradientes de densidade entre as estações 9 e 11 relativos à estação 10. C) Cisalhamento da estação 10.....	21
--	----

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Especificações das estações escolhidas para representar o transecto longitudinal ao eixo principal da BTS, representadas na Figura 3	8
---	---

1 Introdução

A circulação baroclínica desempenha um papel essencial na hidrodinâmica de estuários e baías costeiras, sendo impulsionada por gradientes longitudinais de densidade decorrentes da variação espacial na temperatura e salinidade da coluna d'água (Valle-Levinson, 2022). Esses gradientes geram um escoamento gravitacional, na banda de frequências sub-mareais, caracterizado por forte cisalhamento vertical com correntes superficiais dirigidas para o oceano e fluxos subsuperficiais de sentido contrário. Esta circulação, denominada circulação gravitacional estuarina, é responsável pela troca de materiais dissolvidos e particulados entre o estuário e o ambiente oceânico adjacente (Geyer e MacCready, 2014). A circulação gravitacional estuarina tem sido amplamente abordada na literatura, em trabalhos teóricos, numéricos e observacionais. A circulação gravitacional é analiticamente expressa pela equação (Geyer; MacCready, 2014; Valle-Levinson, 2022):

$$u(z) = \frac{gH^3}{48\rho_0 A_z} \frac{\partial \rho}{\partial x} \left[9 \left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right) - 8 \left(1 + \frac{z}{H} \right)^2 \right]$$

Equação 1: Equação representativa da circulação gravitacional

Onde, g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), H é a profundidade média da coluna d'água (m), ρ_0 é a densidade média da água (kg m^{-3}), A_z representa a viscosidade vertical turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), $\frac{\partial \rho}{\partial x}$ é o gradiente horizontal de densidade (kg m^{-4}) e o z representa a profundidade na coluna d'água (m). Dessa forma, a intensidade da circulação gravitacional em um determinado local é diretamente influenciada pelo gradiente longitudinal de densidade e profundidade, sendo inversamente proporcional à capacidade de mistura vertical das correntes. Não foi encontrado, no entanto, na literatura, qualquer definição sobre a distância ao longo da qual o gradiente de densidade deve ser determinado. A dificuldade está em estabelecer esse comprimento, devido a variabilidade espacial dos estuários, a não linearidade dos gradientes e da influência de fatores como descarga fluvial, maré e geometria de canal.

A Baía de Todos os Santos (BTS – Figura 1) é um estuário onde a circulação gravitacional é bem estabelecida ao longo de todo o ano (Lessa *et al.* 2018, Aguiar *et al.*, 2019; Fonseca *et al.* 2024). De acordo com Santana *et al.* (2018), a circulação forçada por gradientes de densidade é a mais importante para a estruturação da circulação residual, com influência maximizada no verão quando o gradiente longitudinal de densidade é mais acentuado com o aumento das descargas do rio Paraguaçu. Os autores demonstram que a circulação gravitacional mais eficaz reduz significativamente o tempo de descarga da baía.

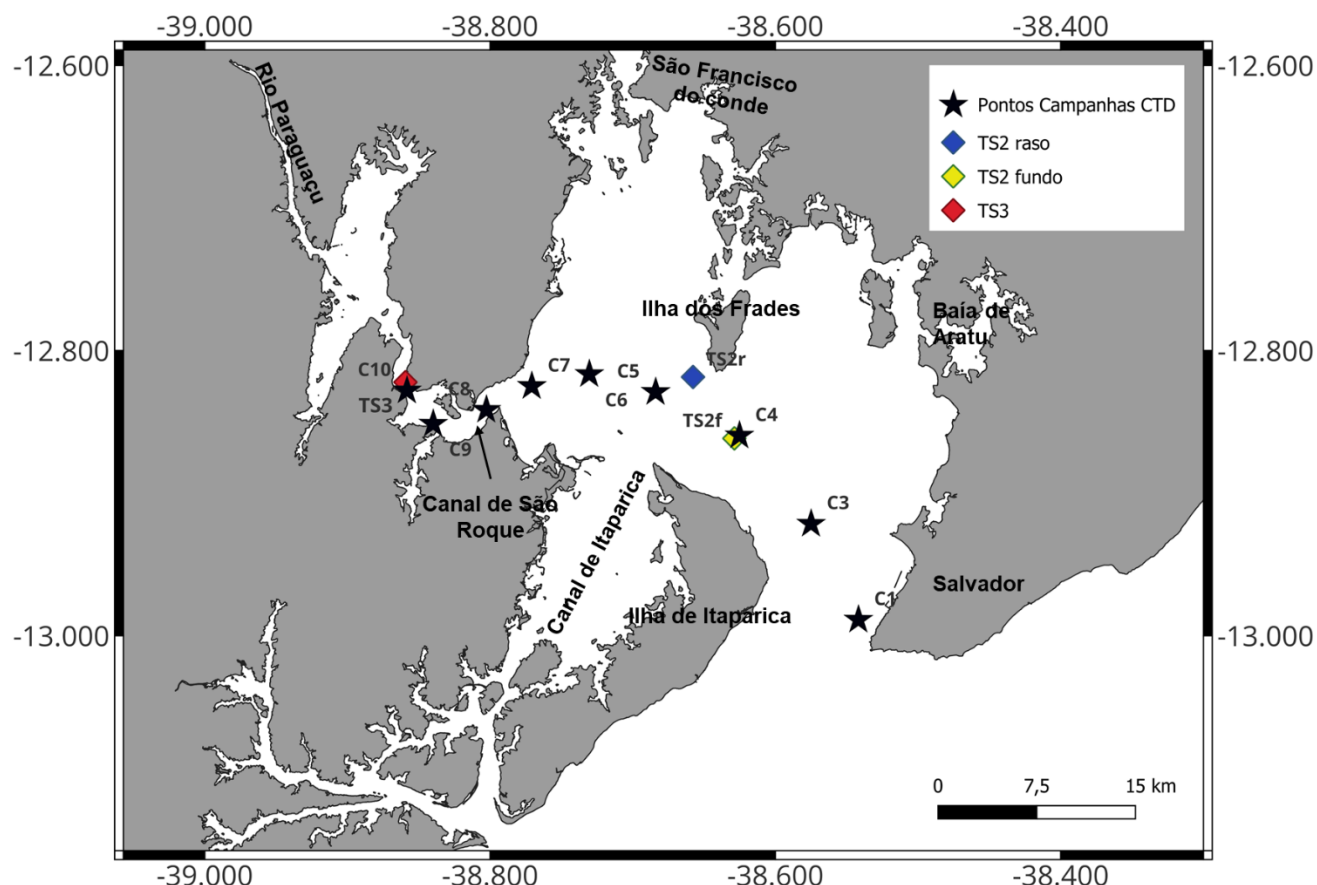


Figura 1 - Mapa com os pontos das campanhas feitas de 2012 a 2014 e das sondas fundeadas

O gradiente longitudinal de salinidade é geralmente negativo em direção à cabeceira da baía, podendo ser invertido entre a entrada e a região central da baía durante verões muito secos (Lessa *et al*, 2019). Lessa *et al*. (2019) e Mariani *et al*. (2022) relatam sobre a clara tendência de aridificação na região do Recôncavo Baiano nas últimas 6 décadas, caracterizada por uma redução expressiva da precipitação e vazões fluviais, e um aumento da temperatura média do ar e da água (Souza, 2022). O aporte de água doce para a baía diminuiu em até 72% em alguns tributários, enquanto eventos de hipersalinidade, anteriormente inexistentes, passaram a ocorrer, especialmente nas porções mais internas da BTS (Mariani *et al*, 2022). A construção de barragens, como a de Pedra do Cavalo no Rio Paraguaçu, intensificou este processo, promovendo uma maior salinização e afetando diretamente a estrutura termohalina e a circulação da baía. Com o avanço das mudanças climáticas e a intensificação das tendências de aridificação, a circulação gravitacional da BTS tende a ser enfraquecida, comprometendo a capacidade de renovação das águas e afetando diversos processos ecológicos e biogeoquímicos.

Dada a importância do campo de densidade na determinação da circulação estuarina e no transporte de nutrientes, sedimentos e poluentes, a compreensão da variabilidade espaço-temporal

da densidade da água na BTS é importante para sua gestão ambiental. Séries temporais relativamente longas de parâmetros hidrográficos foram obtidas ao longo eixo principal da baía e permitiram uma boa caracterização da estrutura da circulação mareal e sub-mareal (Lessa; Mariani; Fonseca, 2019). Estas séries, no entanto, não são longas ou contínuas o suficiente para permitir investigar a variabilidade interanual da circulação, nem as características particulares dos vários subsetores da BTS, como os Madre de Deus, São Francisco do Conde e Canal de Itaparica. Nesse contexto, a modelagem numérica surge como uma ferramenta importante para a melhor compreensão da variabilidade espaço-temporal da circulação. A implementação do modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS), com resolução espacial variando entre 150 e 50 metros e séries temporais de 14 anos (Franklin *et al.*, 2024), fornece subsídios para uma análise detalhada da estrutura tridimensional da baía, incorporando forçantes atmosféricas e oceânicas realistas.

1.1 Objetivo Geral e Específicos

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a variabilidade espaço-temporal da densidade da água da Baía de Todos os Santos utilizando modelagem numérica hidrodinâmica de alta resolução. Os objetivos específicos incluem:

- Verificar a estruturação dos campos de densidade e correntes em secas extremas.
- Investigar a correlação entre os gradientes de densidade longitudinal, relativos a diferentes extensões espaciais, e a estrutura vertical da circulação sub-mareal ao longo do eixo principal da baía através das saídas do modelo.
- Investigar as variações espaço-temporais da densidade da água na BTS no período de 2008 a 2021.

2 Características da Área de Estudo

A Baía de Todos os Santos (BTS) está localizada no litoral do estado da Bahia, entre as latitudes 12°30' S e 13°00' S e as longitudes 38°20' W e 38°50' W. Possui uma área aproximada de 1.233 km², com comprimento máximo de 50 km no sentido norte-sul e largura de até 30 km no eixo leste-oeste (Cirano *et al.*, 2007). A profundidade média é de aproximadamente 9,8 metros, sendo que cerca de 94% de sua área é mais rasa que 25 metros (Cirano *et al.*, 2007).

A baía recebe contribuições hídricas de três principais bacias de drenagem — rios Paraguaçu, Jaguaripe e Subaé (Figura 1) além de mais de 90 bacias menores que proporcionam aporte difuso de água doce, especialmente durante o período chuvoso (Lessa *et al.*, 2009). O principal rio que deságua na Baía de Todos os Santos (BTS) é o rio Paraguaçu, responsável por mais de 90% da

drenagem total da bacia hidrográfica que alimenta a baía (Lessa *et al*, 2019). Outros rios importantes incluem o Subaé e o Jaguaripe, mas com contribuições bem menores.

Quanto à sazonalidade, a descarga fluvial na BTS apresenta forte variação anual, com os maiores volumes de escoamento ocorrendo durante o verão e outono, especialmente entre os meses de dezembro e maio, que coincidem com a estação chuvosa na região. Durante o inverno e a primavera (junho a novembro), os volumes de descarga são reduzidos, em função da menor precipitação regional. Essas variações sazonais influenciam diretamente os gradientes de densidade, a circulação baroclínica e o tempo de residência das águas na baía (Cirano *et al*, 2007; Santana *et al*, 2018)

O clima da região é do tipo tropical úmido, com precipitações médias anuais variando entre 1.800 mm e 2.100 mm e evaporação anual em torno de 1.000 mm (INMET, 1992), ou seja, um balanço hídrico positivo. No entanto, as alterações do clima nas últimas décadas, no sentido de maior aridificação, permitem que o clima regional seja agora classificado como Mediterrâneo Úmido (Mariani *et al*, 2022)

A dinâmica de circulação da BTS é fortemente influenciada pela maré e pela sazonalidade climática. As marés na baía têm altura superior a 2,5 m em sizígia, associadas a velocidades de corrente superiores a 1,2 m/s no canal de entrada da baía (Lessa *et al*, 2018). Na estação seca (verão e inverno), as águas na entrada da baía adquirem características predominantemente oceânicas, com penetração da Água Tropical (AT). Nesta estação, dado balanço hídrico negativo, as temperaturas nas regiões internas aumentam e a salinidade só é reduzida apenas nas proximidades do rio Paraguaçu (Cirano *et al*, 2007). Na estação chuvosa (primavera e outono), o aumento das descargas fluviais e precipitação direta no espelho d'água resulta em um maior gradiente de salinidade.

A ressurgência costeira é um fenômeno oceanográfico importante na região. De acordo com Thévenin *et al*. (2019) ela ocorre na primavera e verão quando ventos favoráveis promovem a ascensão de águas situadas a profundidades entre 80 e 110 m. A água ressurgida penetra na baía auxiliada pela circulação gravitacional (Fonseca *et al*, 2024), e atua como um mecanismo adicional na modulação do gradiente de densidade longitudinal, potencializando a circulação gravitacional (Fonseca *et al*, 2024; Geyer; MacCready, 2014).

3 Metodologia

3.1 Dados Observacionais

Dados coletados em campanhas realizadas em 2013 (Oliveira, 2014) incluíram 25 coletas em preamares de quadratura, 7 em baixa-mares de sizígia e 1 em baixa-mar de quadratura, nas quais foram obtidos perfis verticais de temperatura, salinidade, densidade e turbidez em 9 estações do eixo principal da BTS, utilizando um CTD Seacat Profiler, modelo SBE 19 Plus (Figura 1).

Foram coletadas séries temporais de temperatura e condutividade utilizando sensores Hobo U24 nas estações TS2f, TS2s e TS3 (Figura 1), fundeados a profundidades de 27 m, 4 m e 2 m, respectivamente (Lessa; *et al* 2019). As séries temporais, principalmente de salinidade, apresentam várias lacunas devido a problemas de incrustação dos sensores. A densidade foi calculada, apenas para os sensores fundeados, utilizando a rotina *swdens* do Matlab, considerando as profundidades médias acima relacionadas

3.2 Simulações Numéricas

Para a avaliação com modelagem numérica foram utilizadas as saídas do modelo hidrodinâmico ***Regional Ocean Modelling System*** (ROMS), implementado em duas grades aninhadas com resolução horizontal da grade interna variando entre 200 m e 50 m (Figura 2), com período de simulação se estendendo de 2008 até 2021, com 30 níveis verticais de coluna d'água, e saídas gravadas em intervalos horários (Franklin *et al.*, 2024). O modelo utilizou a reanálise global do CFSR como forçamento atmosférico, condições de contorno oceânicas do GLORYS e condições iniciais do HYCON. Ainda como condição de contorno, foram incluídas as vazões médias diárias de 42 rios afluentes ao domínio do modelo, 15 deles relacionados a pequenos cursos fluviais desaguando internamente na BTS. O forçamento de maré de todas as simulações foi obtido da base de dados TPXO 8.0 (Egbert; Erofeeva, 2002), com resolução espacial de 1/12 grau, que forneceu amplitudes e fases das oito principais componentes diurnas e semi-diurnas das correntes da maré barotrópica na região (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 e Q1). Finalmente, a representação batimétrica da BTS baseou-se nas cartas náuticas do CHM com refinamento de dados nos trechos mais internos da baía promovido por levantamentos do grupo de pesquisa da UFBA e de firmas privadas.

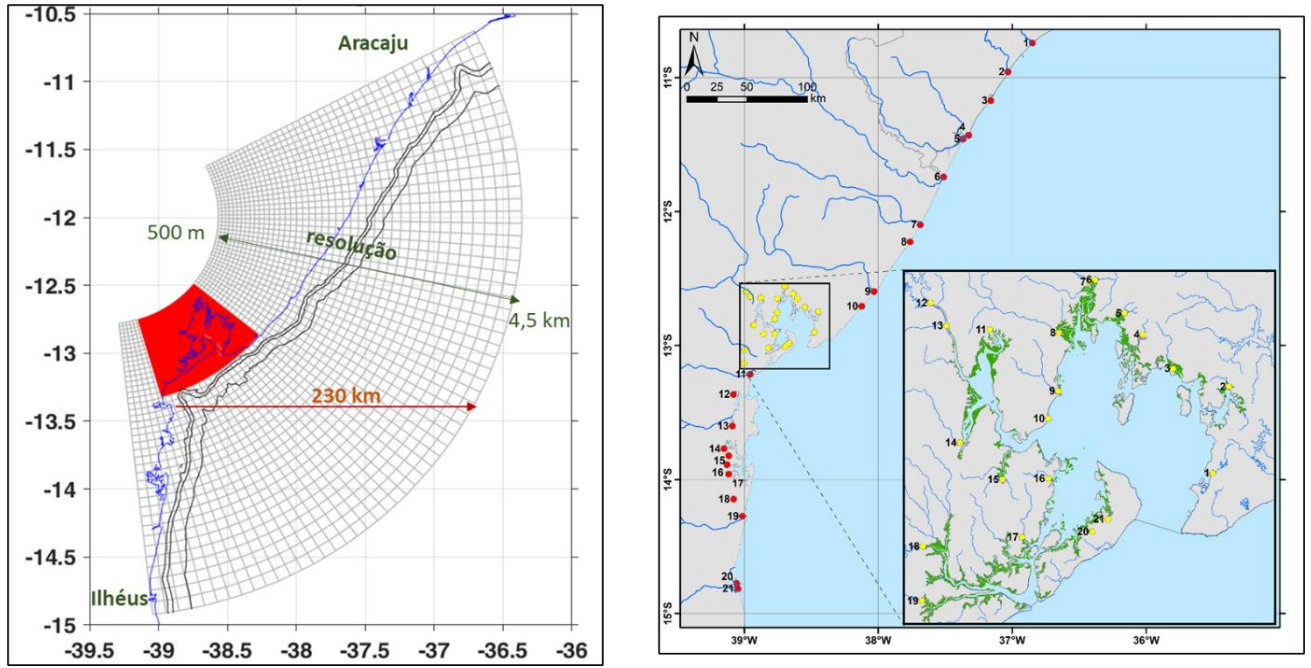


Figura 2 - Grade utilizada na Simulação numérica, mostrando a resolução da grade mãe (Área externa) e da grade filha (Área em Vermelho), estações em vermelho e amarelo são as inserções de rio

A quantificação dos erros foi feita através do erro quadrático médio (RMSE), índice de correlação de Pearson e viés do campo de densidade, calculados de acordo com as seguintes equações:

$$RMSE = \sqrt{(1/N) \sum_{i=1}^N (X_{(obs,i)} - X_{(sim,i)})^2}$$

Equação 2: Equação de Cálculo do Erro Quadrático Médio

onde: $X_{(obs)}$ são os valores observados, $X_{(sim)}$ são os valores simulados, N é o número total de observações;

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{(obs,i)} - \bar{X}_{(obs)})(X_{(sim,i)} - \bar{X}_{(sim)})}{\left(\sum_{i=1}^N (X_{(obs,i)} - \bar{X}_{(obs)})^2 \sum_{i=1}^N (X_{(sim,i)} - \bar{X}_{(sim)})^2 \right)^{1/2}}$$

Equação 3: Equação de Cálculo da correlação de Pearson

onde: $\bar{X}_{(obs)}$ é a média dos valores observados, $\bar{X}_{(sim)}$ é a média dos valores simulados N é o número total de observações, e

$$Viés = (1/N) \sum_{i=1}^N (X_{(sim,i)} - X_{(obs,i)}).$$

O campo de velocidade foi validado por Franklin *et al.* (2024), os quais mostram que as simulações numéricas realizadas para a BTS reproduzem adequadamente campo de correntes

A variabilidade espacial dos gradientes de densidade e circulação gravitacional foi investigada no ano de 2013, onde ocorreram recordes de alta densidade entre meses de abril e junho e descargas do rio Paraguaçu próximo à média no período de cheia ao final do ano (Lessa *et al.*, 2019). Foram definidas 26 estações de amostragem ao longo de um perfil longitudinal ao eixo principal da BTS (Figura 3), direcionado para o rio Paraguaçu, tendo sido privilegiada localizações próximas das estações de observação.

Os dados de velocidade provenientes das simulações numéricas foram inicialmente rotacionados de modo a se alinharem ao eixo principal do canal estuarino (Tabela 1), sendo assim extraída a componente do fluxo longitudinal ao canal estuarino. Tanto as séries temporais de densidade como as de corrente tiveram frequências mareais de oscilação removidas através da aplicação do filtro espectral Lanczos com frequência de corte de 53 horas, janela esta coincidente com o período inercial na latitude da BTS. O cisalhamento vertical da coluna d'água foi calculado subtraindo as médias de superfície (entre 4 m e 9 m de profundidade) e fundo (entre 3 m e 8 m acima do fundo) em cada estação. Os gradientes de densidade foram calculados utilizando as médias verticais da densidade entre pares equidistante de estações relativo à estação de referência das correntes. As distâncias foram aumentadas progressivamente até um limite máximo de 7 estações (6 acima e 6 abaixo da estação de referência).

Para investigação da variabilidade interanual do gradiente de densidade e circulação gravitacional, extraiu-se a série temporal de densidade e correntes para todo o período de simulação (2008 a 2021) das estações 9, 10 e 11, localizadas na região central da baía.

A análise de EOF foi feita em Matlab utilizando a rotina EOF(Greene *et al.*, 2019) . Esta análise permite regionalizar a baía com base nos padrões dominantes de variabilidade da densidade da água e identificar setores que compartilham comportamento semelhante no tempo.

Tabela 1 - Especificações das estações escolhidas para representar o transecto longitudinal ao eixo principal da BTS, representadas na Figura 3

	Profundidade (km)	Distância da Estação Anterior(km)	Distância Acumulada (km)	Latitude	Longitude	Ângulo para rotação(°)
Estação 1	42.49	0.00	0.00	-13.0067	-38.5608	0.00
Estação 2	36.61	1.81	1.81	-12.9909	-38.5583	0.00
Estação 3	40.59	1.20	3.01	-12.9804	-38.5606	0.00
Estação 4	35.10	1.85	4.86	-12.9642	-38.5637	0.00
Estação 5	21.00	1.92	6.78	-12.9466	-38.5640	0.00
Estação 6	30.63	3.25	10.03	-12.9194	-38.5750	45.00
Estação 7	48.84	2.63	12.66	-12.9021	-38.5917	60.00
Estação 8	36.27	2.04	14.70	-12.8923	-38.6077	70.00
Estação 9	38.89	1.89	16.59	-12.8877	-38.6239	60.00
Estação 10	41.51	2.00	18.59	-12.8791	-38.6403	55.00
Estação 11	49.91	2.77	21.36	-12.8650	-38.6617	20.00
Estação 12	45.00	2.20	23.56	-12.8464	-38.6691	40.00
Estação 13	26.44	2.37	25.93	-12.8299	-38.6832	60.00
Estação 14	24.13	2.09	28.02	-12.8210	-38.7000	80.00
Estação 15	18.47	1.64	29.66	-12.8166	-38.7145	85.00
Estação 16	11.89	1.89	31.55	-12.8148	-38.7316	100.00
Estação 17	10.89	2.10	33.65	-12.8177	-38.7505	110.00
Estação 18	17.02	2.13	35.78	-12.8240	-38.7690	105.00
Estação 19	27.06	2.20	37.98	-12.8298	-38.7883	130.00
Estação 20	22.48	2.04	40.02	-12.8418	-38.8026	130.00
Estação 21	30.38	2.02	42.04	-12.8537	-38.8168	85.00
Estação 22	12.88	2.49	44.53	-12.8512	-38.8396	40.00
Estação 23	22.20	2.22	46.75	-12.8357	-38.8528	40.00
Estação 24	44.32	1.85	48.60	-12.8230	-38.8641	10.00
Estação 25	27.07	1.96	50.56	-12.8060	-38.8607	15.00
Estação 26	20.78	2.11	52.67	-12.7836	-38.8675	30.00

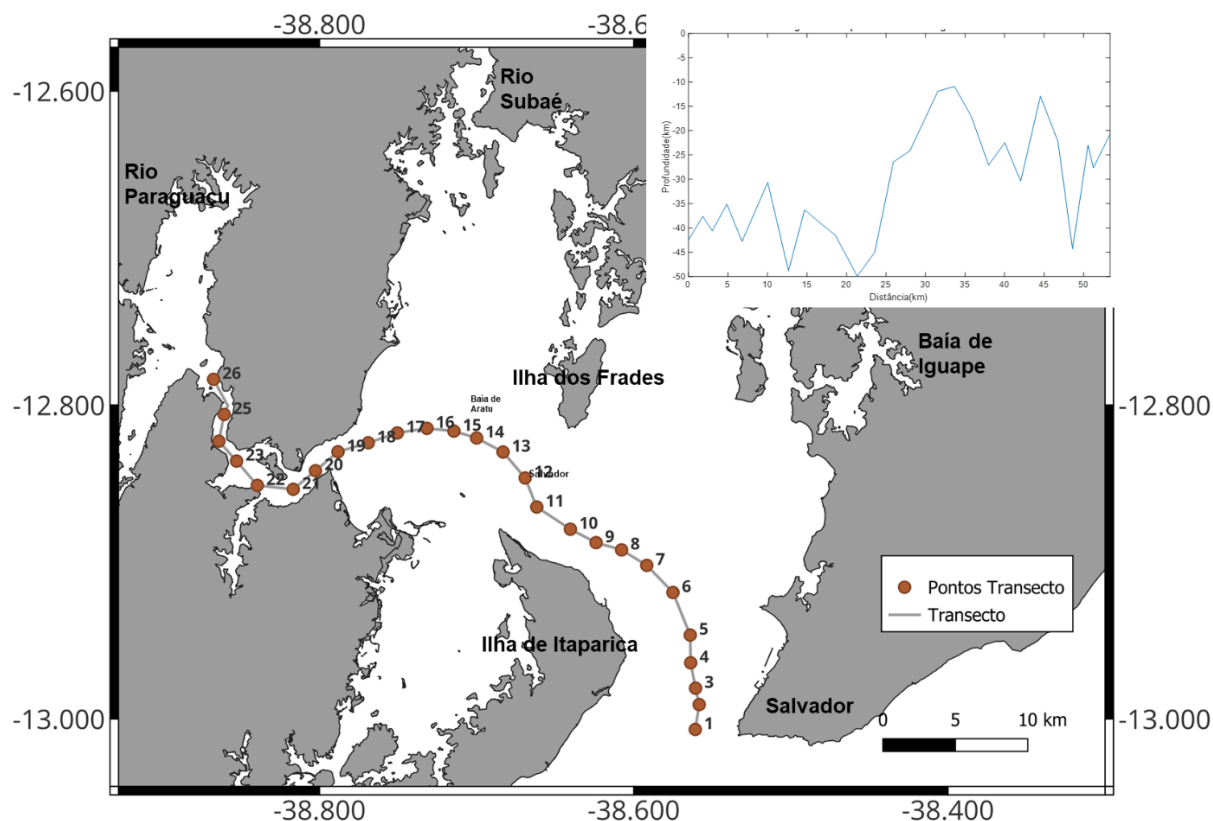


Figura 3: Localização das estações extraídas do modelo e perfil longitudinal ao longo do trajeto, no canto superior direito a batimetria do modelo para o transecto

4 Resultados e Discussão

4.1 Validação do Modelo Numérico

4.1.1 Campanhas de 2012 a 2014

A Figura 4 mostra a variação do viés para as 9 estações de perfilagem vertical. O viés médio e máximos positivo e negativo, considerando todas as estações, foram de -0,10, 0,42, -0,94, respectivamente, indicando uma tendência geral de subestimativa das densidades. Considerando cada uma das estações, os valores médios variaram entre -0,7 até 0,12. Nas campanhas de inverno houve uma tendência de subestimação dos dados, com viés médio de -0,345. (valores de viés relacionados no Anexo A).

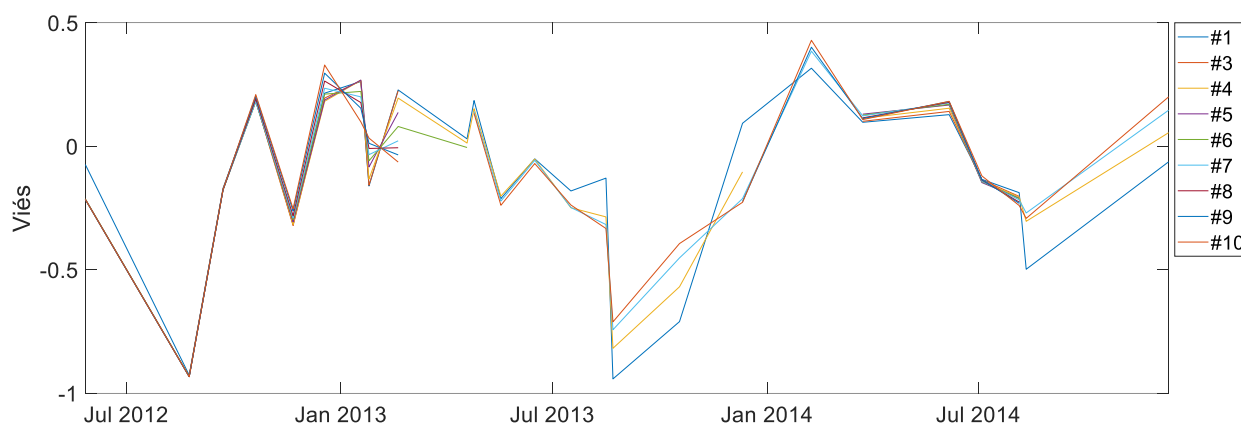


Figura 4 - Viés das campanhas realizadas em 2012-2014

O valor de RMSE máximo da densidade foi de $0,96 \text{ kg/m}^3$, sendo que este cresce ao adentrar a baía (Figura 5). A campanha 18 foi a campanha com os erros mais elevados, sendo de $0,2 \text{ kg/m}^3$ na estação 1 e de $1,48 \text{ kg/m}^3$ na estação 9. Em relação à sazonalidade, o modelo superestimou a densidade em todas as estações, com maiores erros no fundo encontrados nas campanhas 18 na primavera e na campanha 19 no outono, sendo esses de $3,30$ e $1,48 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. As campanhas de outono e inverno apresentaram os maiores valores de erro tanto na superfície quanto no fundo, com máximos de $2,09 \text{ kg/m}^3$ na superfície e $2,41 \text{ kg/m}^3$ no fundo. Os resultados indicam que ocorre maior acurácia na reprodução das densidades na superfície, com diferenças superiores a $0,3$ unidades em alguns casos. Observou-se um valor excepcionalmente elevado de erro quadrático médio (RMSE) na campanha 18, realizada durante a primavera, com valores superiores aos registrados nas campanhas de inverno e outono. Nessa campanha, o RMSE atingiu $3,3 \text{ kg/m}^3$ no fundo e $2,717 \text{ kg/m}^3$ na superfície, acompanhado também de altos valores de viés, o que indica uma discrepância sistemática entre os dados modelados e observados em ambas as camadas da coluna d'água.

(Os erros estão tabulados no

Anexo B e

Anexo C)

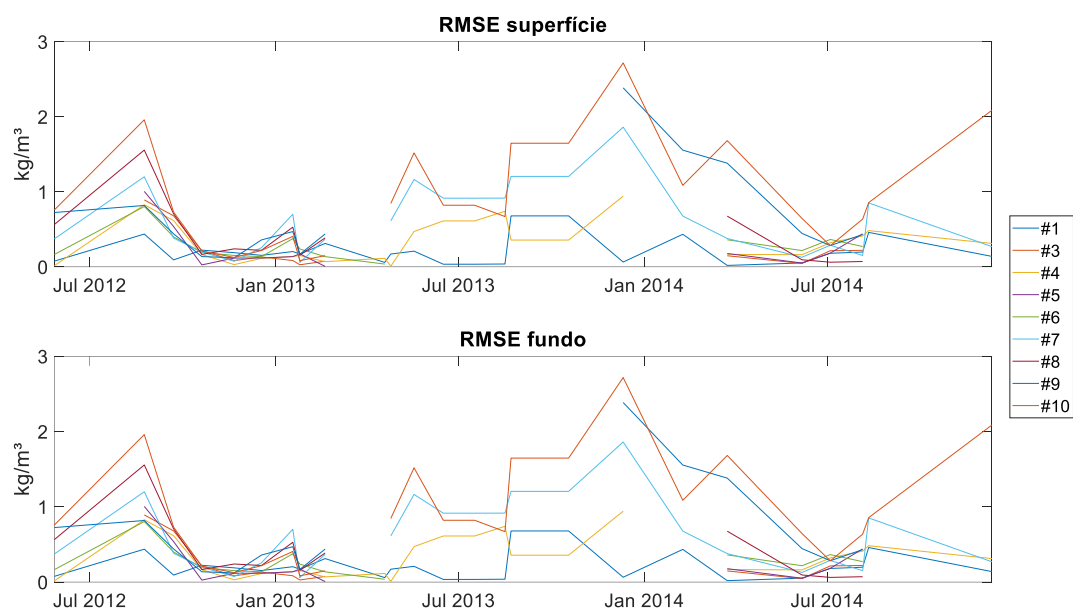


Figura 5 - Valores de RMSE obtidos para as campanhas realizadas entre 2012 e 2014. O gráfico superior apresenta os valores de RMSE para os dados de superfície, enquanto o inferior exibe os valores correspondentes aos dados de fundo.

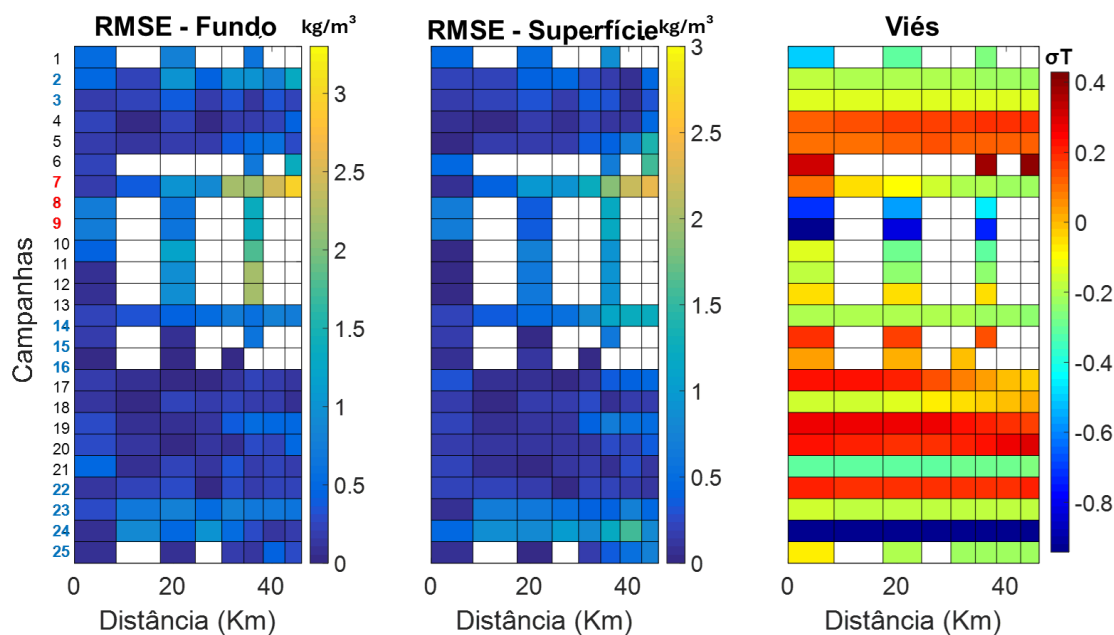


Figura 6 – Valores de RMSE e Viés do campo de densidade nos anos de 2012 a 2014. Campanhas em vermelho são no verão, em azul no período de inverno.

4.1.2 Sondas Fundeadas entre 2013 e 2015

A Figura 7 mostra a série temporal dos dados simulados e dos dados observados nas 3 estações. Valores de erro e correlação foram de 0,29 kg/m³ e 0,71 na estação TS2f, de 0,46 kg/m³ e

0,61 na estação TS2s e 1,24 kg/m³ e 0,742 na estação TS3s. Percebe-se o aumento considerável do erro na estação TS3, mais adentro da baía e próxima da saída do rio Paraguaçu, principalmente entre o início do período úmido (maio) e maiores descargas do rio Paraguaçu (dezembro) (Figura 1)

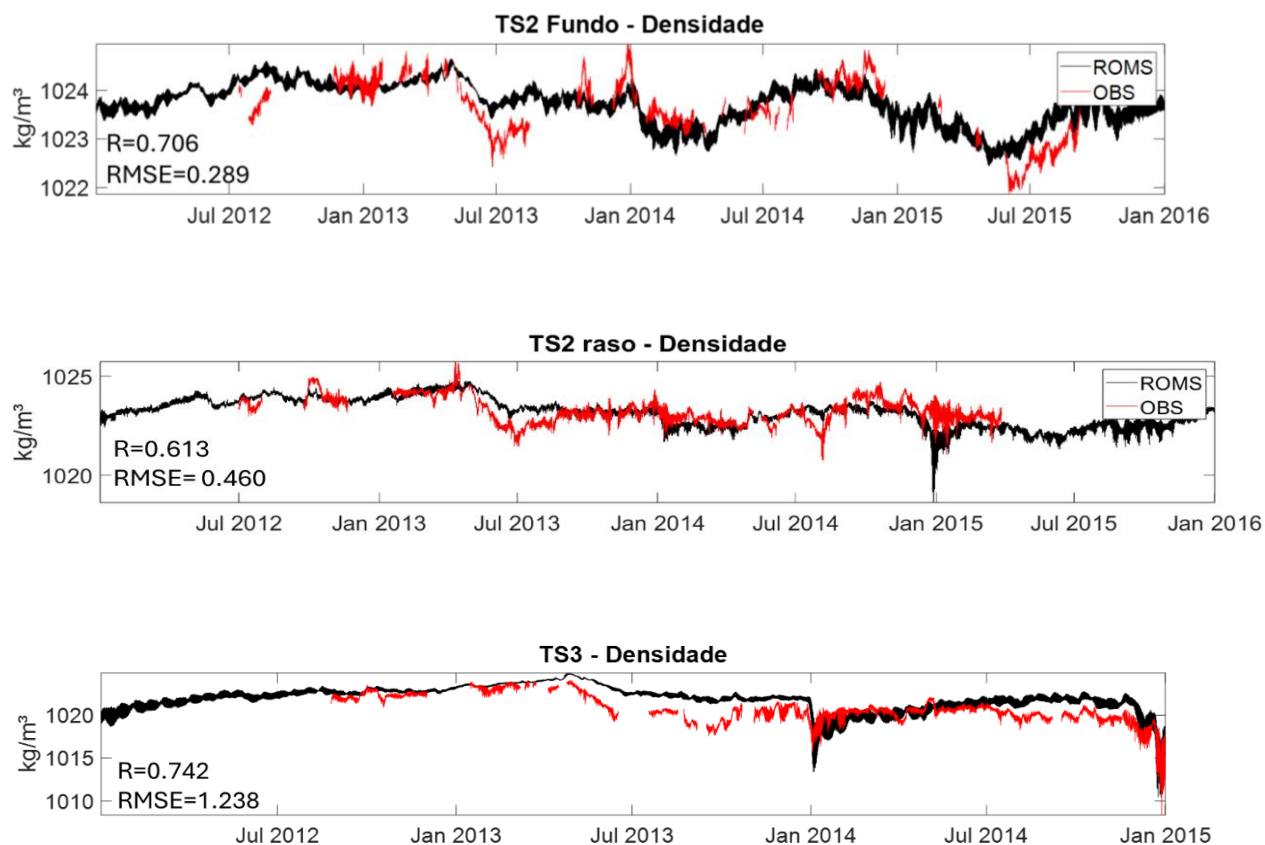


Figura 7 - Séries temporais de densidades observadas e simuladas entre 2012 e 2015

4.2 Campo de Densidade no ano de 2013

A Figura 8 mostra a distribuição espacial da média mensal da densidade média da coluna d'água extraída do modelo. Os maiores valores ocorrem nos meses de verão, sendo que neste ano específico os valores máximos ocorreram em abril. Também é perceptível campos de hiper densidade se iniciando nos segmentos da baía nos meses de verão de 2012 até o momento que a BTS tem uma área onde se encontram densidades maiores que na sua boca.

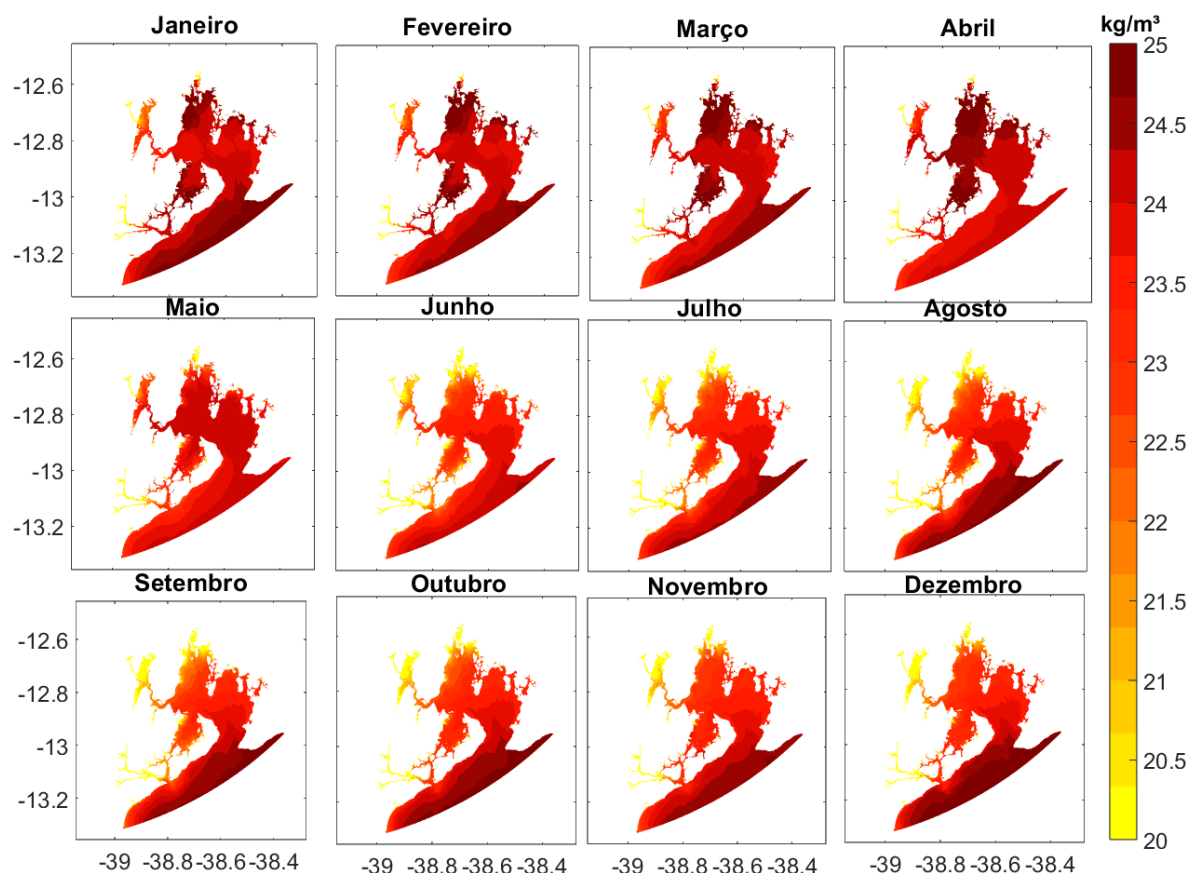


Figura 8 - Campo médio mensal de densidade da BTS em 2013.

A Figura 9 mostra que o primeiro modo do EOF explica mais da metade da variância observada na região, e separa duas regiões, uma mais influenciada pela drenagem do rio Paraguaçu com fluxo de verão, e outra das bacias costeiras com fluxo de inverno. O 2º modo do EOF, explicando 30% da variabilidade, representa uma variabilidade determinada por ciclos de 45 a 60 dias e separa regiões com balanço de água e calor distintos na primavera e verão, como descrito no parágrafo acima.

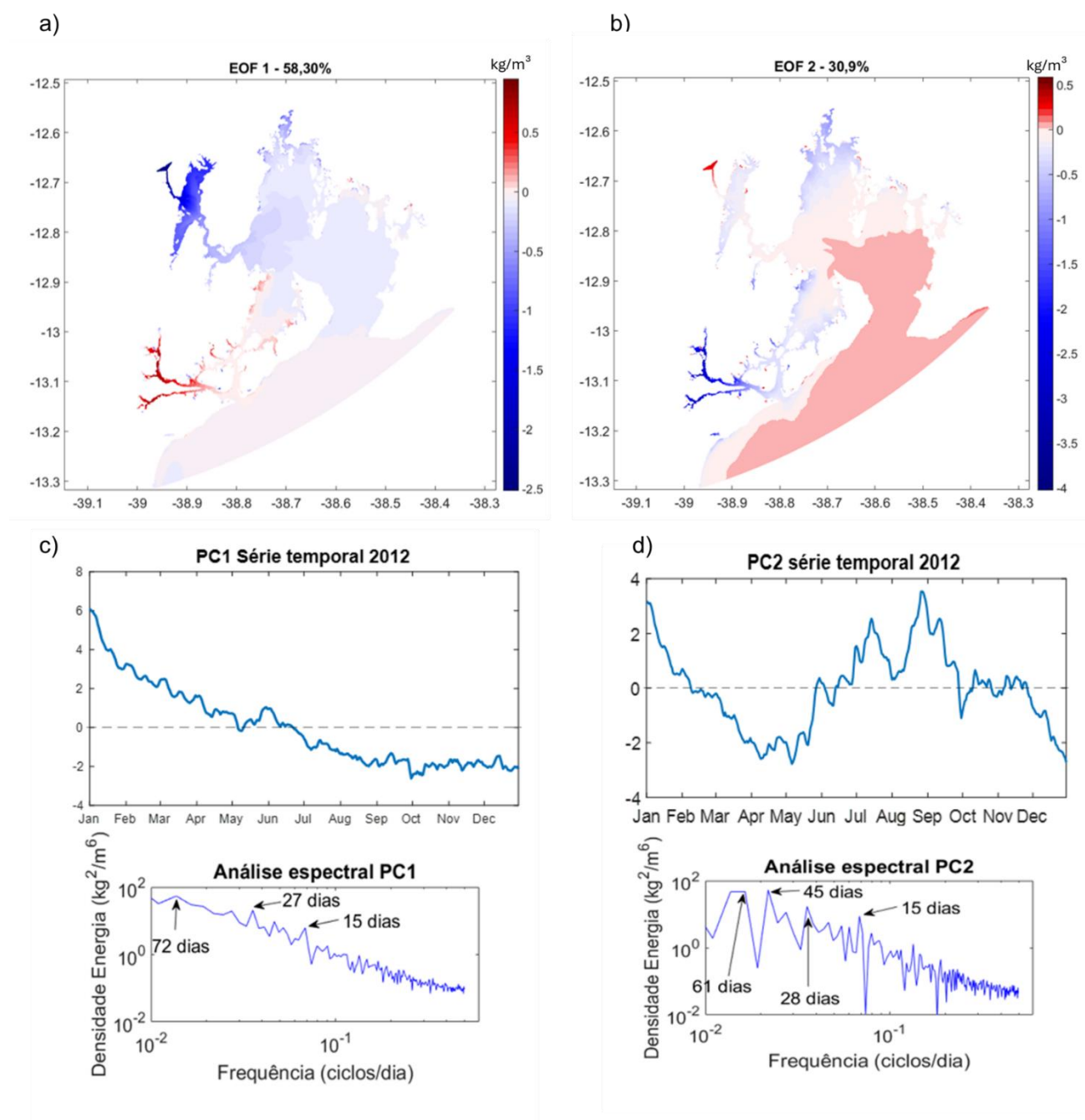


Figura 9 -Gráficos de Resultados das análises de EOF feitas para o campo de densidade da BTS

4.3 Variabilidade espacial em 2013

A Figura 10 mostra a variação temporal da estrutura vertical da densidade da água em diferentes estações ao longo da BTS da saída do modelo, especificamente nas estações 2, 4, 7, 9, 14, 15, 17, 20, 24 e 26, dispostos da entrada em direção ao interior da baía. Observa-se que, da estação 2 à estação 9, os valores de densidade permanecem elevados durante todo o período analisado, indicando influência predominante das massas de água oceânicas. Durante o verão, nota-se uma densidade mais elevada em praticamente as estações, reflexo das condições típicas de baixa

descarga fluvial, alta evaporação e maior salinidade. No entanto, à medida que se aproxima o outono e o inverno, observa-se uma redução nos valores de densidade pontualmente na estação 14, e definitivamente a partir da estação 17. Tendo uma variação máxima vertical de 0.4 entre a superfície e o fundo.

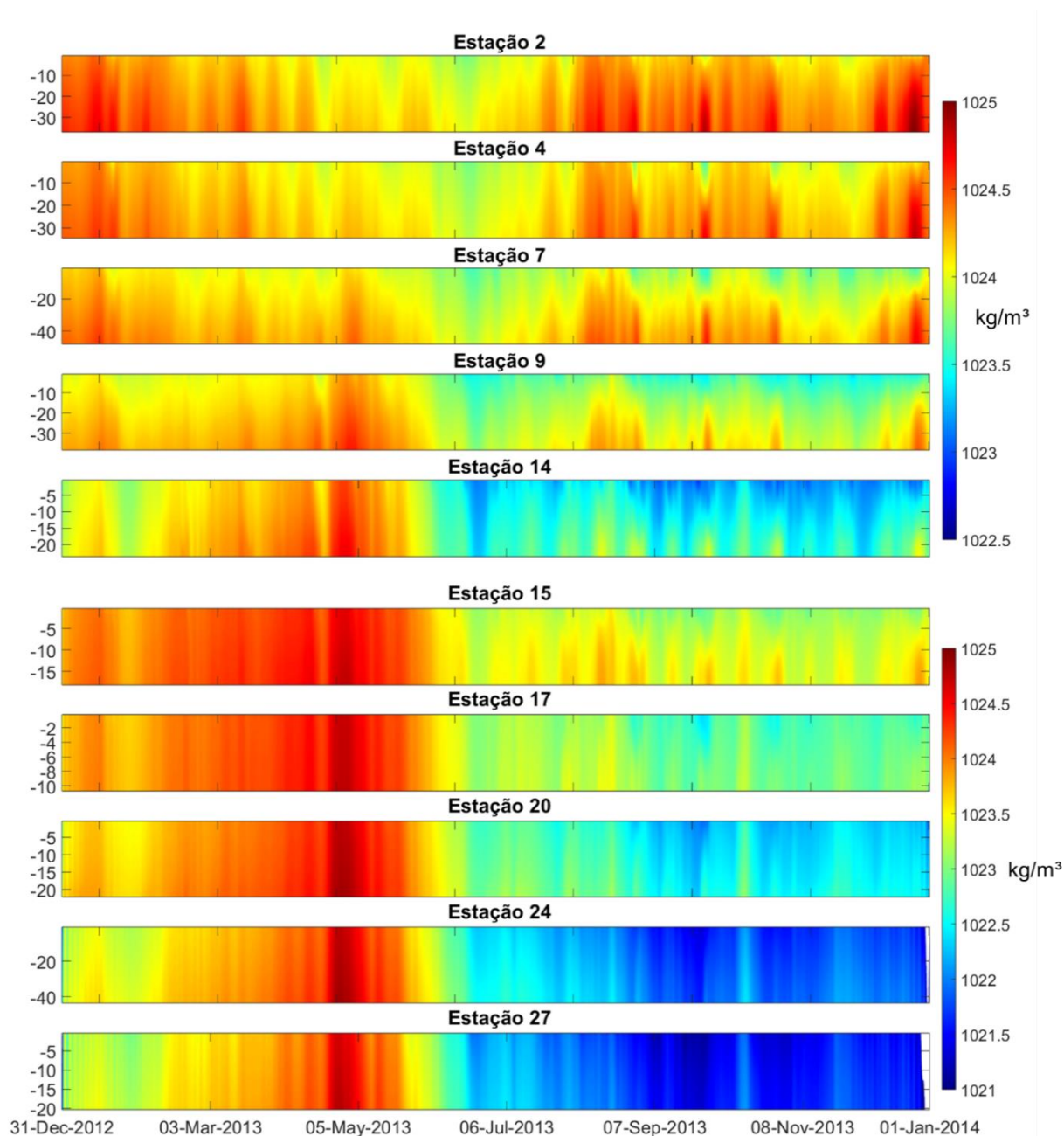


Figura 10 - Densidade para as estações 15, 17, 20, 24, 27 para todo o ano de 2013 de dados simulados

A Figura 11 mostra as velocidades longitudinais na banda sub-mareal para as mesmas estações. Observa-se a ocorrência de estratificação em quase todo o período do ano, porém com

uma inversão de direção, para uma circulação gravitacional estuarina inversa, no período de abril e maio até a estação 17, a partir dessa estação a circulação se manteve.

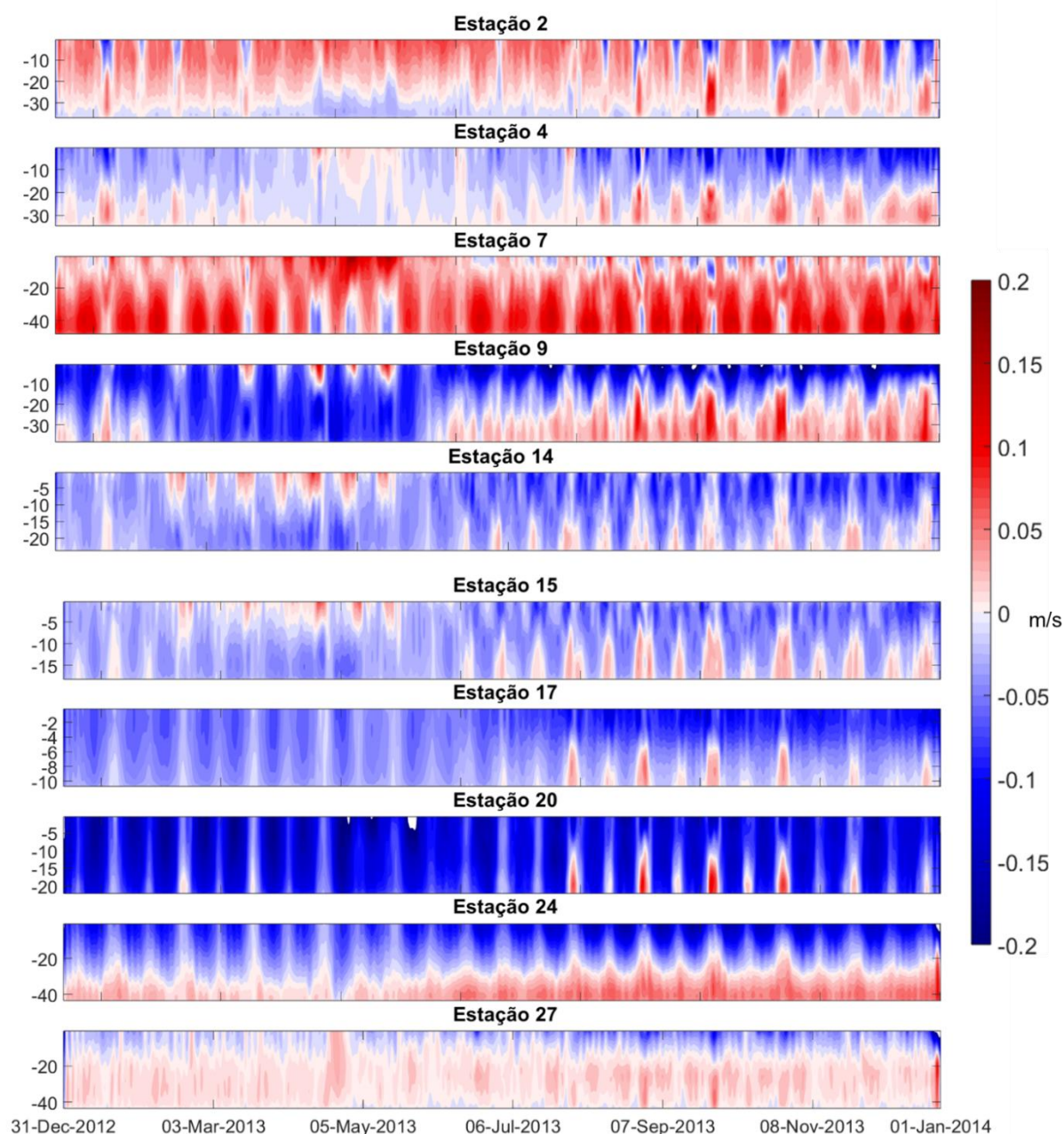


Figura 11-Velocidade longitudinal para as estações 2, 4, 7, 9, 14 para todo o ano de 2013 de dados simulados

Na Figura 12a temos evidenciado a inversão da circulação estuarina em um resultado dos dados simulados, onde é perceptível e corroborado com os dados de densidade da Figura 13b onde podemos ver que dentro da Baía temos valores de densidade maiores que fora da baía, tendo valores

máximo de 1024,88 kg/m³ na estação 19 equivalente a 37 km dentro da BTS e mínimo de 1024,02 kg/m³ na estação 1 na entrada BTS.

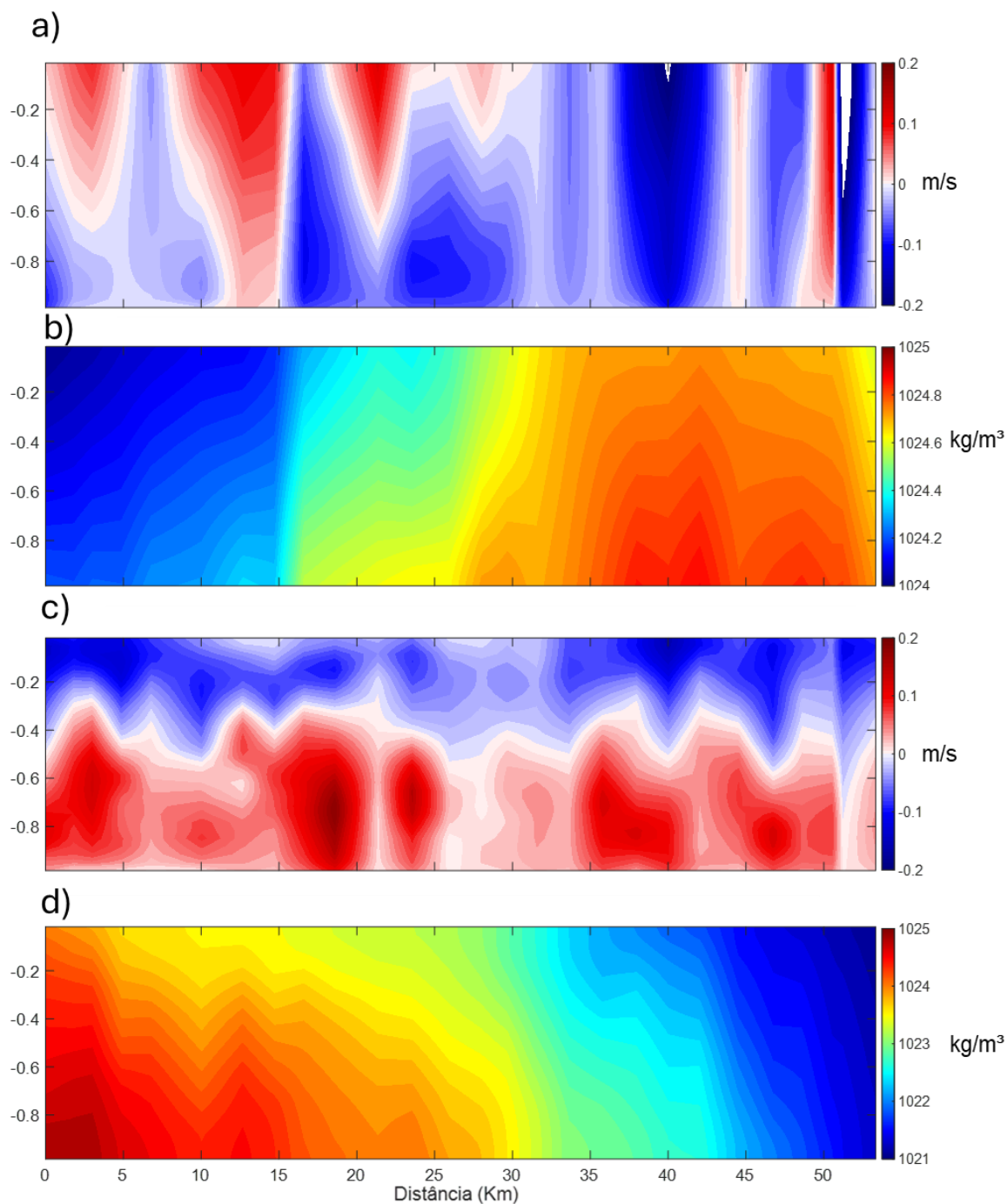


Figura 12 – A) Velocidade Longitudinal no dia 29 de abril as 00:00 ao longo do Transecto B) Densidade no dia 29 de abril as 00:00 ao longo do Transecto C) Velocidade Longitudinal no dia 28 de setembro as 00:00 ao longo do Transecto D) Densidade no dia 28 de setembro as 00:00 ao longo do Transecto

Na Figura 12c temos a condição de circulação estuarina dos dados simulados para 00:00 de 28 de setembro, onde podemos ver uma circulação gravitacional comum bem estratificada. Na Figura 12d podemos ver a condição da densidade na BTS para o dia 28 de setembro, temos uma maior variação de densidade ao longo do canal tendo um máximo de 1024.9 kg/m^3 na estação na entrada da baía e mínimo de 1021.11 kg/m^3 na estação 26 que é estação mais próxima do Paraguaçu.

A variabilidade espaço-temporal do gradiente de densidade entre as estações é apresentado na Figura 13. Observa-se que durante a maior parte do ano o gradiente permanece negativo com valores máximos de até 0.11 kg/m^3 e mínimos de até -0.46 kg/m^3 , ou seja, a densidade diminui em direção ao interior da BTS. No entanto, durante o mês de abril, identifica-se uma inversão temporária desse padrão, com o gradiente tornando-se positivo e atingindo um valor máximo de $0,21 \text{ kg/m}^3$. Os gradientes positivos são estabelecidos inicialmente a 25 km (estação 13) e se tornam mais fortes a 16 km no mês de maio (estação 10), quando se estendem ao longo de 40 km, até a estação 20. No km 10 e 21 (estação 6 e 11), temos uma manutenção do gradiente positivo no ano inteiro de 2013.

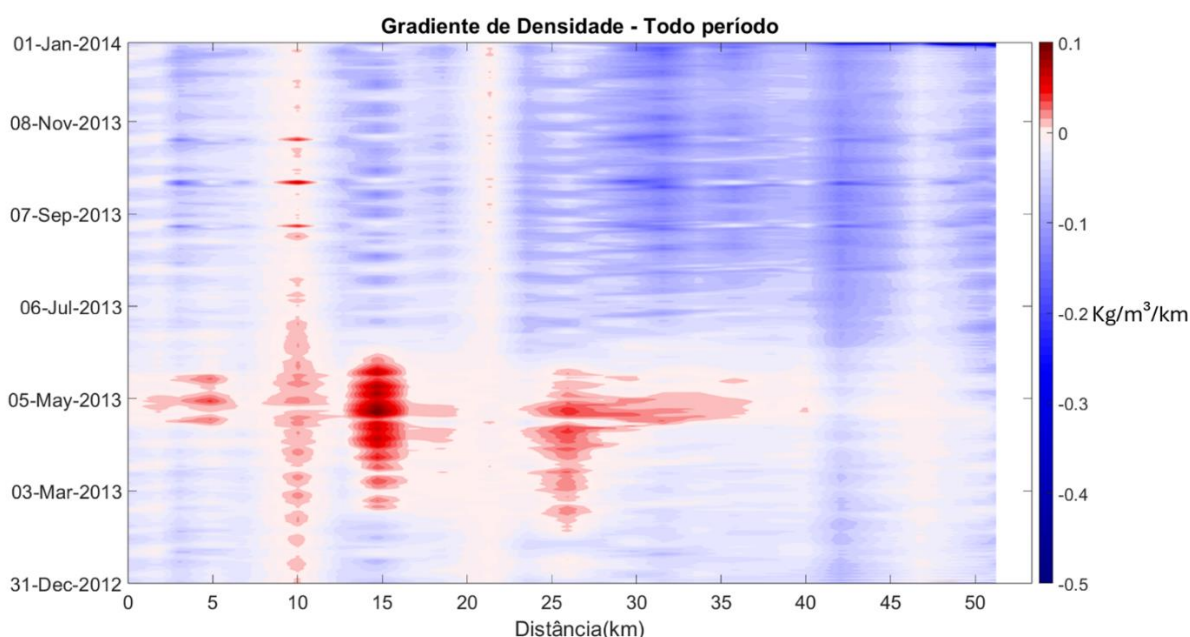


Figura 13 - Gradiente de densidade para o ano de 2013

A Figura 14 mostra o grau de correlação (R), entre o gradiente horizontal de densidade e o cisalhamento nas estações, considerando progressivo espaçamento das distâncias no cálculo do gradiente. A correlação é positiva em todas as estações e para todas as distâncias de cálculo do gradiente, com exceção da estação 2. O valor máximo de correlação foi de 0.92, sendo que na metade oeste da BTS (entre estações 9 e 18), as correlações foram mais fortes considerando

distâncias de até 14,58 km nos gradientes longitudinais de densidade. Na metade leste, mais externa, as correlações tenderam a ser mais fortes com o aumento do intervalo espacial no cálculo do gradiente. (Valores de Correlação relacionados no Anexo D)

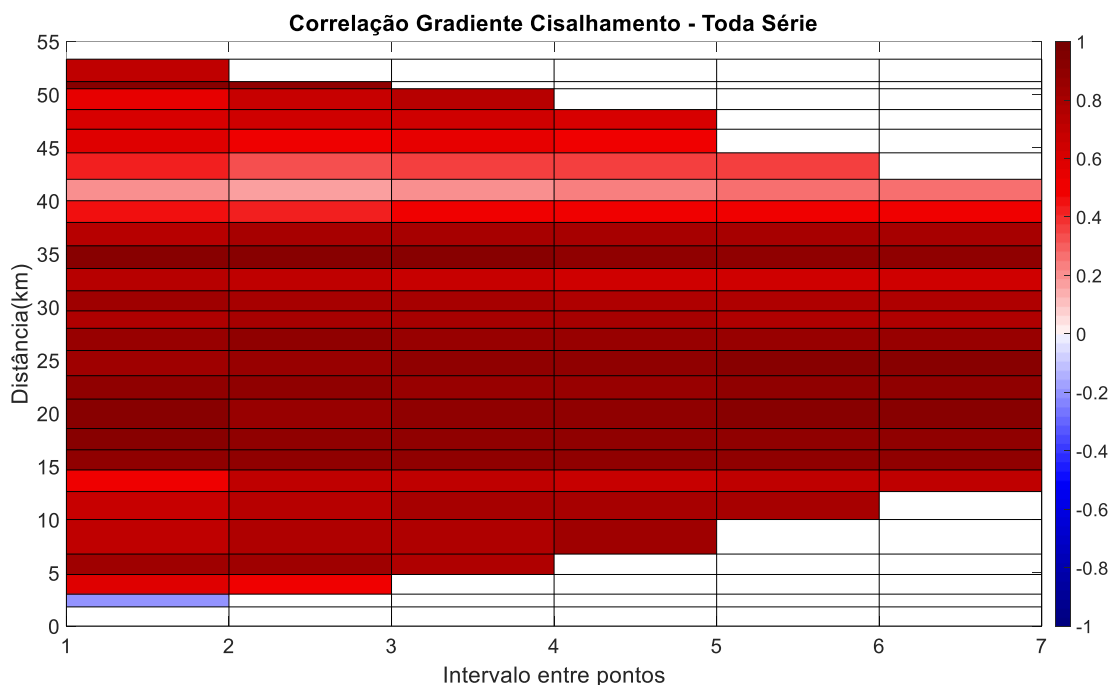


Figura 14- Número de estações consideradas no cálculo do gradiente longitudinal de densidade Variabilidade interanual

4.4 Variabilidade Temporal 2008-2021

A Figura 15a mostra a densidade média da coluna d'água para as estações 9, 10 e 11, onde observa-se forte coerência entre as séries. Valores máximos positivos de $1024,82 \text{ kgm}^{-3}$ ocorreram no inverno, julho de 2017, e valores mínimos de $1021,48 \text{ kgm}^{-3}$ ocorreram em fevereiro de 2016. O ciclo sazonal não é bem-marcado, apesar de se observar uma tendência de os maiores valores ocorrerem no final dos anos. A análise espectral (Figura 15a) destas séries identifica ciclos bem-marcados de 4,6 anos, ~ 1 ano e 2,3 anos, com ciclo sazonal sem relevância.

A Figura 15b mostra as diferenças de densidade entre a estações 10 e as estações 9 e 11. Observa-se que um gradiente estuarino de densidade foi invertido em outros dois momentos além de 2013, nos verões de 2017 e 2018. O maior gradiente foi de $-0,017 \text{ kgm}^{-3}/\text{km}$ em 2013, enquanto em 2017 chegou a $0,013 \text{ kgm}^{-3}/\text{km}$ e em 2018 a $0,013 \text{ kgm}^{-3}/\text{km}$. Ocorre uma tendência de aumento do gradiente estuarino de densidade a partir de 2019

A Figura 15c **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o cisalhamento vertical na estação 10, onde observa-se inversões no sinal do cisalhamento concordantes com os gradientes positivos de densidade. A correlação entre estas duas séries é de 0,83.

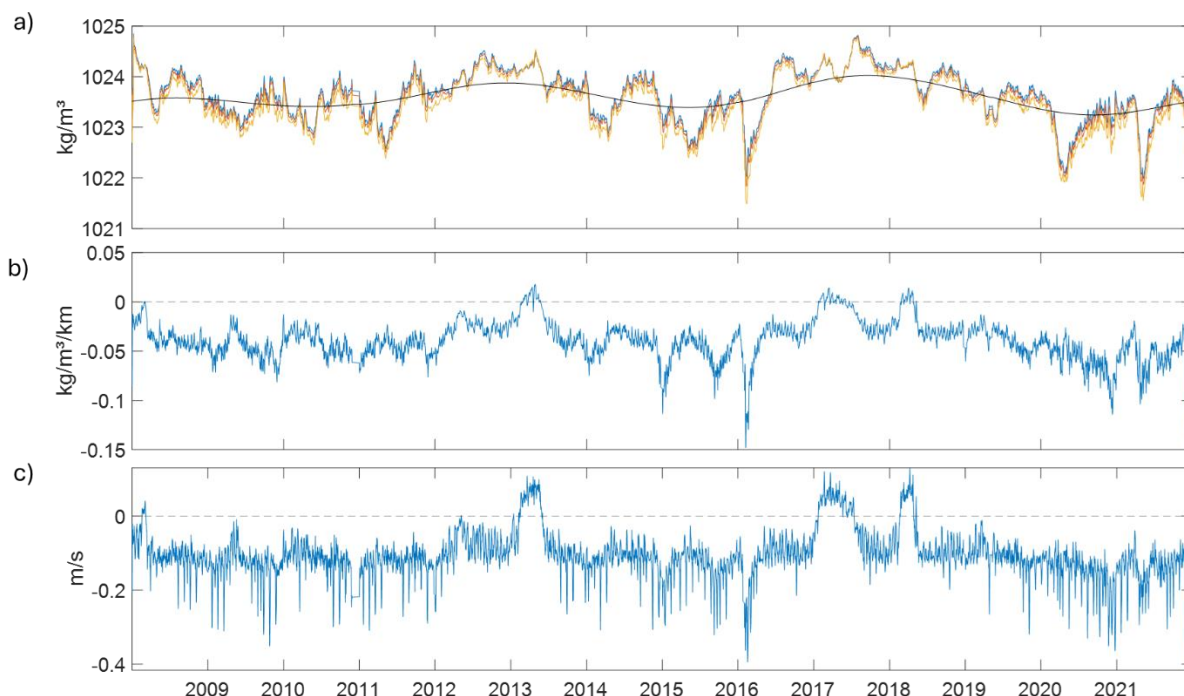


Figura 15 – A) Série temporal da densidade média vertical simulada das estações 9, 10 e 11, com a série filtrada (período de corte de 4,6 anos) sobreposta B) Variação dos gradientes de densidade entre as estações 9 e 11 relativos à estação 10. C) Cisalhamento da estação 10

5 Discussão

Os resultados das simulações numéricas apresentaram boa correspondência com os dados observacionais disponíveis para a BTS, indicando uma representação realista do campo de densidade e dos padrões de circulação estuarina. Conforme observado também por (Franklin *et al.*, 2024), o uso de modelos de alta resolução, como o ROMS, é eficaz na simulação de processos costeiros complexos, incluindo a dispersão larval e a influência da hidrodinâmica sobre os ecossistemas. Os resultados reforçam a confiabilidade do modelo utilizado no presente estudo, especialmente considerando a variabilidade sazonal dos ventos e das descargas fluviais, que são elementos-chave no forçamento da circulação residual (Santana; Teixeira; Lessa, 2018). No entanto, o modelo parece apresentar, pontualmente, dificuldades de reprodução das condições ambientais, como visto na estação 6 e 11 onde o gradiente de densidade se manteve positivo ao longo de todo o ano de 2013.

Foi observado pela análise do ano de 2013, que nos períodos de secas mais severas, é possível ocorrer uma rocha de densidade dentro da baía, e com isso uma inversão da circulação

gravitacional que pode influenciar no tempo de residência da baía. Santana *et al.* (2018) mostram que a ausência da forçante baroclínica.

A inversão da circulação que ocorreu em 2013 pode estar associada à intensificação da aridificação. Na metade leste mais externa temos correlações maiores chegando a até 15 km com as maiores correlações que são diferentes aos valores encontrados por Fonseca (2024), onde ele encontrou as maiores correlações sendo para 2,2 km ,levando em conta que em valores próximos a 2 km tivemos altas correlações porém as maiores estavam em torno dos 15, ele encontrou baixas correlações numa situação de costa nos 30 km.

A densidade no centro da BTS apresentou clara ciclicidade com período de 4,6 anos, onde as maiores diferenças de densidades ocorrem nos anos mais úmidos.

O cisalhamento e o gradiente têm uma equivalência de ocorrência no qual o gradiente entre 3 estações tem uma boa correspondência na correlação assim como no caso de 2003 onde aparenta que de 3 a 6 estações se tem os maiores valores de correlação.

Segundo (Marengo *et al.*, 2022), em 2016, a região do Nordeste do Brasil (NEB) vivenciou um período de seca significativa. Este ano foi parte de um longo e severo período de estiagem que ocorreu entre 2012 e 2018, tendo como principais fatores que agravaram a seca em 2016 a ocorrência de um evento de El niño e águas superficiais mais quentes no Atlântico tropical norte (fase positiva do dipolo do Atlântico). De fato, os resultados do modelo mostram uma tendência linear de aumento da densidade entre 2008 e 2017 e mostram que pode ter ocorrido rolhas de densidade nos anos de 2017 e 2018.

Segundo Mariani *et al* (2022), há uma tendência de aridificação na BTS tendo diminuição nas descargas fluviais de 21,6 m³/s por ano e aumento na temperatura do ar de 0,24 C° por década. o que pode levar a enfraquecer a circulação baroclínica e pode explicar as possíveis rolhas de densidade dos anos de 2017 e 2018

6 Conclusão

Este trabalho analisou detalhadamente a variabilidade espaço-temporal da densidade da água na Baía de Todos os Santos ao longo de 14 anos de simulações numéricas com o modelo ROMS de alta resolução. Os resultados mostraram que a densidade é um elemento estruturante da circulação estuarina da BTS, sendo esta fortemente modulada por padrões sazonais de precipitação e, descarga fluvial, e variações interanuais.

A análise espacial no ano de 2013 revelou episódios de inversão do gradiente longitudinal de densidade em resposta ao verão muito seco, com ocorrência de “rolha de densidade” que forçaram o estabelecimento de uma circulação estuarina inversa

Ocorre variabilidade interanual dos gradientes de densidades, com ciclos de 4,6 anos, indicando a existência de padrões oscilatórios de maior escala, possivelmente relacionados aos ciclos de El Niño e dipolo do Atlântico. A presença de eventos semelhantes aos observados em 2013 nos anos de 2017 e 2018 mostra que a BTS se encontra sob crescente pressão climática, o que tende a enfraquecer a circulação baroclínica típica do estuário.

A forte correlação entre os gradientes longitudinais de densidade e o cisalhamento vertical, com distância de influência máxima em torno de 15 km, que diferem dos achados recentes de Fonseca *et al.* (2024), porém contribui com critérios mais objetivos para a determinação da escala de influência desses gradientes na dinâmica estuarina.

Em síntese, este estudo confirma a sensibilidade da circulação da BTS às variações no campo de densidade e reforça a importância do monitoramento e modelagem de longo prazo para antecipar mudanças no funcionamento do estuário frente a um cenário de intensificação das mudanças climáticas. Os resultados aqui apresentados subsidiam a formulação de estratégias de gestão ambiental, especialmente no tocante à conservação da qualidade da água, à manutenção da biodiversidade e ao planejamento de atividades portuárias e industriais.

6.1 Referências Bibliográficas

- AGUIAR, A. L. *et al.* Ocean-estuary exchange variability in a large tropical estuary. **Continental Shelf Research**, v. 172, p. 33–49, jan. 2019.
- CIRANO, Mauro; LESSA, Guilherme Camargo. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 4, p. 363–387, dez. 2007.
- EGBERT, Gary D.; EROFEEVA, Svetlana Y. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 2, p. 183–204, fev. 2002.
- FONSECA, Lucas S. *et al.* Coastal Upwelling and Estuarine Gravitational Circulation: A Feedback System in a Tropical Estuary in the South Atlantic. **Estuaries and Coasts**, v. 47, n. 3, p. 670–685, maio 2024.
- FRANKLIN, Taoan Silva *et al.* **High-Resolution Simulations Of Coastal Dispersion Of Tubastraea Spp. Larvae from a Large Estuary in Northeast Brazil**. SSRN, , 2024. Disponível em: <<https://www.ssrn.com/abstract=5062090>>. Acesso em: 22 jun. 2025
- GEYER, W. Rockwell; MACCREADY, Parker. The estuarine circulation. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 46, p. 175–197, jan. 2014.
- GREENE, Chad A. *et al.* The Climate Data Toolbox for MATLAB. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 20, n. 7, p. 3774–3781, jul. 2019.
- LESSA, Guilherme C.; MARIANI, Rafael; FONSECA, Lucas. Variability of the Thermohaline Field in a Large Tropical, Well-Mixed Estuary: the Influence of an Extreme Draught Event. **Estuaries and Coasts**, v. 42, n. 8, p. 2020–2037, 1 dez. 2019.
- LESSA, Guilherme Camargo *et al.* Oceanografia física. *In*: HATJE, Vanessa; B. DE ANDRADE, Jailson (Orgs.). **Baía de todos os santos: aspectos oceanográficos**. [S.l.]: EDUFBA, 2009. p. 68–119.
- MARENGO, Jose A. *et al.* Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. e17, fev. 2022.
- MARIANI, Rafael; LESSA, Guilherme C.; MARTA-ALMEIDA, Martinho. Long-term Variability of the Salinity Field in a Large Tropical, Well-Mixed Estuary: the Influence of Climatic Trends. **Estuaries and Coasts**, v. 45, n. 3, p. 721–736, 1 maio 2022.
- OLIVEIRA, Wederson Pereira. DINÂMICA DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO NO EIXO PRINCIPAL DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS. 2014.
- SANTANA, Rafael; TEIXEIRA, Carlos; LESSA, Guilherme. The Impact of Different Forcing Agents on the Residual Circulation in a Tropical Estuary (Baía de Todos os Santos, Brazil). **Journal of Coastal Research**, v. 34, n. 3, p. 544, 1 maio 2018.
- SOUZA, Bárbara. TENDÊNCIAS DE VARIAÇÃO DE LONGO PRAZO DA TEMPERATURA DA ÁGUA NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS. 2022.
- VALLE-LEVINSON, Arnoldo. **Introduction to Estuarine Hydrodynamics**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2022.

7 Anexos

Anexo A

Cálculos de viés das 25 campanhas de 2012 a 2014 (datas em azul representam inverno, verde primavera, laranja outono e amarelo verão)

Viés - Dens	Ponto 1	Ponto 2	Ponto3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9
27/05/2012	-0.074	NaN	-0.213	NaN	-0.215	-0.215	-0.215	-0.215	-0.215
24/08/2012	-0.927	-0.928	-0.931	-0.932	-0.932	-0.933	-0.933	-0.933	-0.933
22/09/2012	-0.170	-0.172	-0.174	-0.175	-0.176	-0.176	-0.176	-0.176	-0.176
20/10/2012	0.195	0.185	0.184	0.182	0.181	0.181	0.192	0.203	0.209
21/11/2012	-0.317	-0.321	-0.317	-0.306	-0.296	-0.290	-0.281	-0.262	-0.253
18/12/2012	0.215	0.195	0.182	0.187	0.211	0.235	0.264	0.296	0.329
18/01/2013	0.262	0.265	0.267	0.268	0.222	0.200	0.177	0.154	0.099
25/01/2013	-0.161	-0.158	-0.133	-0.084	-0.059	-0.034	-0.009	0.012	0.033
19/02/2013	0.228	0.225	0.195	0.137	0.080	0.022	-0.006	-0.035	-0.064
19/04/2013	0.030	NaN	0.013	NaN	-0.005	NaN	NaN	NaN	NaN
25/04/2013	0.185	NaN	0.152	NaN	NaN	0.141	NaN	NaN	0.133
18/05/2013	-0.212	-0.207	-0.202	-0.196	-0.209	-0.222	-0.229	-0.237	-0.239
16/06/2013	-0.051	NaN	-0.052	NaN	NaN	-0.057	NaN	NaN	-0.070
17/07/2013	-0.181	NaN	-0.249	NaN	NaN	-0.248	NaN	NaN	-0.238
16/08/2013	-0.129	NaN	-0.286	NaN	NaN	-0.317	NaN	NaN	-0.333
22/08/2013	-0.942	NaN	-0.818	NaN	NaN	-0.743	NaN	NaN	-0.711
18/10/2013	-0.710	NaN	-0.569	NaN	NaN	-0.452	NaN	NaN	-0.394
11/12/2013	0.093	-0.051	-0.104	-0.157	-0.209	-0.212	-0.218	-0.224	-0.227
08/02/2014	0.316	NaN	NaN	NaN	NaN	0.385	NaN	0.401	0.429
24/03/2014	0.097	0.101	0.113	0.130	0.126	0.123	0.115	0.112	0.108
06/06/2014	0.128	0.141	0.154	0.167	0.170	0.175	0.178	0.181	0.182
04/07/2014	-0.134	-0.136	-0.143	-0.147	-0.143	-0.141	-0.137	-0.135	-0.120
05/08/2014	-0.188	-0.203	-0.205	-0.210	-0.212	-0.217	-0.226	-0.231	-0.240
11/08/2014	-0.498	NaN	-0.304	NaN	NaN	-0.270	NaN	NaN	-0.292
11/12/2014	-0.063	NaN	0.055	NaN	NaN	0.146	NaN	NaN	0.200

Anexo B

Cálculos de RMSE para as campanhas de 2012-2014 no fundo(datas em azul representam inverno, verde primavera, laranja outono e amarelo verão)

RMSE - Fundo	Ponto 1	Ponto 2	Ponto3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9
27/05/2012	0.075	NaN	0.059	NaN	0.162	0.144	0.421	0.284	0.119
24/08/2012	0.085	0.892	0.477	1.005	0.562	0.286	0.130	0.185	0.130
22/09/2012	0.295	0.680	0.804	0.538	0.815	0.719	0.713	0.617	0.774
20/10/2012	0.123	0.214	0.289	0.026	0.289	0.186	0.243	0.232	0.451
21/11/2012	0.510	0.083	0.210	0.117	0.307	0.175	0.235	0.173	0.289
18/12/2012	0.273	0.132	0.044	0.118	0.093	0.261	0.217	0.486	0.130
18/01/2013	0.289	0.084	0.078	0.136	0.369	0.536	0.489	0.513	0.294
25/01/2013	0.139	0.028	0.236	0.173	0.220	0.167	0.157	0.063	0.157
19/02/2013	0.174	0.075	0.030	0.006	0.125	0.253	0.199	0.130	0.125
19/04/2013	0.047	NaN	0.040	NaN	0.005	NaN	NaN	NaN	NaN
25/04/2013	0.190	NaN	0.056	NaN	NaN	0.673	NaN	NaN	0.810
18/05/2013	0.219	0.337	0.454	0.554	0.730	0.577	0.804	0.758	0.843
16/06/2013	0.099	NaN	0.963	NaN	NaN	2.176	NaN	NaN	2.408
17/07/2013	0.099	NaN	0.963	NaN	NaN	2.176	NaN	NaN	2.408
16/08/2013	0.441	NaN	1.191	NaN	NaN	1.779	NaN	NaN	2.025
22/08/2013	0.731	NaN	0.650	NaN	NaN	1.375	NaN	NaN	1.829
18/10/2013	0.731	NaN	0.650	NaN	NaN	1.375	NaN	NaN	1.829
11/12/2013	0.199	0.381	0.986	0.891	2.175	2.121	2.473	2.986	3.300
08/02/2014	0.213	NaN	NaN	NaN	NaN	0.682	NaN	1.348	1.476
24/03/2014	0.162	0.148	0.161	0.178	0.383	0.526	0.599	0.260	0.443
06/06/2014	0.241	0.046	0.217	0.051	0.181	0.160	0.218	0.441	0.258
04/07/2014	0.166	0.215	0.381	0.183	0.342	0.139	0.342	0.215	0.584
05/08/2014	0.490	0.220	1.019	0.440	1.022	0.989	0.818	1.288	1.317
11/08/2014	0.535	NaN	0.809	NaN	NaN	0.642	NaN	NaN	0.814
11/12/2014	0.076	NaN	0.656	NaN	NaN	0.736	NaN	NaN	0.227

Anexo C

Cálculos de RMSE para as campanhas de 2012-2014 na Superfície (datas em azul representam inverno, verde primavera, laranja outono e amarelo verão)

RMSE - Superfície	Ponto 1	Ponto 2	Ponto3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9
27/05/2012	0.076	NaN	0.016	NaN	0.165	0.373	0.564	0.724	0.758
24/08/2012	0.437	0.892	0.828	1.005	0.804	1.200	1.556	0.818	1.959
22/09/2012	0.093	0.680	0.616	0.538	0.399	0.383	0.708	0.440	0.730
20/10/2012	0.223	0.214	0.164	0.026	0.192	0.197	0.166	0.137	0.211
21/11/2012	0.189	0.083	0.030	0.117	0.152	0.074	0.240	0.121	0.125
18/12/2012	0.153	0.132	0.113	0.118	0.136	0.256	0.220	0.359	0.218
18/01/2013	0.204	0.084	0.139	0.136	0.376	0.701	0.529	0.470	0.406
25/01/2013	0.171	0.028	0.151	0.173	0.238	0.059	0.156	0.168	0.083
19/02/2013	0.312	0.075	0.069	0.006	0.136	0.369	0.386	0.438	0.149
19/04/2013	0.059	NaN	0.114	NaN	0.037	NaN	NaN	NaN	NaN
25/04/2013	0.171	NaN	0.009	NaN	NaN	0.613	NaN	NaN	0.845
18/05/2013	0.209	0.337	0.471	0.554	0.815	1.164	1.235	1.253	1.518
16/06/2013	0.035	NaN	0.612	NaN	NaN	0.915	NaN	NaN	0.821
17/07/2013	0.035	NaN	0.612	NaN	NaN	0.915	NaN	NaN	0.821
16/08/2013	0.038	NaN	0.741	NaN	NaN	0.916	NaN	NaN	0.670
22/08/2013	0.679	NaN	0.357	NaN	NaN	1.205	NaN	NaN	1.647
18/10/2013	0.679	NaN	0.357	NaN	NaN	1.205	NaN	NaN	1.647
11/12/2013	0.064	0.381	0.942	0.891	1.221	1.861	2.158	2.385	2.717
08/02/2014	0.434	NaN	NaN	NaN	NaN	0.677	NaN	1.555	1.086
24/03/2014	0.019	0.148	0.166	0.178	0.361	0.378	0.676	1.381	1.682
06/06/2014	0.052	0.046	0.162	0.051	0.217	0.128	0.094	0.445	0.645
04/07/2014	0.181	0.215	0.321	0.183	0.365	0.288	0.062	0.284	0.282
05/08/2014	0.197	0.220	0.411	0.440	0.271	0.151	0.071	0.431	0.636
11/08/2014	0.459	nan	0.483	nan	nan	0.852	nan	nan	0.856
11/12/2014	0.139	nan	0.312	nan	nan	0.269	nan	nan	2.087

Anexo D

Cálculos de Correlação e Gradiente de densidade para todo o período de 2013

	D_rho/D_x - 1	D_rho/D_x - 2	D_rho/D_x - 3	D_rho/D_x - 4	D_rho/D_x - 5	D_rho/D_x - 6	D_rho/D_x - 7
Estação 1	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Estação 2	-0.1887	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Estação 3	0.5799	0.4897	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Estação 4	0.8399	0.8242	0.7653	NaN	NaN	NaN	NaN
Estação 5	0.6919	0.7613	0.7752	0.8311	NaN	NaN	NaN
Estação 6	0.6824	0.7461	0.8075	0.8051	0.7898	NaN	NaN
Estação 7	0.5107	0.7104	0.7079	0.6791	0.7049	0.7095	NaN
Estação 8	0.9039	0.9015	0.8792	0.8881	0.8812	0.8900	0.8950
Estação 9	0.9113	0.8940	0.8922	0.8933	0.9056	0.9007	0.8915
Estação 10	0.9071	0.8716	0.9026	0.8907	0.9137	0.9224	0.9246
Estação 11	0.9044	0.8982	0.8454	0.8674	0.8874	0.8909	0.8879
Estação 12	0.8397	0.8529	0.8806	0.8898	0.9124	0.9112	0.9132
Estação 13	0.8658	0.8785	0.8737	0.8661	0.8731	0.8685	0.8663
Estação 14	0.7682	0.7915	0.7835	0.7829	0.7753	0.7746	0.7746
Estação 15	0.8408	0.7987	0.7921	0.7808	0.7787	0.7757	0.7636
Estação 16	0.7235	0.7074	0.6629	0.6501	0.6426	0.6445	0.6446
Estação 17	0.9117	0.9142	0.9158	0.8977	0.8948	0.8969	0.8976
Estação 18	0.7196	0.8006	0.8078	0.8107	0.8061	0.8024	0.7988
Estação 19	0.4594	0.4358	0.4771	0.4897	0.4901	0.4809	0.4728
Estação 20	0.1894	0.1862	0.2084	0.2280	0.2599	0.2591	0.2385
Estação 21	0.4270	0.3417	0.3636	0.3552	0.3444	NaN	NaN
Estação 22	0.5784	0.5275	0.5456	0.4984	NaN	NaN	NaN
Estação 23	0.5950	0.6555	0.6298	0.6203	NaN	NaN	NaN
Estação 24	0.5599	0.6704	0.7352	NaN	NaN	NaN	NaN
Estação 25	0.9259	0.8955	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
Estação 26	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN