

## **O IMPACTO DOS DIFERENTES FORÇANTES SOBRE A CIRCULAÇÃO RESIDUAL NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BRASIL 13°S**

**Santana<sup>1,2</sup>, R.; Teixeira<sup>3</sup>, C.; Lessa<sup>2</sup>, G.**

*<sup>1</sup> Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO)*

*<sup>2</sup> Grupo de Oceanografia Tropical (GOAT) - Universidade Federal da Bahia - Brasil*

*<sup>3</sup> Instituto Ciências Marinhas (Labomar) - Universidade Federal do Ceará - Brasil  
Travessa Barão de Jeremoabo, s/n - Campus Universitário de Ondina - LFNA, Salvador, BA  
CEP: 40170-280  
rafacsantana@gmail.com*

### **RESUMO**

Este estudo investiga o papel de diferentes forçantes na circulação residual em um estuário tropical bem misturado: Baía de Todos os Santos (BTS). Um modelo numérico (ROMS) foi utilizado para investigar os papéis sazonais da maré, estresse do vento, fluxo de calor e água na superfície e vazão fluvial sobre a circulação residual e tempo de descarga da BTS. A maré força um fluxo de correntes direcionadas para o continente no centro do canal, e um fluxo residual de vazante próximo às margens na entrada principal da baía. No entanto, a maré sozinha não é capaz de renovar substancialmente as águas da baía em 350 dias. O vento foi importante para a circulação de superfície, forçando um fluxo no sentido oeste (norte) nos meses de primavera e verão (outono-inverno). Além disso, os efeitos do vento associados aos da maré, foram importantes na redução do tempo de descarga para 340 dias. Os fluxos de calor e de água estabeleceram uma circulação gravitacional incipiente e foram responsáveis pela redução do tempo de descarga para 147 dias devido à ação da circulação termohalina. A descarga fluvial estabeleceu um fluxo baroclínico na maior parte do estuário, incluindo a boca da BTS. Este impacto culminou na redução do tempo de descarga em 5 vezes (68 dias) em relação ao experimento simulando o efeito combinado de vento e maré.

Palavras chave: Circulação residual, baroclínico, barotrópico

### **INTRODUÇÃO**

A circulação residual é definida como o movimento resultante de uma partícula após um período de tempo igual a um ou múltiplos ciclos de maré. Está tem papel fundamental na distribuição de nutrientes, contaminantes, plâncton, sedimento em suspensão e outros materiais em baías e estuários. A Baía de Todos os Santos (BTS) é um estuário tropical, dominado por maré e bem misturado (Cirano e Lessa, 2007). A BTS está localizada nas bordas da terceira cidade mais populosa do Brasil com cerca de 2,8 milhões de habitantes, abriga dez terminais portuários de grande porte e a Refinaria Landulpho Alves (RLAM), os quais são potenciais fontes de contaminantes via meio aquoso. A baía também comporta uma grande quantidade de pequenos estuários, recifes de corais e uma complexidade de ambientes sedimentares, dentre os quais o fluxo de nutrientes e matéria orgânica é fundamental para a produtividade da BTS.

Xavier (2002) estudou o papel da maré e do vento na circulação residual da BTS utilizando um modelo barotrópico e encontrou valores máximos de 0,2 m/s na entrada da baía

e tempo de residência igual a 35 dias para as regiões mais internas. No entanto, seus resultados subestimaram as correntes residuais em 50% em algumas estações, devido à não inclusão do processos baroclínicos. Tal evidência, foi fortalecida com os estudos observacionais de Genz (2006), Cirano e Lessa (2007) e Pereira e Lessa (2009), os quais sugerem que as variações de densidade causadas pelos fluxos de calor e de água na superfície e descarga fluvial tem papel fundamental na circulação residual e tempo de descarga da BTS.

## **OBJETIVOS**

O objetivo do presente trabalho é quantificar a importância de diferentes forçantes (marés, vento, fluxos de água na superfície e calor e descarga fluvial) na circulação residual da BTS acessando o impacto das forçantes sobre: a sazonalidade das trocas de volume entre o estuário e a plataforma; e o tempo de descarga.

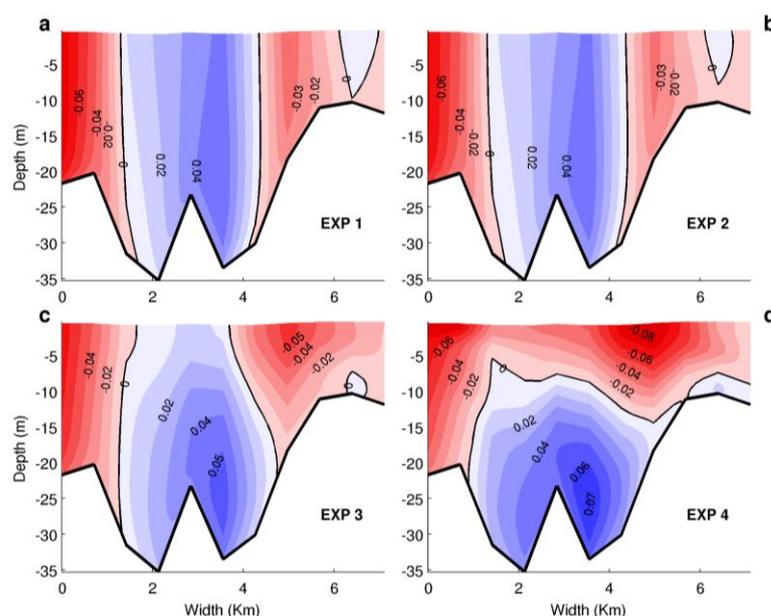
## **METODOLOGIA**

O modelo utilizado no presente trabalho foi o Regional Ocean Modeling System (ROMS). A grade tem uma resolução horizontal de 500 m e 20 níveis verticais, a qual cobre toda a baía, a plataforma e o talude adjacentes. O modelo foi configurado para resolver as partes barotrópicas e baroclínicas das equações hidrodinâmicas a cada  $\sim 2,7$  e 80 s, respectivamente, gravando os resultados a cada 1 hora. O tempo de aquecimento do modelo foi de 3 anos, e as análises focaram no quarto ano de simulação. O ROMS foi forçado com 5 agentes: maré, vento, fluxo de calor, fluxo de água na superfície e descarga fluvial. O forçamento com maré foi proveniente do modelo global de maré TPXO 7.2. Foram utilizadas as oito principais componentes harmônicas de maré (M2, S2, O1, K1, N2, K2, P1, M4) para forçar os contornos oceânicos do modelo com elevação e correntes. Na superfície, dados de vento e fluxos de calor e água gerados a partir da interpolação entre observações das estações meteorológicas do INMET e dados de reanálise do NCEP foram utilizados para forçar o ROMS. As climatologia das descargas dos principais rios afluentes à baía também foram utilizadas como forçante. Quatro experimentos de complexidade incremental com diferentes combinações de forçantes foram realizados, a saber: maré (EXP1), maré e vento (EXP2), maré, vento e fluxos de calor e água na superfície (precipitação-evaporação) (EXP3), todas as forçantes (EXP4), quando o rio é adicionado. O tempo de descarga foi calculado para todos os experimentos, liberando-se derivadores lagrangianos em todos os pontos de grade no meio da coluna d'água e calculando a sua concentração relativa ao total de partículas liberadas inicialmente dentro da baía a cada hora. O tempo de descarga foi obtido quando a concentração dos flutuadores se reduzia ao valor de  $e^{-1}$  ( $\sim 0,37$ ).

## **RESULTADOS**

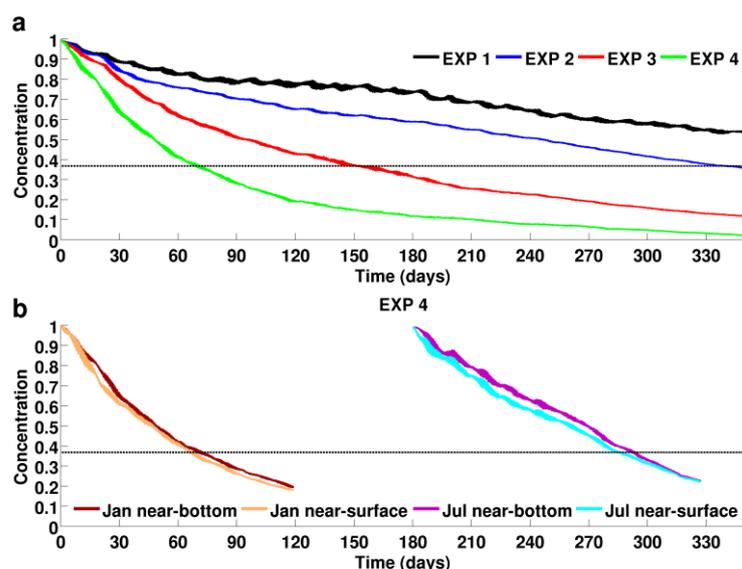
Os resultados do experimento controle (EXP4) se comparam bem com observações de elevação, correntes, temperatura e salinidade nas estações de verão e inverno. A maré força um fluxo de entrada pelo centro do canal e saída pelas laterais com magnitudes máximas de 0,04 m/s e 0,06 m/s, respectivamente (Figura 1a). Estes resultados apresentam boa concordância com soluções idealizadas por Li & O'Donnell (2005) para estuários curtos ( $4 * L / \lambda < 0,6$ , L=comprimento do estuário,  $\lambda$ =comp. da onda de maré) como a BTS. O EXP2 mostrou uma feição similar à encontrada no experimento apenas com maré (horizontalmente cisalhado), evidenciando o efeito reduzido dos ventos no verão na entrada do estuário (Figura

1b). A adição dos fluxos de calor e água na superfície (EXP3) mostram o surgimento de uma circulação gravitacional incipiente com o aumento da magnitude do fluxo de saída na margem esquerda e de entrada no fundo para 0,05 m/s em ambos os setores, principalmente devido aos fortes de gradientes de temperatura ( $-0.2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) observados em janeiro. No EXP4 é observada a mudança do padrão de circulação residual para verticalmente cisalhada, com fluxos de saída e entrada iguais a 0,08 m/s e 0,07 m/s, respectivamente. Estes resultados elucidam a importância dos rios nos processos de troca entre a plataforma e o estuário, principalmente em janeiro, quando a descarga fluvial apresenta um pico. No inverno, para os EXP3 e 4, as magnitudes dos fluxos de trocas foram reduzidas devido aos menores gradientes de temperatura e descarga fluvial.



**Figura 1 - Seção de circulação residual na entrada da BTS para os diferentes experimentos no mês de janeiro. EXP1 (a), EXP2 (b), EXP3 (c) e EXP4 (d). Valores positivos (em cor azul) representam fluxos residuais de entrada.**

O tempo de descarga calculado para experimento é apresentado na Figura 2a. A circulação forçada apenas por maré não foi capaz de atingir o tempo de descarga em 350 dias. No entanto, ao adicionar-se o vento (EXP2) observa-se a redução do tempo de descarga para 340 dias. Tal redução pode ser endereçada ao aumento das correntes na plataforma que dispersa os derivadores que saem durante a maré vazante, o que não ocorre no EXP1. Uma forte redução do tempo de descarga (147 dias) ocorre o adicionarmos os efeitos baroclínicos dos fluxos de calor e água na superfície (EXP3). O tempo de descarga é reduzido em 5 vezes (68 dias) em relação ao EXP2, quando a descarga fluvial é adicionada no sistema, elucidando a importância deste agente na renovação das águas no estuário. Baseando-se no EXP4 uma nova simulação foi realizada, ao liberar-se flutuadores próximos à superfície e ao fundo em janeiro e julho. Os resultados (Figura 2b) mostram que o tempo de descarga entre a superfície e fundo para janeiro (65 e 73 dias) e julho (106 e 114 dias) variaram pouco entre os estratos, com tempos maiores para o fundo. Isto pode ser resultado da forte mistura que ocorre no estuário, onde salinidades acima de 2 são raramente encontradas. No entanto, o tempo de descarga foi menor quando as partículas foram liberadas em janeiro, mês que se observa os maiores gradientes de densidade gerados pelos picos de descarga fluvial e fluxo de calor.



**Figura 2 - Série temporal da concentração relativa de flutuadores dentro da BTS. (a) EXP1 (preto), EXP2 (azul), EXP3 (vermelho) e EXP4 (verde) liberados a meia coluna d'água. (b) Janeiro-fundo (marrom), Janeiro-superfície (laranja), Julho-fundo (roxo) e Julho-superfície (ciano) para EXP4.**

## CONCLUSÕES

A maré força as maiores magnitudes da circulação residual no estuário e um fluxo horizontalmente cisalhado na entrada da BTS. No entanto, está forçante não foi capaz renovar substancialmente as águas da baía em 350 dias. A inclusão dos ventos, apesar de apresentar menor impacto na circulação residual na entrada da BTS, mostrou-se importante na redução do tempo de descarga no estuário. A adição dos fluxos de água e calor desenvolveram uma fluxo de troca inicial por conta dos efeitos baroclínicos, e provocaram a redução pela metade do tempo de descarga calculado apenas com vento e maré. Já o experimento com a adição da descarga fluvial mostrou a importância dos rios no estabelecimento de um fluxo de troca na entrada da BTS e a consequente redução do tempo de descarga para 68 dias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIRANO, M.; LESSA, G. C. (2007) Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**. 25:363-387

GENZ, F. (2006) Avaliação dos efeitos da Barragem de Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape. **Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia**, Brasil, 266 p.

LI, C.; O' DONNELL, J. (2005) The effect of channel length on the residual circulation in tidally dominated channels. **Journal of Physical Oceanography** 35:123-456

PEREIRA, M. G.; LESSA, G. C. (2009) Varying patterns of water circulation in Canal de Cotegipe, Baía de Todosos Santos. **Revista Brasileira de Geofísica** 27:1-17

XAVIER, A. G. (2002) Análise hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos. **Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia**, UFRJ, 222 p.