



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – UFC  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR – LABOMAR  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**Victor Peixoto Nunes Cordeiro**

**INFLUÊNCIA DA BARRAGEM DE PEDRA DO CAVALO SOBRE A CIRCULAÇÃO  
RESIDUAL DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

**FORTALEZA**

**2016**

VICTOR PEIXOTO NUNES CORDEIRO

INFLUÊNCIA DA BARRAGEM DE PEDRA DO CAVALO SOBRE A CIRCULAÇÃO  
RESIDUAL DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS

Monografia apresentada à coordenação do curso de graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

FORTALEZA  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Rui Simões de Menezes

---

C821i Cordeiro, Victor Peixoto Nunes.

Influência da barragem de Pedra do Cavalo sobre a circulação residual da Baía de Todos os Santos / Victor Peixoto Nunes Cordeiro – 2016.  
37 p. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso Bacharelado em Oceanografia, 2016.

Orientação: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Barragem – Salvador (BA). 2. Descarga Fluvial. 3. Modelagem numérica. I. Título.

---

CDD 627.8

**VICTOR PEIXOTO NUNES CORDEIRO**

**INFLUÊNCIA DA BARRAGEM DE PEDRA DO CAVALO SOBRE A CIRCULAÇÃO  
RESIDUAL DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia. Área de concentração: Ciências Exatas e da Terra.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Ana Paula Krenlling  
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

Dedico este humilde trabalho a todos aqueles que buscam com incansável vigor a melhora e engrandecimento coletivo em detrimento do individual.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, a quem sempre deixarei toda e qualquer conquista que vier a ter em minha vida. Aos meus irmãos porque, afinal, são meus irmãos!

Ao Professor Carlos Teixeira, pela orientação, paciência, disponibilidade e empenho em passar seu conhecimento aos alunos.

À Ingrid Sousa, por todo apoio, compreensão e carinho.

Aos grandes amigos que fiz nestes longos 7 anos, sem dúvida a maior conquista, e os vários colegas de sala pelos bons momentos.

À todos os professores do LABOMAR que se dedicam diariamente a nos ensinar.

Ao Instituto de Ciências do Mar e a UFC por me permitir fazer grandes amizades e desfrutar de inesquecíveis experiências ao longo destes gratos 7 anos de graduação.

E claro, à toda a equipe do Laboratório de Oceanografia Física, professores e alunos, por me aceitarem e tornarem os dias rotineiros de trabalho mais agradáveis.

*“Eu sou, mar, tu bem sabes, teu discípulo.  
Que nunca digas, mar, que não foste meu  
mestre.”*

Vinícius de Moraes.

## RESUMO

A Baía de Todos os Santos (BTS) está localizada ao lado da região metropolitana de Salvador-BA, sendo a segunda maior baía do Brasil. A mesma é uma baía costeira que apresenta circulação tipicamente estuarina dominada por maré e tem como principal afluente a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, barrada pela represa de Pedra do Cavalo. A barragem altera a descarga fluvial natural que chega até a BTS e que, juntamente com a maré, dominam a circulação residual. O modelo numérico *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) foi utilizado com o objetivo de determinar o impacto da barragem na circulação residual da BTS, no seu tempo de descarga total e na conexão entre os diferentes setores da baía. Para tanto, foram usados diferentes valores de vazão, pré e pós barragem. Os resultados mostraram que a variação da descarga fluvial provocada pela construção da barragem modificou consideravelmente a circulação baroclínica da BTS, diminuindo sua intensidade e conseqüentemente as trocas com a plataforma continental. A barragem diminui ainda o tempo de descarga total da BTS e a conexão entre os seus diferentes setores. Os resultados sugerem que a diminuição no tempo de descarga pode alterar negativamente a qualidade de água da BTS, haja vista a redução na sua renovação.

**Palavras-chave:** Baía de Todos os Santos. Descarga fluvial. Modelagem numérica.

## ABSTRACT

Todos Os Santos Bay (BTS) is placed beside the Salvador Metropolitan Region, on Bahia State, being the second bigger bay of the Brazil. BTS is a coast bay which get a typically estuarine circulation driven by tide and its main tributary is the Paraguaçu River, barred by Pedra do Cavalo (PDC) Dam. Dam changes the natural river discharge which arrive to BTS and, together with the tide, drive the residual circulation. The numeric model Regional Ocean Modeling System was used to determine the impact of the dam on BTS residual circulation, its total flushing time and on the connections of many different sectors of the bay. Therefore, it was used (with different) distinguished values of discharge, before and after dam implementation. The results shown the range of the river discharge, caused by the PDC, changed considerably the baroclinic circulation of Todos os Santos Bay, decreasing its intensity and consequently its trades with the continental shelf. The dam too decrease the total flushing time of the BTS and the flushing time between the inner sectors. The results suggest that the decrease on the flushing time can change negatively the water quality from the BTS due to reduction on the water renovation.

**Keywords:** Todos os Santos Bay. River discharge. Numerical model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Baía de Todos os Santos, visão geral.....	13
Figura 2 – Médias mensais descarga do Paraguaçu e outros tributários.....	14
Figura 3 – Grade numérica e batimétrica utilizada no modelo.....	16
Figura 4 – Seções verticais utilizadas na validação do modelo.....	18
Figura 5 – Descargas do rio Paraguaçu utilizadas para forçar o modelo.....	19
Figura 6 – Posição das seções e batimetria.....	20
Figura 7 – Setores da BTS e distribuição das partículas.....	21
Figura 8 – Seções de salinidade dos experimentos em janeiro e setembro.....	22
Figura 9 – Distribuição espacial da salinidade nos experimentos.....	23
Figura 10 – Seções de temperatura dos experimentos em janeiro e setembro..	24
Figura 11 – Seções de densidade dos experimentos em janeiro e setembro....	25
Figura 12 – Campo de correntes da seção 1.....	27
Figura 13 – Campo de correntes da seção 2.....	28
Figura 14 – Campo de correntes da seção 3.....	29
Figura 15 – Tempo de descarga dos três experimentos.....	31
Figura 16 – Tempo de descarga dos setores superior, médio e inferior da BTS	32
Figura 17 – Dispersão das partículas ao fim do quarto ano.....	33

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

BTS	Baía de Todos os Santos
PDC	Pedra do Cavalo
ROMS	Regional Ocean Modeling System
CFSR	The Climate Forecast System Reanalysis

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Material e Métodos.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>ROMS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2</b>	<b>Cenários .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3</b>	<b>Seções utilizadas para representar a estrutura vertical da coluna d'água.....</b>	<b>19</b>
<b>4.4</b>	<b>Partículas.....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Salinidade, temperatura e densidade.....</b>	<b>21</b>
<b>5.2</b>	<b>Circulação Residual.....</b>	<b>26</b>
<b>5.3</b>	<b>Trocas de massa e tempo de descarga.....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>34</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>

## 1 – INTRODUÇÃO

Os estuários são corpos hídricos de transição entre o continente e o oceano. Possuem características biológicas, ecológicas, geomorfológicas, hidrodinâmicas, químicas singulares que os diferenciam dos demais ambientes costeiros. A Oceanografia Física analisa os estuários segundo uma perspectiva hidrodinâmica e suas interações envolvendo trocas de massa e energia com a atmosfera, a bacia hidrográfica que o origina e o oceano adjacente (MIRANDA; KJERFVE; DE CASTRO, 2002).

Potter *et al.* (2010) expandiu a definição de estuário afim de abrigar, não só ambientes típicos de regiões temperadas, mas também ambientes estuarinos que podem apresentar condições hipersalinas e fechamento da conexão com o mar periodicamente durante períodos prolongados de estiagem, chegando a seguinte definição:

*“Estuário é um corpo costeiro parcialmente fechado e conectado ao mar permanentemente ou periodicamente que recebe um mínimo de descarga fluvial, e assim, sua salinidade é tipicamente menor que a salinidade natural do mar e varia temporalmente e ao longo de seu comprimento, mas que pode tornar-se hipersalino em regiões onde a perda de água por evaporação é elevada e a entrada de água doce e penetração da maré são desprezíveis”.*

Apesar das inúmeras definições, todas são aplicadas a ecossistemas com reduzida escala espacial. Baías não se enquadram precisamente bem em nenhuma delas devido à complexidade destes ambientes, entretanto podem apresentar circulação e processos de mistura típicos de ambientes estuarinos (KJERFVE, 1997), o que nos permite em muitos casos realizarmos análises análogas para ambos.

Ao longo do século XX e início do século XXI, boa parte das bacias de drenagem do Brasil sofreram alterações devido a construção de barragens com o intuito de controlar a descarga hidrológica para os mais variados fins, hidrelétricas, suprimento de água doce para zonas urbanas e atividades aquícolas durante os períodos de seca, promover proteção contra inundações de áreas urbanas, etc. Houve uma concentração significativa dos empreendimentos na região NE, que mais

sofre com problemas de escassez de água. Sabemos que em geral as barragens limitam o aporte de água doce e sedimentos que chega até zonas estuarinas e baías, alterando os processos erosivos e de sedimentação nesses ambientes, bem como a quantidade e composição dos materiais carregados que chegam aos ambientes estuarinos (MITCHELL *et al.*, 2015).

Dentro deste contexto encontra-se a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, principal afluente da Baía de Todos os Santos (BTS), que drena uma área de 56.300 km<sup>2</sup> (cerca de 92% da área de drenagem que chega a BTS) (HATJE *et al.*, 2009) e foi represada nas proximidades do município de São Félix dando origem ao reservatório de Pedra do Cavalo (PDC) inaugurado em 1985.

Genz e Lessa (2015), por meio da aplicação do método Indicador de Alterações Hidrológica (IHA) que elimina a influência de mudanças no padrão climático da região, caracterizaram o impacto da barragem como severo considerando todas as políticas de descarga adotadas após a construção da barragem. Genz (2006) indica que o impacto sobre a circulação depende da tática operacional adotada e a presença ou ausência de um dispositivo de liberação de fundo na barragem. Neste mesmo trabalho o autor utilizou um modelo tridimensional (*Princeton Ocean Model*) para determinar a influência da barragem de PDC sobre o estuário do Paraguaçu e Baía do Iguape (localizados dentro da BTS) e notou que a salinidade nestes ambientes eram profundamente alteradas entre cenários forçados com médias de descargas naturais do período úmido e as demais formas de operação empregados na barragem. O trabalho dos autores não analisou a influência da PDC sobre a circulação da BTS como um todo.

A BTS está situada nas adjacências de Salvador, terceira maior zona metropolitana do país, e desempenha inegável papel socioeconômico abrigando oito dos dez terminais portuários do estado. É a segunda maior baía do Brasil, perdendo apenas para a Baía de São Marcos - MA, e abriga uma gama de atividades econômicas como turismo, pesca, transporte dentre outras, sendo portanto um ambiente amplamente exposto a impactos antrópicos (HATJE *et al.*, 2009).

Com relação à Oceanografia Física até o final do século XX apenas um trabalho havia sido publicado (WOLGEMUTHEL *et al.*, 1981). Mais recentemente, outros trabalhos foram publicados voltados a descrever a hidrodinâmica local através de dados *in situ* e modelagem numérica. Neto (1998) e Xavier (2002) buscaram descrever a influência do vento e marés, através de simulações 2D com o

modelo *Princeton Ocean Model*, e simulações 3D com aplicação do modelo sisBAHIA, respectivamente. Até recentemente pouco se sabia sobre a influência de variações no campo de densidade sobre a dinâmica da BTS. Cirano e Lessa (2007) foram os primeiros a indicar a importância de forçantes baroclínicas na circulação residual da BTS. Os autores apontaram a existência de inversões entre correntes de superfície e de fundo em certas regiões da BTS devido a gradientes horizontais de densidade.

O presente trabalho analisa a influência da barragem de Pedra do Cavalo sobre a hidrodinâmica da BTS via modelagem numérica a partir do *Regional Ocean Modeling System* (ROMS).

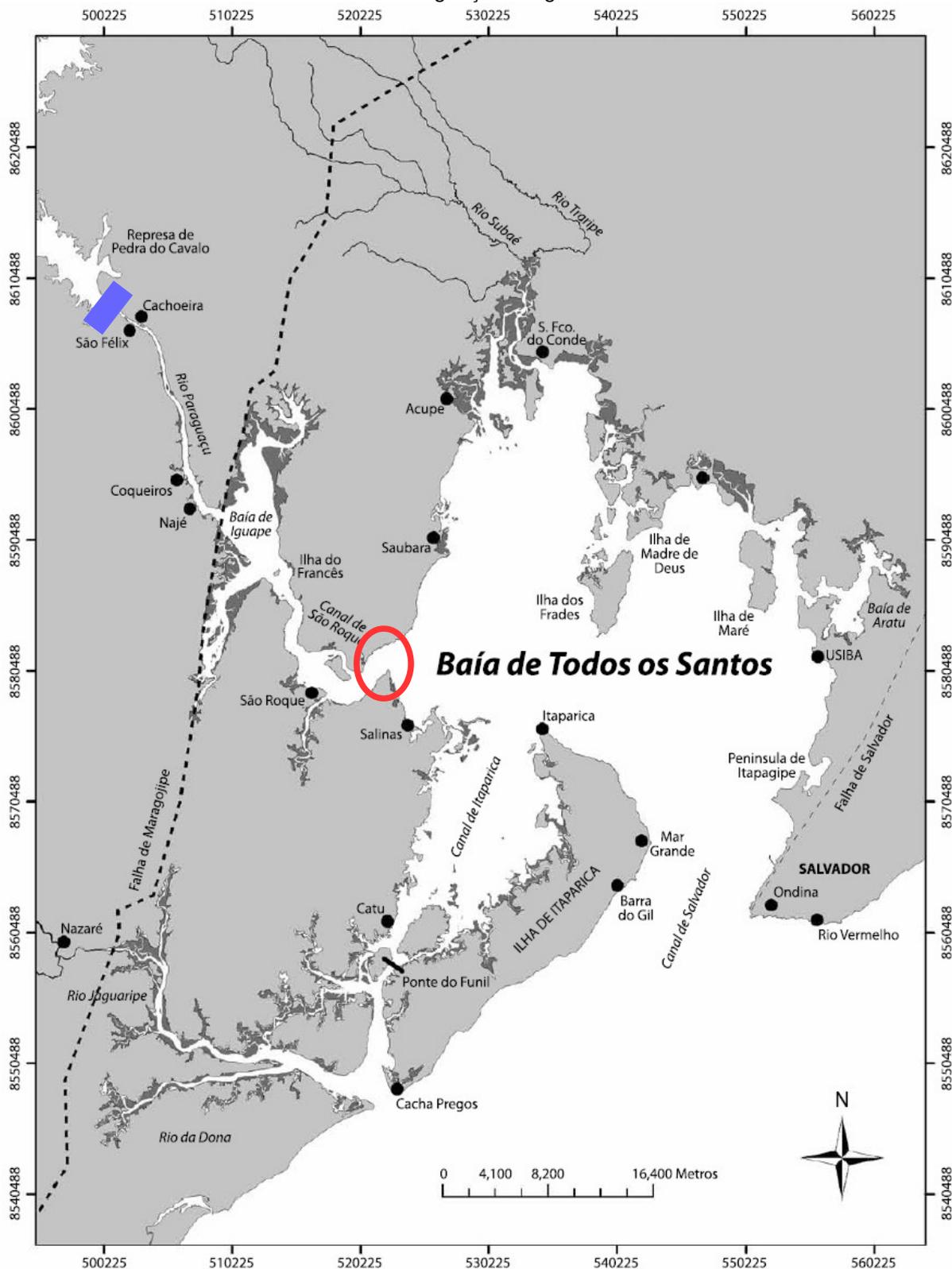
## 2 – ÁREA DE ESTUDO

Cirano e Lessa (2007), a partir de um amplo banco de dados coletados *in situ*, a maior parte deles obtidos através do programa Bahia Azul, fizeram a descrição das características oceanográficas da BTS.

A BTS (**Figura 1**) apresenta uma circulação tipicamente estuarina dominada pela maré com clima tropical úmido. Apesar da BTS ser considerada um ambiente estuarino do tipo bem misturado, usando a classificação de Hansen e Rattray (1966), Genz (2006) indica que dentro do canal do Paraguaçu, em maré de quadratura, há o comportamento de um estuário parcialmente misturado. O regime de maré na plataforma adjacente é semidiurno e apresenta número de forma inferior a 0,11, porém a onda é gradualmente distorcida conforme penetra no interior da BTS, sofrendo amplificação de forma distinta entre os diferentes setores da baía, devido a variação batimétrica, e tornando-se assimétrica, com amplitudes de até 1,87m na maré de sizígia (HATJE *et al.*, 2009).

O regime de ventos apresenta um padrão sazonal bem definido. Na plataforma continental adjacente a direção predominante dos ventos é ENE no verão e SE no inverno (SERVAIN *et al.*, 1996) e dentro da BTS, na Ilha dos Frades, próximo ao centro da baía, o padrão de ventos sofre um certo desvio no sentido horário, virando para ESE e SSW, durante o verão e inverno, respectivamente (CIRANO; LESSA, 2007).

Figura 1: Representação geral da Baía de Todos os Santos e suas principais localidades (pontos pretos). A localização da barragem de PDC está indicada em azul, no canto superior esquerdo. O círculo vermelho marca o local onde o rio Paraguaçu deságuas na BTS.

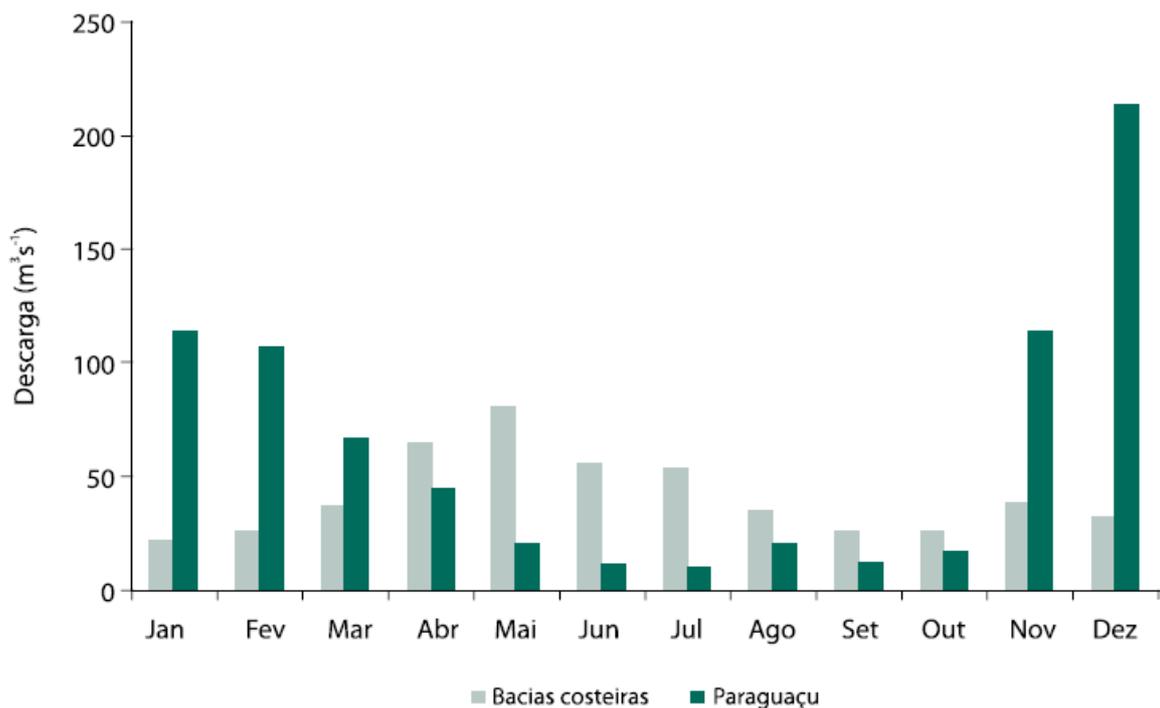


Adaptado de Lessa et al. (2009).

Segundo Cirano e Lessa (2007) a média de salinidade da baía é sempre próxima de 37, com pequenos gradientes verticais, porém no inverno estes são mais pronunciados, chegando a diferenças maiores do que 1 no Canal de Salvador. O gradiente de salinidade apresenta sentido predominantemente do interior para a desembocadura da BTS enquanto que o de temperatura tem sentido inverso, tanto no período seco quanto no chuvoso. Ao contrário da salinidade os gradientes verticais de temperatura são intensificados no verão (CIRANO e LESSA, 2007), sendo que os menores valores atingem por volta de 21 e 22 °C, associadas a frentes frias durante o inverno, e os maiores por volta de 30 °C no verão (HATJE et al., 2009).

O período úmido da BTS, com precipitações superiores a 300 mm, ocorre entre maio e junho e o período mais seco ocorre em janeiro e setembro, com precipitações inferiores a 150 mm. Além da fonte atmosférica, a quantidade de água doce que chega a BTS depende de fontes difusas e fontes pontuais que vão de pequenos a grandes rios tributários. Nestes os rios Subaé, Jaguaripe e Paraguaçu são os maiores, este último sendo a principal fonte de água doce da baía (91% da área de drenagem) como podemos ver na Figura 2.

FIGURA 2: Hidrograma com as médias mensais de descarga afluyente a BTS do rio Paraguaçu e demais tributários.



Fonte: Lessa et al. (2009).

### 3 – OBJETIVOS

#### 3.1 – Objetivo Geral:

O objetivo geral deste trabalho é determinar a influência da barragem de PDC sobre a circulação residual da BTS via modelagem numérica.

#### 3.2 – Objetivos Específicos:

- Avaliar a influência da variação da descarga fluvial do rio Paraguaçu sobre o tempo de descarga na BTS;
- Determinar influência da variação da descarga fluvial, provocada pela implementação da barragem de PDC, sobre as trocas de massa entre a BTS e a plataforma adjacente e entre os diferentes ambientes internos da BTS (estuário superior, médio e inferior);
- Determinar a influência da PDC sobre a dispersão de materiais.

### 4 – MATERIAL E MÉTODOS

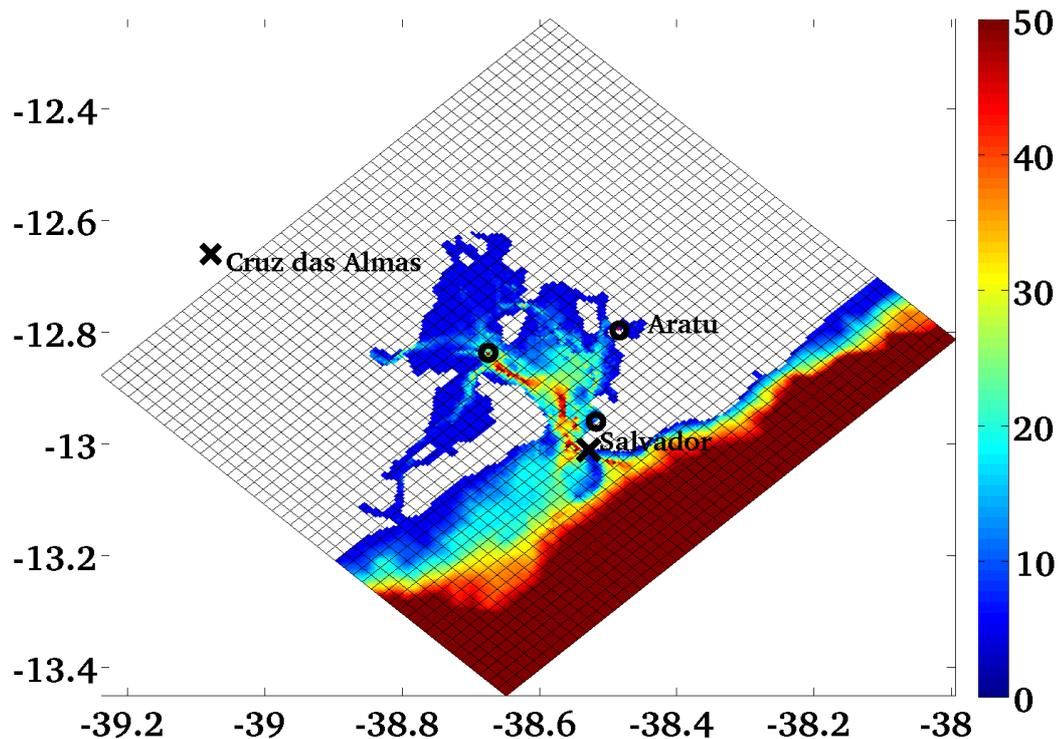
A metodologia consistiu na análise dos dados de saída oriundos de modelagem numérica utilizando o modelo hidrodinâmico *Regional Ocean Modeling System* (ROMS). A execução, calibração e validação do modelo não fazem parte do escopo deste trabalho, porém, devido à sua relevância para a obtenção dos dados, a seguir serão apresentadas as configurações básicas utilizados no modelo, uma vez que estas interferem diretamente nos resultados.

#### 4.1 – ROMS

A obtenção dos dados foi mediante aplicação de modelagem numérica buscando simular a circulação da BTS. O modelo escolhido para representar o ambiente em estudo foi *Regional Ocean Modeling System* (ROMS). O ROMS é um modelo hidrodinâmico não linear baseado em um conjunto de equações primitivas e amplamente utilizado na comunidade científica.

A modelagem hidrodinâmica foi feita com o modelo ROMS em sua versão baroclínica, com uma grade de alta resolução (500m) e 20 níveis verticais. A grade cobriu toda a área da BTS, os canais de descarga de seus tributários e parte da plataforma adjacente (Figura 3). A batimetria utilizada é proveniente de banco de dados do grupo GOAL da UFBA e da digitalização de cartas náuticas. O modelo foi iniciado em estado de repouso com campos de elevação e velocidade nulos e campos de temperatura e salinidade homogêneos e iguais a 28 °C e 36.75, respectivamente.

Figura 3: Grade numérica e batimétrica utilizada no modelo. Para fim de visualização a grade foi plotada a cada quatro elementos. Os círculos demarcam as estações de maré utilizadas para validação do modelo de maré (Salvador, Aratu e Centro da BTS). As cruzes demarcam as estações meteorológicas (Salvador e Cruz das Almas) utilizadas para determinação do melhor forçante do modelo.



Fonte: Autor.

O modelo foi forçado com os dados de marés astronômicas usando as oito principais componentes harmônicas de maré (M2, S2, O1, K1, N2, K2, P1, M4) da solução local do modelo global de maré TPXO 7.2 (EGBERT *et al.*, 1994). Esta solução local possui uma maior resolução espacial (1/12 graus) resultando num produto de melhor qualidade.

A forçante do vento foi incluída nas simulações utilizando os dados mensais

climatológicos de vento provenientes do CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*). Os forçantes de fluxo de água e calor em superfície utilizados nas simulações foram construídos com base em médias mensais climatológicas dos dados de precipitação, evaporação, temperatura do ar, umidade do ar, calor latente, calor sensível, ondas curtas, ondas longas, do NCEP/DOE AMIP-II *Reanalysis-2*. Os dados de precipitação e evaporação foram corrigidos com a utilização dos dados das estações meteorológicas de Salvador e Cruz das Almas. O fluxo de calor foi corrigido com os dados climatológicos mensais de temperatura da superfície do mar do satélite *MODIS/Aqua*.

Nas simulações foram utilizadas como condições de contorno as climatologias médias mensais construídas a partir de dados do *Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) / Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA)*.

Os experimentos foram rodados por um período de quatro anos e apenas os resultados do quarto ano foram utilizados nas análises. O modelo se mostrou estável após um período de três anos de simulação.

## 4.2 – Cenários

Foram utilizados três cenários distintos para determinar a influência da descarga do rio Paraguaçu a jusante da barragem de Pedra do Cavalo sobre a circulação da BTS.

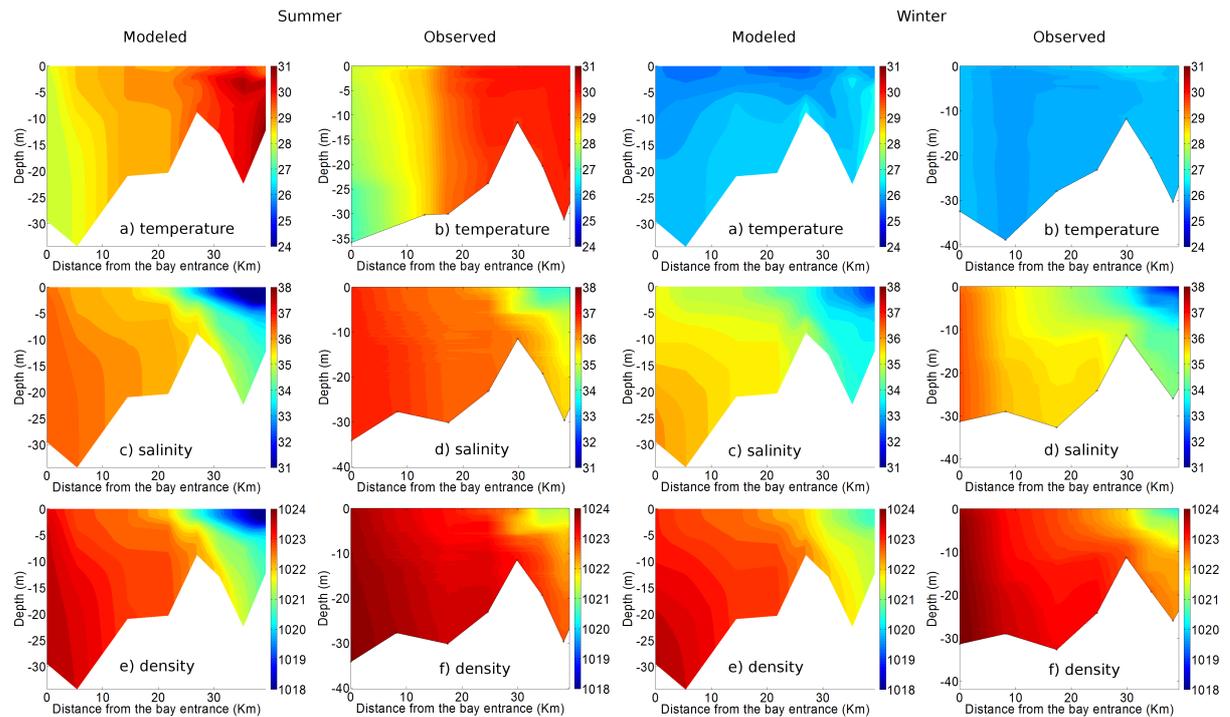
O primeiro cenário utilizou as médias climatológicas de vazão do Rio Paraguaçu entre 1947 e 1985 anteriores a implementação da barragem de Pedra do Cavalo (1986).

O segundo cenário foi forçado com as médias climatológicas mensais de descarga entre 1986 e 2014 que chegam até a barragem, mas devido a influência desta não atingem em sua totalidade a BTS. Este segundo cenário foi proposto pois Gens e Lessa (2015) observaram que a quantidade de água que chega até a barragem após a sua construção é menor do que a quantidade de água anterior a construção. O objetivo deste experimento é estudar como estaria a circulação da BTS sem a influência da PDC nos dias atuais.

O terceiro cenário foi produzido com as médias mensais de vazão entre 1986 e 2014 que de fato deságuam na BTS oriundas do rio Paraguaçu. Este é o experimento base e foi implementado por Santana (2015). Os resultados desta

simulação foram validados por Santana (2015) que mostrou a boa correlação entre os dados modelados e observados (Figura 4) para ambos os períodos, seco e chuvoso.

Figura 4: Seções verticais de temperatura, salinidade e densidade para verão (esquerda) e inverno (direita) comparando dados observados com modelados.

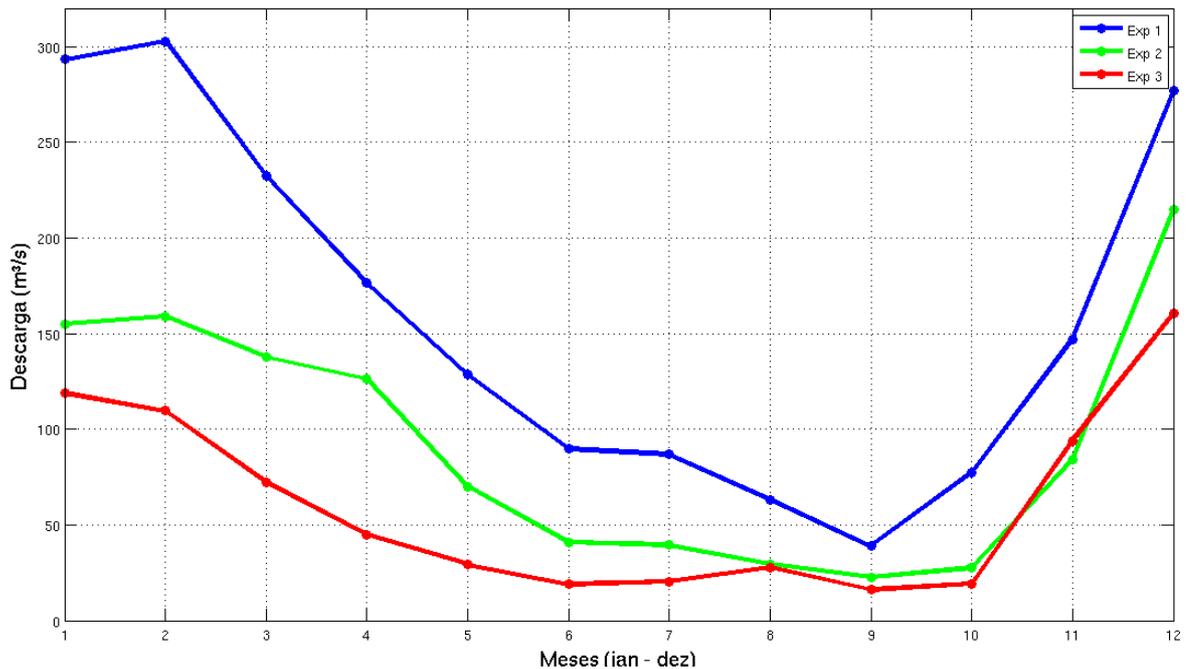


Fonte: Santana (2015).

Os cenários acima descritos, primeiro, segundo e terceiro, serão referidos como Experimento 1, Experimento 2 e Experimento 3, respectivamente e as médias mensais dos valores utilizados em cada um deles são apresentados na Figura 5. A influência do barramento sobre a descarga que chega à BTS fica clara entre os experimentos 2 e 3, que estão submetidos ao mesmo regime climático, resultando na descarga à jusante da represa 33 % menor que aquela à montante. Os períodos de máxima e mínima vazão fluvial se mantiveram relativamente inalterados entre os experimentos, porém, as médias mensais de descarga do rio Paraguaçu aplicadas no modelo variaram significativamente. As descargas mínimas se concentraram em setembro e os períodos com descarga mais elevada ocorreram no verão, concentrando-se em dezembro nos experimentos 2 e 3 e em fevereiro no experimento 1. Muito embora as maiores diferenças na vazão apareçam entre os experimentos 1 e 3 esta decorre da PDC e da variabilidade climática natural que

reduziu em cerca de 20% a vazão fluvial afluyente à represa no período após sua construção em relação à média histórica (HATJE et al., 2009). Foram selecionados os meses de janeiro e setembro afim proporcionar comparações dos períodos de verão e inverno entre os experimentos, respectivamente.

Figura 5: Médias mensais de descarga do rio Paraguaçu utilizadas para forçar o modelo no experimentos 1 (linha azul), 2 (linha verde) e 3 (linha vermelha).



Fonte: Autor.

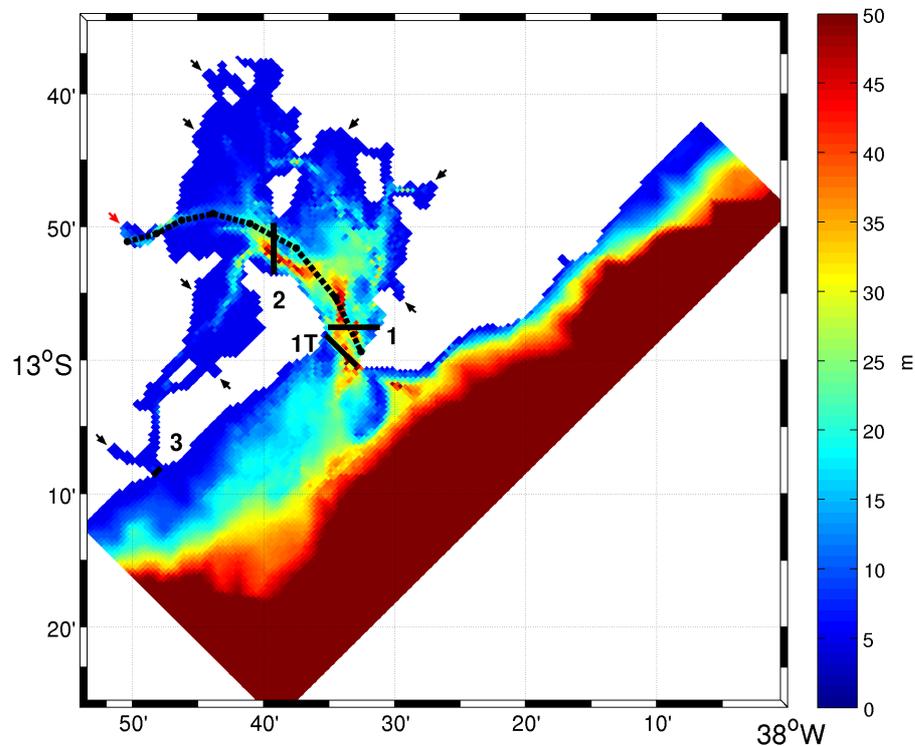
É importante salientar que não faz parte do escopo deste trabalho avaliar a influência da variação interanual de precipitação e de descarga de outros afluentes que deságuam na BTS, pois estes, assim como o vento e fluxo de calor e água (precipitação menos evaporação) por superfície são os mesmos em todas as simulações.

#### 4.3 – Seções utilizadas para representação da estrutura vertical da coluna d'água

Para investigar o impacto dos diferentes regimes de descarga fluvial do rio Paraguaçu nos experimentos descritos acima foram feitas seções verticais de temperatura, salinidade, densidade e correntes. As seções transversais 1, 2 e 3 extraídas para análise do campo de correntes são indicadas na Figura 6. A seção 1

e 2 localizam-se no canal de Salvador, sendo a primeira na entrada da baía e a segunda entre as ilhas de Itaparica e dos Frades. A seção 3 conecta o canal de Itaparica com a plataforma. As seções central de temperatura, salinidade e densidade corresponde ao canal principal da BTS que liga a desembocadura da baía à foz do Paraguaçu, indicada pela linha pontilhada na figura 6. A localização das seções utilizadas são as mesmas usadas no trabalho de Santana (2015).

Figura 6: Batimetria e posição das seções utilizadas para análise dos campos de corrente, temperatura, salinidade e densidade. As seções 1, 2 e 3 foram utilizadas para análise do campo de correntes. A linha pontilhada representa a uma seção vertical que liga o canal de Salvador ao canal do Paraguaçu e esta foi utilizada para analisar o campo de salinidade, temperatura e densidade.



Fonte: Santana (2015).

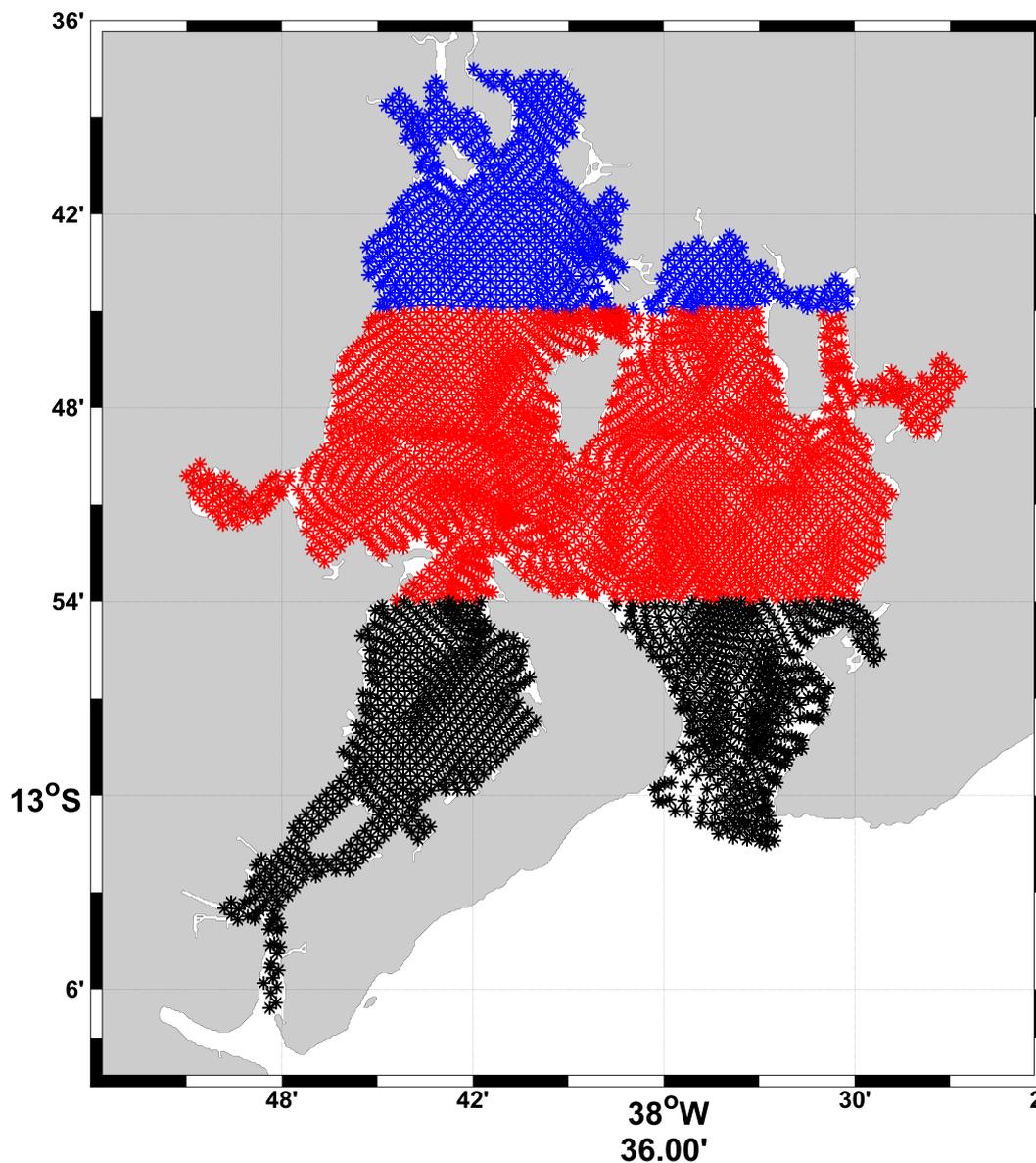
### 4.3 – Partículas

Para o acompanhamento do transporte de materiais e substâncias advectados entre os diferentes setores da baía, entre a BTS e a plataforma e cálculo dos tempos de descarga foram utilizadas partículas distribuídas homoganeamente por toda a BTS. Estas partículas foram lançadas no primeiro dia do quarto ano de simulação no meio da coluna d' água.

Para o monitoramento das trocas de massa entre os diferentes setores da

BTS dividiu-se a baía em 3 áreas: estuário superior, médio e baixo (Figura 7).

Figura 7: Distribuição das partículas passivas no primeiro dia do quarto ano e divisão da BTS em estuário superior (azul), médio (vermelho) e inferior (preto).



Fonte: Autor.

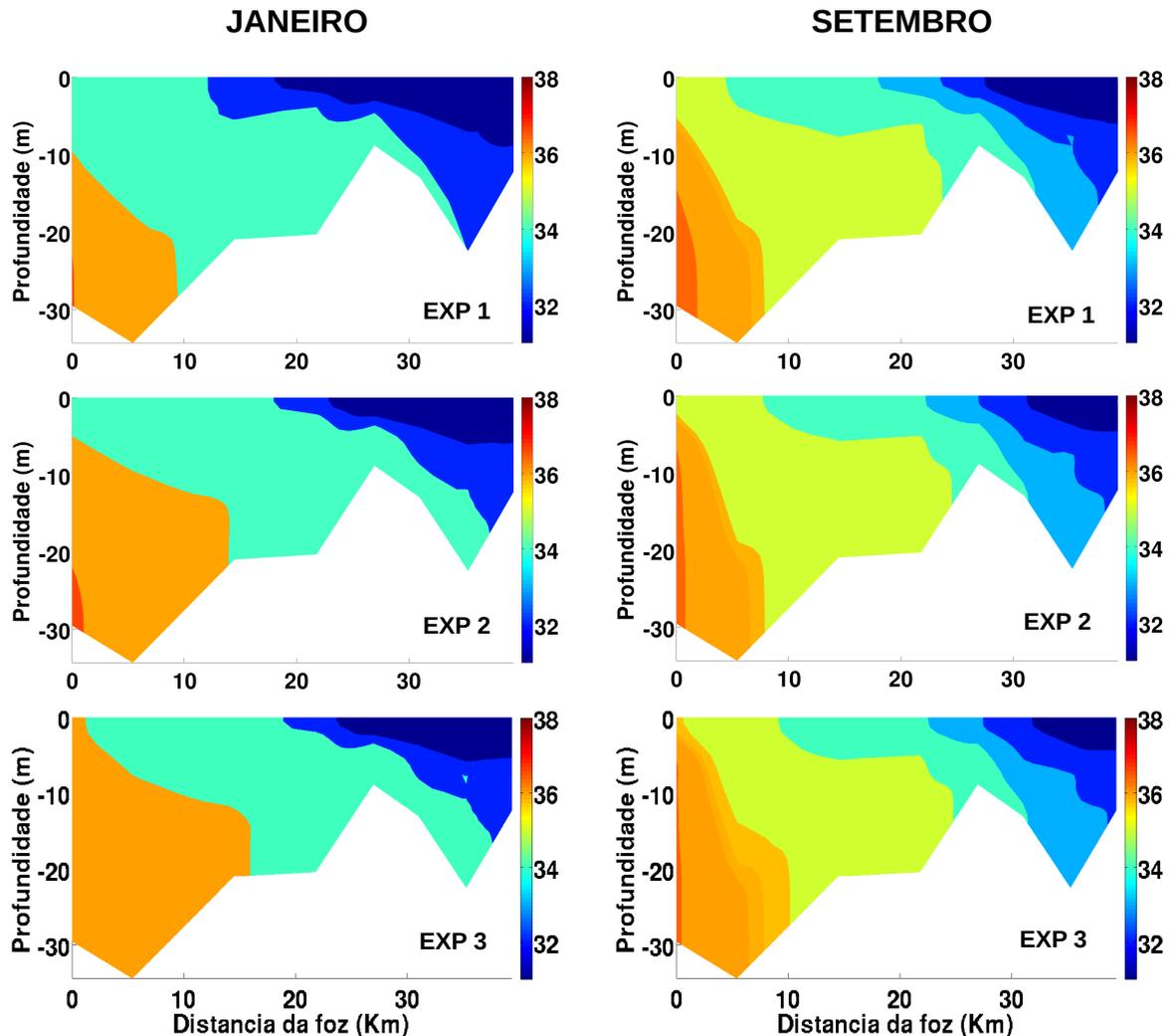
## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.2 – Salinidade, temperatura e densidade

Durante o mês de janeiro, quando a vazão do Rio Paraguaçu costuma atingir valores máximos, a maior estratificação halina ocorreu nos experimentos de menor descarga, com o experimento 3 apresentando o maior gradiente vertical seguido dos

experimentos 2 e 1, sucessivamente (Figura 8). Porém a salinidade média na BTS como um todo é menor nos experimentos com maior vazão, aumentando o gradiente entre a BTS e a plataforma. A salinidade média da BTS foi menor no verão (1º trimestre) e maior no inverno (3º trimestre), em todos os experimentos (Figura 9).

Figura 8: Seção vertical de salinidade da BTS correspondente aos experimentos 1, 2 e 3 nos meses de janeiro (à esquerda) e setembro (à direita). O eixo das abscissas representa o largura em km da seção.

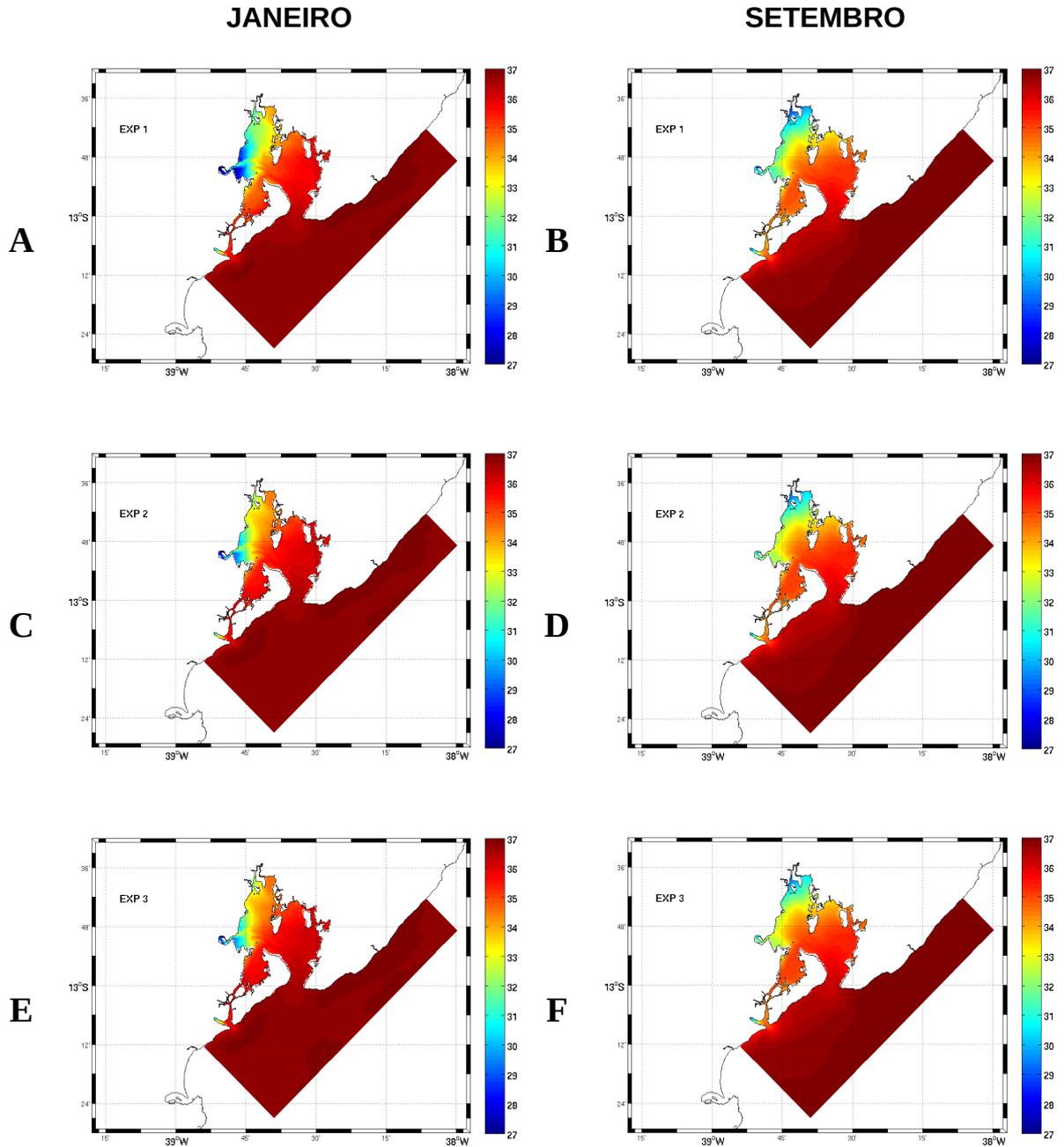


Fonte: Autor.

Durante o mês de setembro, que apresenta médias mínimas de vazão do Rio Paraguaçu, houve uma inversão no padrão e os gradientes verticais foram intensificados no experimento 1, ou seja, quando submetidos a maiores descargas, em relação aos demais. As diferenças entre os experimentos 2 e 3 são pequenas pois quase não existe diferença na vazão para o mês de setembro nestes experimentos. O maior grau de variação vertical da salinidade foi próximo a

desembocadura do Rio Paraguaçu semelhante ao observado por Barreto (2015).

Figura 9: Distribuição espacial da salinidade na BTS relativa aos meses de janeiro (à esquerda) e setembro (à direita). A) e B) referem-se ao experimento 1, C) e D) ao experimento 2 e E) e F) ao experimento 3.

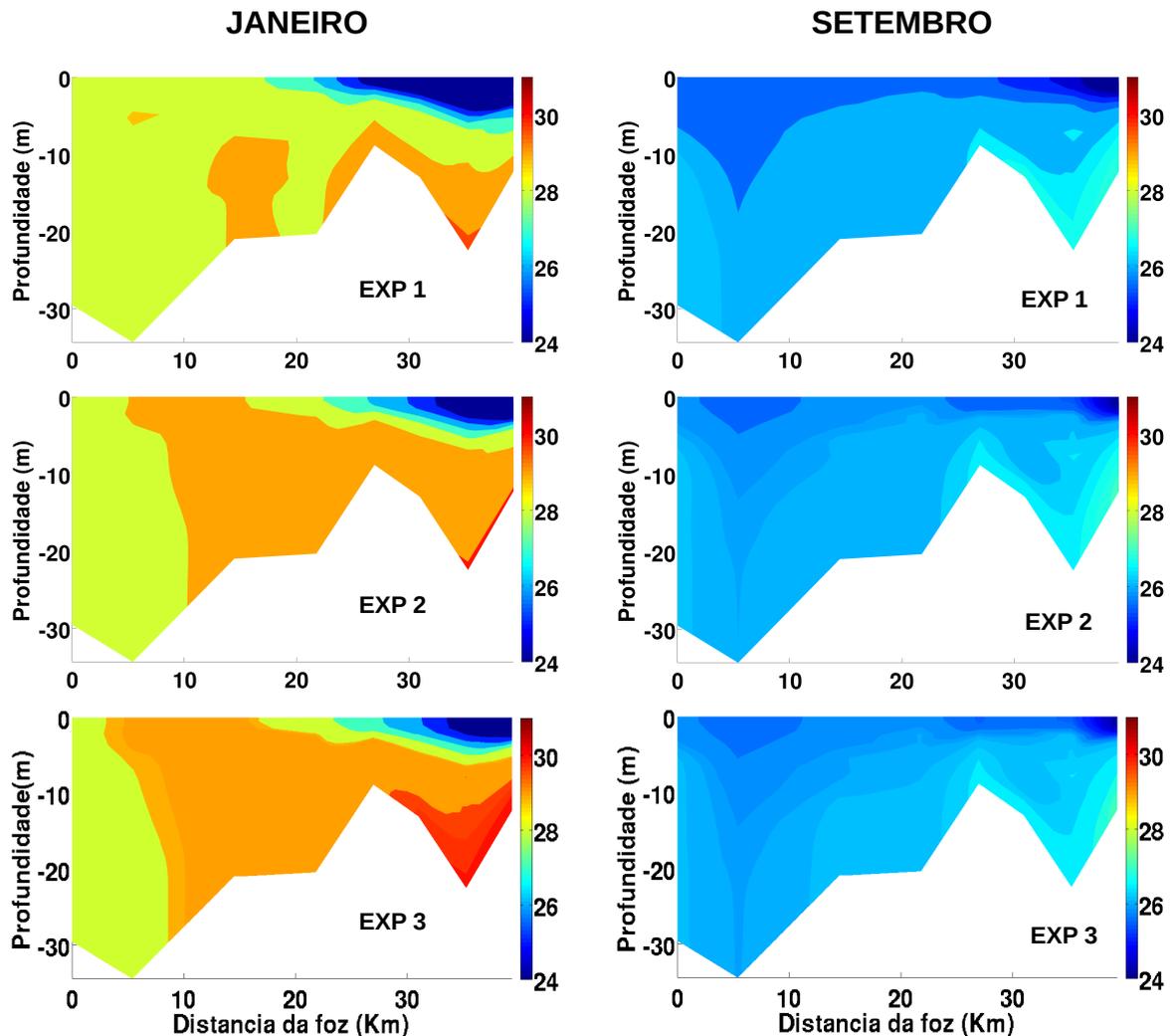


Fonte: Autor.

Os gradientes, horizontais e verticais de temperatura apresentados na Figura 10 são maiores durante o verão e menores no inverno para todos os cenários. Cirano e Lessa (2007) reportam que no inverno a BTS apresenta características

mais homogêneas horizontal e verticalmente em relação à temperatura, já no verão, diferenças de até 3 °C são encontradas entre áreas mais internas e rasas e a entrada da BTS.

Figura 10: Seção vertical de temperatura na BTS correspondente aos experimentos 1, 2 e 3 nos meses de janeiro (à esquerda) e setembro (à direita). O eixo das abscissas representa o largura da seção, em km.



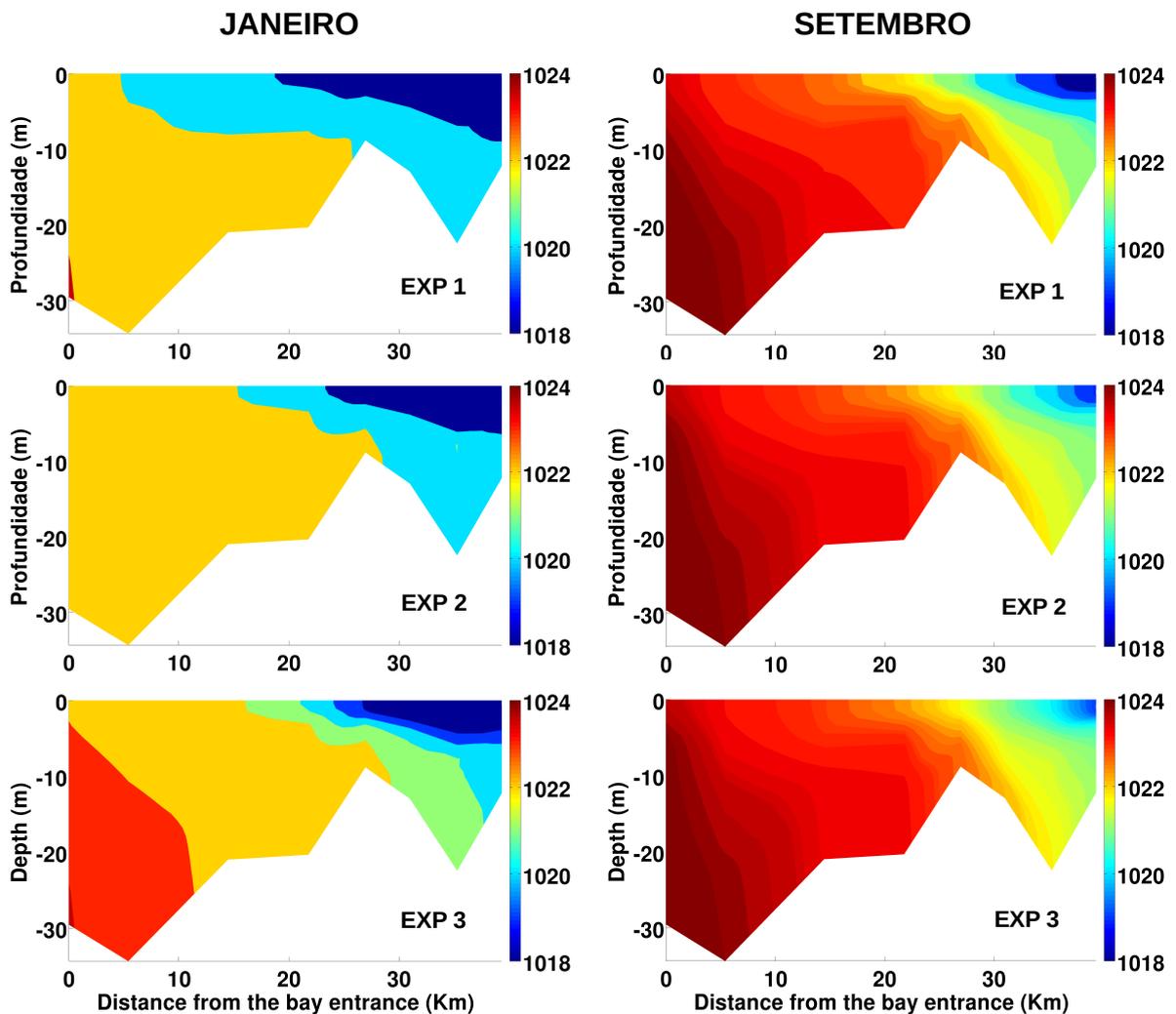
Fonte: Autor.

Comparando os experimentos, no verão a estratificação de temperatura é intensificada próximo a foz do rio Paraguaçu, no experimento 3, assim como ocorre no campo de salinidade. No inverno a estratificação também intensifica-se próximo à foz, porém o gradiente passa a ser maior sob a maior descarga do experimento 1. Haja vistas as descargas nos experimentos possuírem a mesma temperatura, estas diferenças na estratificação térmica provavelmente seguem a estratificação de

densidade que dificultam a mistura vertical.

O sentido do gradiente horizontal de densidade foi da foz do rio Paraguaçu em direção à boca da BTS seguindo o padrão típico de um sistema estuarino. O gradiente vertical de densidade respondeu de forma diferente ao aumento ou decréscimo da descarga fluvial em relação ao verão (janeiro) e inverno (setembro), tendo sido dominado pela salinidade. Como podemos notar na Figura 11, no verão, período de vazão elevada, os gradientes verticais foram menores (maiores) no cenário com as maiores (menores) médias mensais de vazão, respectivamente experimento 1, 2 e 3. Já no mês de setembro, onde a vazão do Paraguaçu atinge valores mínimos, os gradientes verticais aumentaram juntamente com o aumento da descarga.

Figura 11: Seção vertical de densidade da BTS correspondente aos experimentos 1, 2 e 3 nos meses de janeiro (à direita) e setembro (à esquerda). O eixo das abscissas representa a largura da seção, em km.



Fonte: Autor.

Nota-se que as diferenças no campo de densidade entre os experimentos é uma resposta aos gradientes horizontais e verticais da salinidade, que por sua vez responde fortemente à entrada de água doce no ambiente. Como esperado, o gradiente de densidade entre a BTS e plataforma é maior quanto maior a vazão.

O comportamento da estratificação notado no verão para os parâmetros de salinidade e densidade, levando os cenários de menor descarga (experimento 3) a apresentarem maior gradiente vertical, são provavelmente explicadas pela redução da salinidade média de toda a BTS quando a quantidade de água doce torna-se muito elevada, como ocorre no experimento 1. Podemos ver na Figura 9 que a área cuja salinidade sofre maiores variações devido à penetração da descarga fluvial do Paraguaçu dentro da BTS encontra-se bastante expandida no verão no experimento 1 em relação aos outros experimentos. A forte redução da salinidade nos setores médio e superior provocada pela intensa entrada de água doce a partir do rio Paraguaçu no verão leva a uma maior homogeneidade da coluna de água.

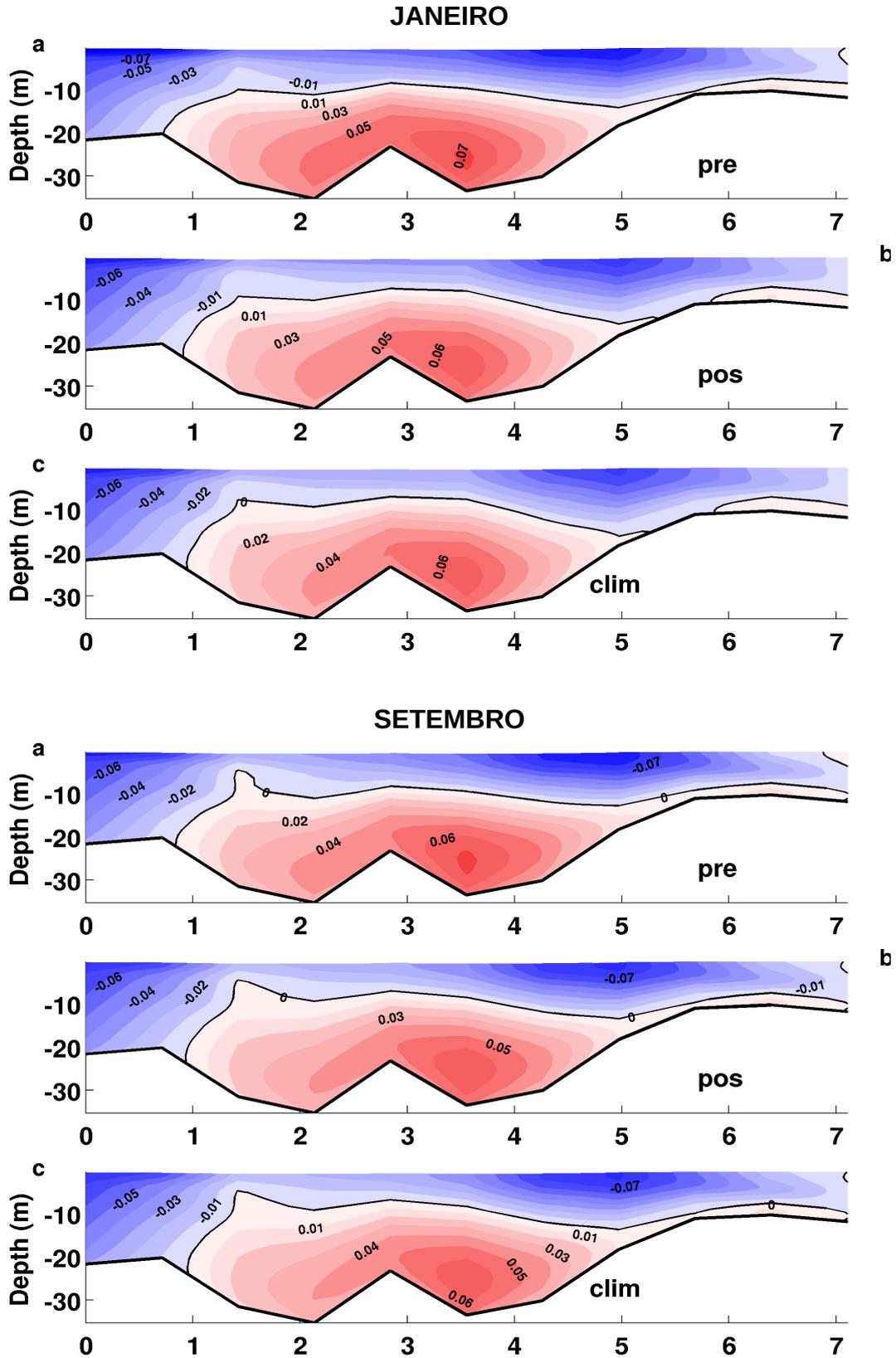
### **5.3 – Circulação residual**

A variação das descargas entre os experimentos gerou diferentes respostas na circulação residual das 3 seções apresentadas.

Na seção 1 podemos notar uma intensificação das correntes com o aumento da descarga fluvial, durante todo o período de análise. As velocidades absolutas foram maiores durante o verão onde ocorrem as maiores vazões (Figura 12). Nesta seção o experimento 1 apresentou as maiores velocidades absolutas e o experimento 3 as menores, e as diferenças entre estas foram da ordem de 0,01 m/s. Estas diferenças decorrem da resposta da circulação da BTS aos gradientes horizontais de densidade entre a BTS e a plataforma.

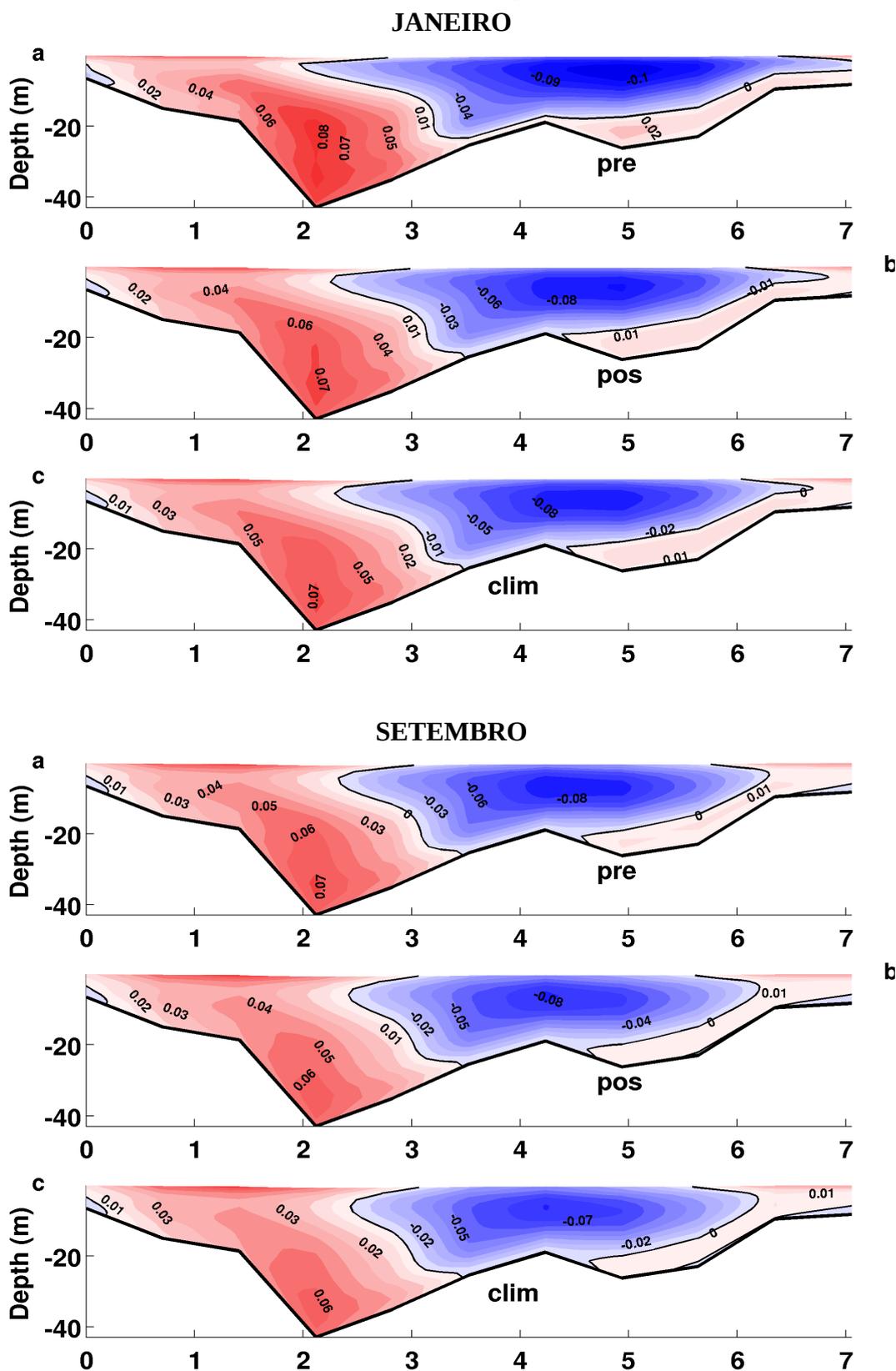
Na seção 2 (Figura 13) também houve diferença entre os experimentos e uma resposta semelhante à obtida na seção anterior. Da mesma forma, as maiores velocidades residuais ocorreram nos experimentos 3, 2 e 1, respectivamente. As diferenças das velocidades máximas e mínimas entre os experimentos 1 e 3 chegou a ser da ordem de 0,02 m/s.

Figura 12: Seção 1 do campo de correntes, localizada na entrada da BTS, sobre o canal de Salvador, relativo aos meses de janeiro e setembro. As letras a, b e c indicam os experimentos 1, 2 e 3, respectivamente. As cores azul indicam fluxo para fora da BTS e vermelho em direção ao interior da baía. O eixo das abscissas representa a largura da seção em km.



Fonte: Autor.

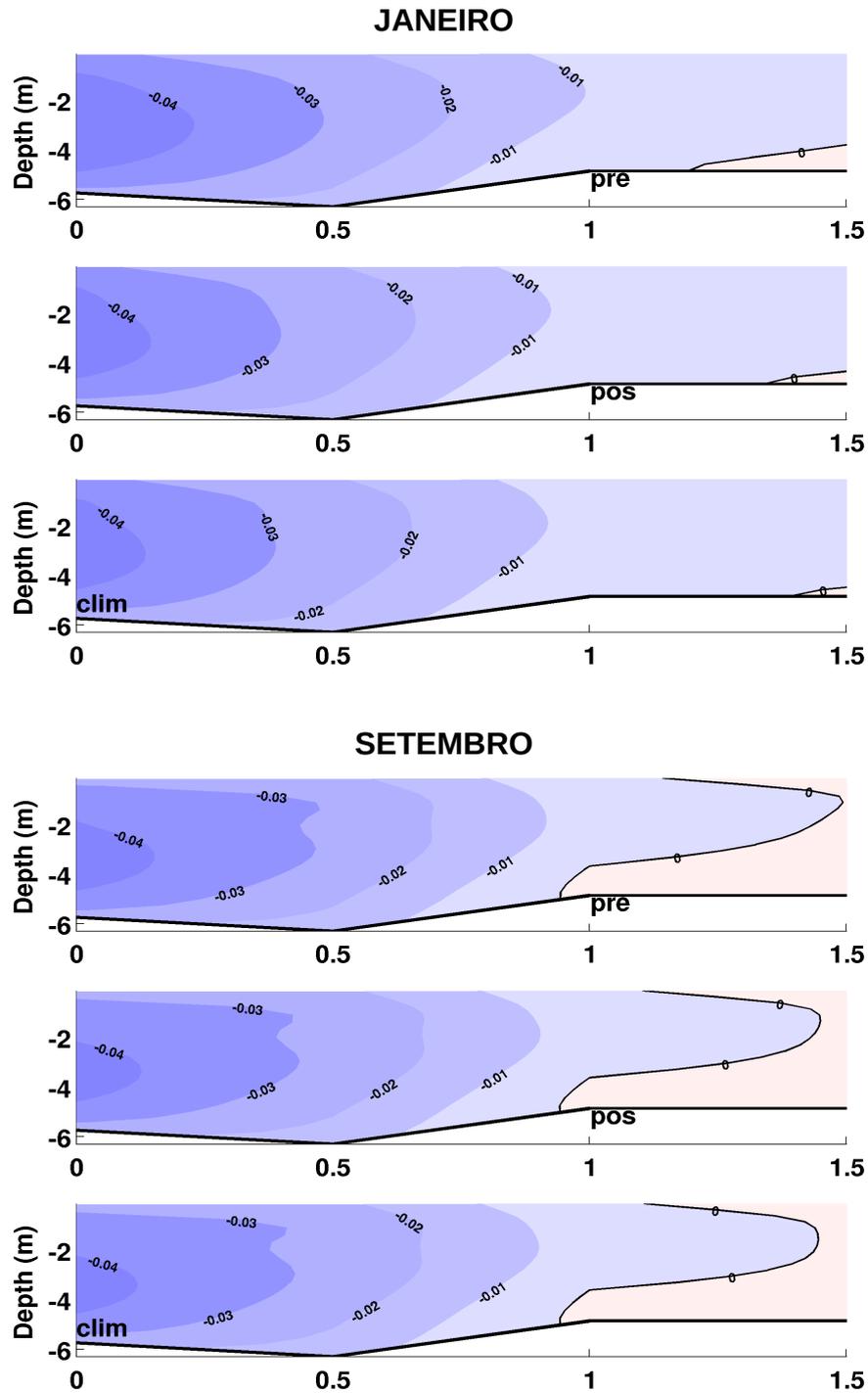
Figura 13: Seção 2 do campo de correntes, localizada no canal principal da BTS, entre a Ilha de Itaparica, relativo aos meses de janeiro e setembro. As letras a, b e c indicam os experimentos 1, 2 e 3, respectivamente. As cores azul indicam fluxo para fora da BTS e vermelho em direção ao interior da baía. O eixo das abscissas representa a largura da seção, em km.



Fonte: Autor.

A seção 3 (Figura 14) apresentou pequena diferença entre os experimentos, novamente com uma intensificação do campo de correntes sob maior descarga (experimento 1) porém com diferenças inferiores a 0,01 m/s entre os experimentos.

Figura 14: Seção 3 do campo de correntes, localizada dentro do canal de Itaparica, relativo aos meses de janeiro e setembro. As letras a, b e c indicam os experimentos 1, 2 e 3, respectivamente. As cores azul indicam fluxo para fora da BTS e vermelho em direção ao interior da baía. O eixo das abscissas representa a largura da seção, em km.



Fonte: Autor.

Todas as seções em todas as simulações, apresentam uma circulação residual típica de estuários, ou seja, água de origem continental menos densa saindo em superfície e água mais densa de origem marinha entrando pelo fundo.

Xavier (2002) ao rodar um modelo hidrodinâmico 3D sem considerar forçantes baroclínicas não obteve êxito em representar as magnitudes do campo de correntes da BTS, o que assim como os resultados acima e de Santana (2015) demonstram que a circulação baroclínica tem papel relevante na circulação residual da BTS.

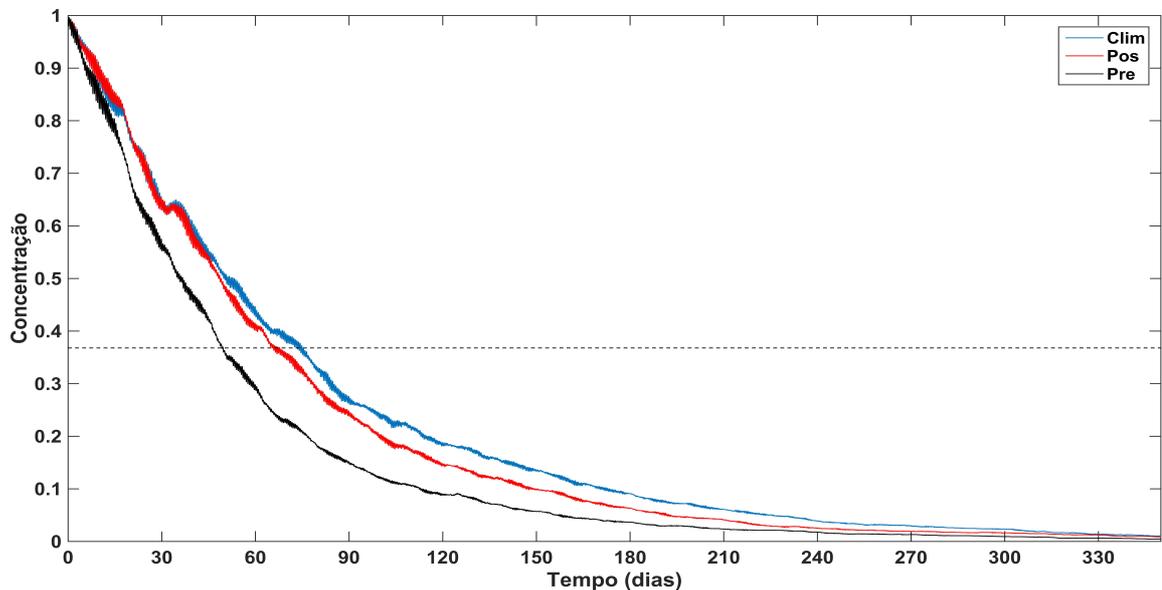
Através dos resultados conclui-se que o incremento do aporte fluvial (Experimento 1) é responsável pela intensificação desta circulação residual uma vez que ele provoca aumento nos gradientes longitudinais de densidade entre a BTS e a plataforma adjacente. Santana (2015) encontrou menores velocidades residuais e menor estratificação em um modelo forçado sem descarga fluvial comparado com o modelo forçado com inclusão de descarga fluvial para as mesmas seções 1 e 2. Este resultado, alinhado aos resultados encontrados neste trabalho, indicam que a descarga fluvial tem um papel importante na circulação residual baroclínica da BTS.

As menores diferenças no campo de correntes residual na seção 3 entre os experimentos deve-se provavelmente a sua localização, dentro do canal de Itaparica, o que a deixa mais abrigada da influência do descarga do rio Paraguaçu.

#### **5.4 – Trocas de massa e tempo de descarga**

Os três experimentos variaram em relação ao período de renovação de massa da BTS. O tempo de descarga corresponde ao tempo necessário para renovar 63% de toda a massa de água da BTS. Na Figura 15 podemos ver que o tempo de descarga foi reduzido significativamente com o aumento das descargas. O experimento 1, que apresenta a maior média anual de descargas, acarretou em menor tempo de descarga, abaixo de 60 dias. No cenário pós-barragem, onde a descarga é inferior à do cenário anterior, o tempo de descarga subiu para 68 dias e no experimento 3, que detém a menor média anual de descarga, obteve-se o menor tempo de descarga, aproximadamente 75 dias. Cirano e Lessa (2007) ao calcularem o tempo de descarga usando a relação analítica entre o volume da BTS e a descarga fluvial, apontaram uma redução de aproximadamente 1,7 vezes no tempo de descarga do período de inverno em relação ao verão devido ao menor aporte fluvial.

Figura 15: Tempo de descarga total da Baía de Todos os Santos comparando os três cenários apresentados. A linha preta corresponde ao experimento 1, vermelha ao experimento 2 e azul ao experimento 3.



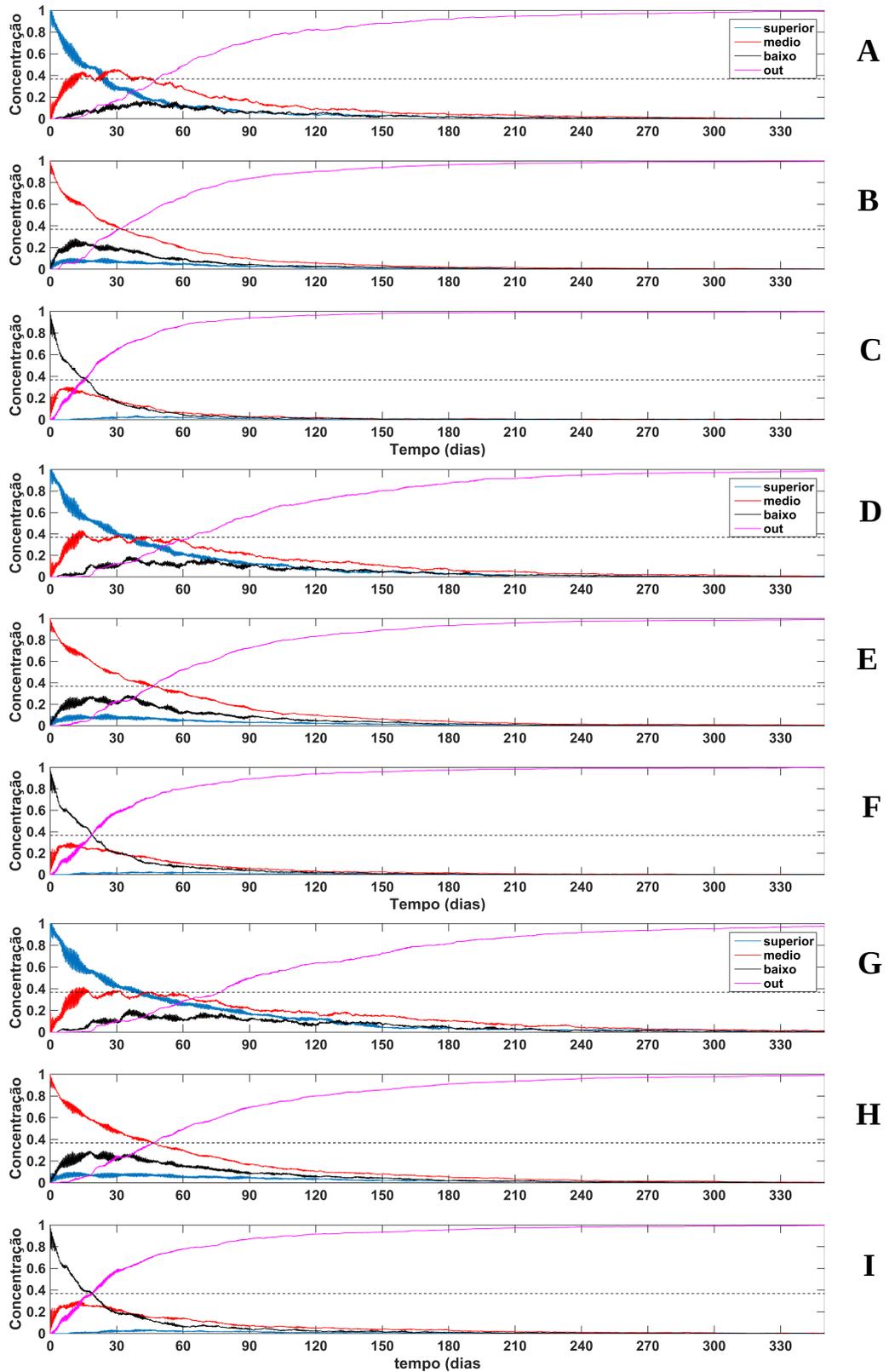
Fonte: Autor.

O tempo de descarga dos diferentes setores da BTS variou de forma distinta para os três cenários. Houve redução do tempo de descarga em todos os setores sob os cenários de maior descarga, porém, os efeitos da variação da descarga foram sentidos com maior intensidade nos setores superior e médio.

O tempo de descarga para a porção mais continental da BTS foi de 28 dias, para o experimento 1 (Figura 16A) e 42 e 45 dias para os experimentos 2 e 3 (fig 16D e 16 G), respectivamente. Já o setor médio teve seu tempo de descarga alterado de 32 dias no experimento 1 para 45 e 48 dias para os experimentos 2 e 3, respectivamente. Por fim, o setor inferior teve o seu tempo de descarga mudado de 16 dias no experimento 1 para 18 dias nos demais experimentos como pode ser visualizado na Figura 16A-C. O menor tempo de descarga e menor diferença entre os experimentos na seção inferior ocorre uma vez que o mesmo está diretamente conectado com a plataforma e sofre maiores efeitos da maré.

Santana (2015) mostrou que a inclusão da forçante baroclínica provoca redução do tempo de descarga da BTS de aproximadamente 5 vezes, em comparação com um modelo puramente barotrópico (forçado por maré e vento). Neste trabalho mostramos que a variação das descargas do Rio Paraguaçu também gera grandes diferenças nos tempos de descarga.

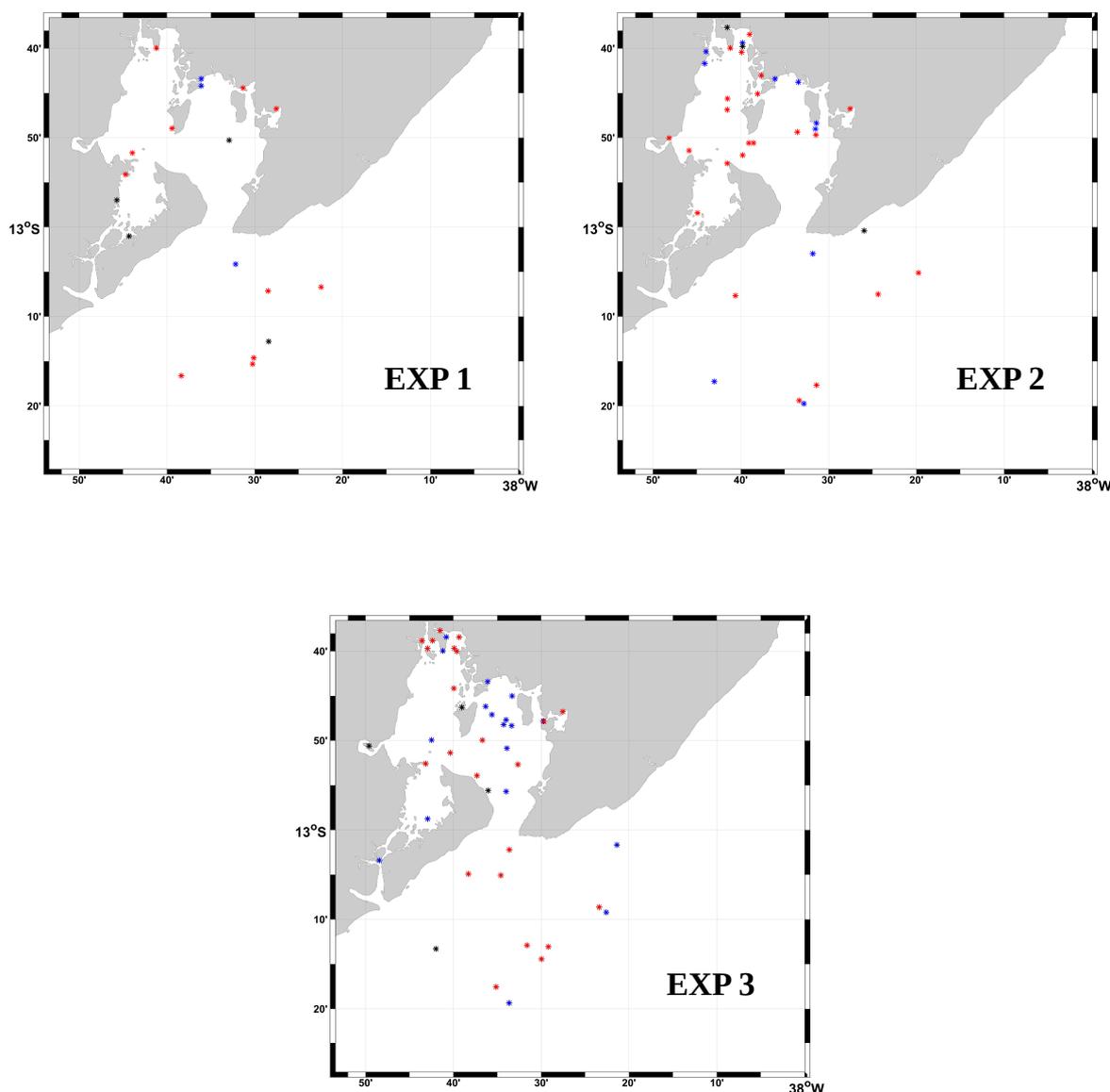
Figura 16: Tempos de descarga dos setores superior, médio e inferior para o experimento 1 (A,B e C), 2 (D, E, F) e 3 (G, H e I). O número 1 no eixo das ordenadas corresponde a 100% da concentração. Em A, D e G 100 % da concentração inicial está localizada no setor superior, em B, E e H no setor médio e em C, F e I no inferior.



Fonte: Autor.

Apesar da pequena diferença nas velocidades residuais gerada pelas diferentes descargas (experimentos), o seu efeito integrado em um ano é grande. A distribuição final das partículas após um ano de simulação diferiu entre os experimentos (Figura 17). O maior aporte fluvial no experimento 1 resultou numa maior troca de massa entre a BTS e a plataforma transformando a baía num exportador de material mais eficiente quando comparado com os experimentos 2 e 3.

Figura 17: Posição final das partículas após 365 dias com o modelo estável para os experimentos 1, 2 e 3.



## 6 – CONCLUSÃO

A importância da circulação baroclínica na dinâmica da BTS já havia sido demonstrada por Cirano e Lessa (2015). Santana (2015) mostrou que as forçantes baroclínicas tem papel chave na circulação residual da BTS e que o efeito da descarga fluvial similar aos fluxos de água e calor por superfície na manutenção desta circulação residual. Neste trabalho mostramos que a variação da quantidade de água do Rio Paraguaçu que chega a BTS também é de suma importância para a circulação residual.

Fica claro que o impacto que a barragem de PDC provoca na descarga do rio Paraguaçu, descrito por Genz e Lessa (2015), altera a circulação residual e o tempo de descarga total da BTS e de seus diferentes setores. A dispersão de partículas também respondeu de forma significativa a influência da barragem.

O aumento da descarga da PDC gera intensificação da circulação residual e à um aumento da renovação das águas da BTS. Haja vista, que a qualidade de água da BTS depende em parte desta renovação, pode-se concluir que a barragem de PDC pode levar a uma piora na sua qualidade. Com base nos nossos resultados, sugere-se que a operação da barragem de Pedra do Cavalo deve levar em consideração as possíveis alterações na qualidade de água da BTS.

## REFERÊNCIAS

- Barreto, G. N. **Influência de dragagens na circulação residual: Baía de Todos os Santos**, Editora da Universidade Federal da Bahia. 2015.
- Cirano, M. e Lessa, G. C. **Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, p. 363-387. 2007
- Egbert GD, Bennett AF, Foreman MGG (1994) **TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model**. Journal of Geophysical Research: Oceans doi: 10.1029/94JC01894
- Genz, F.; Lessa, G. C. **Vinte e seis anos de mudanças desiguais nas vazões mínimas devido a diferentes usos e operação de uma grande barragem em um rio no Semiárido**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 20, n2. Porto Alegre. 2015.
- Genz, Fernando. **Avaliação dos Efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre a Circulação Estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape**. Tese de Doutorado. 245p. - Universidade Federal da Bahia, 2006.
- Hansen, D. V., Rattray, Jr, M. **New dimensions in estuarine classification**. Limnology and Oceanography, 18, 849-862. 1996.
- Hatje, V.; Andrade, J. B. Introdução. In: Vanessa Hatje; Jailson B. de Andrade. (Org.). **Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos**. Salvador: Editora da Universidade Federal da Bahia, v. 1. 2009.
- Kjerfve, B., Ribeiro, C.H.A., Dias, G.T.M, Filippo, A.M., Quaresma, V.S. **Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil**. Continental Shelf Research, 1609 –1643p. 1997.
- LESSA, G ; CIRANO, M ; GENZ, F ; TANAJURA, C ; SILVA, R. **Oceanografia física**. In:. **Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos**. Editora da Universidade

Federal da Bahia, Salvador. 2009, v. 1, p. 15-24.

Miranda, L. B.; De Castro, B. M. e Kjerfve, B. (2002) **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**, Editora da Universidade de São Paulo, 414p. 2002.

Mitchell, S. B.; Jennerjahn, T. C.; Vizzini, S.; Zhang, W. **Changes to processes in estuaries and coastal waters due to intense multiple pressures – An introduction and synthesis**. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 156, 6p. 2015.

Neto, E. M. **Estudo da circulação forçada por ventos e marés na baía de Todos os Santos e plataforma continental adjacente. Simulações com o modelo numérico da Universidade de Princeton (POM)**. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 128 p, 1998.

Potter, I. C.; Chuwen, B. M.; Hoeksema, S. D.; Michael, E. **The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline**. Estuarine Coastal and Shelf Science, v. 87, n 3, 497-500p. 2010.

Saha S, Moorthi S, Pan H et al (2010) **The NCEP Climate Forecast System Reanalysis**. Bull Amer Meteor Soc 91:1015-1057 doi: 10.1175/2010BAMS3001.1.

Santana, R. C. 2015. **O impacto de diferentes forçantes na circulação residual de um estuário tropical bem misturado: Baía de Todos os Santos, Brasil – 13°S**. Dissertação de mestrado. Editora da Universidade Federal da Bahia. Salvador – BA.

Servain J.; Stricherz, J. N.; Legler, D. M. **TOGA pseudo-stress atlas 1985-1994**. Volume 1: Tropical Atlantic. Centre ORSTOM, Plouzane, France, 158 p. 1996.

Wolgemuth, K.M., Burnett, W.C., Moura, P.L. **Oceanography and suspended material in Todos os Santos Bay**. Revista Brasileira de Geociências, 11(3):172-178. 1981.

Xavier, A. G. **Análise hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos**. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 222 p. 2002.