



Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais - PPGCTA

Diego Santos de Andrade

**MODELAGEM DO EFEITO DO VENTO LOCAL SOBRE A
HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO BURANHÉM E DE SUA
PLUMA COSTEIRA**

Orientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo Cordeiro
Bernardes

Co-orientador: Prof. Dr. Allison Gonçalves Silva

PORTO SEGURO - BA
JULHO – 2021

Diego Santos de Andrade

**MODELAGEM DO EFEITO DO VENTO LOCAL SOBRE A
HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO BURANHÉM E DE SUA
PLUMA COSTEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Sul da Bahia e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo Cordeiro
Bernardes

Co-orientador: Prof. Dr. Allison Gonçalves Silva

PORTO SEGURO - BA

JULHO – 2021

Catálogo na Publicação (CIP)
Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB)

A553m Andrade, Diego Santos de, 1991-

Modelagem do efeito do vento local sobre a hidrodinâmica do estuário do rio Buranhém e de sua pluma costeira / Diego Santos de Andrade. – Porto Seguro: UFSB, 2021. –

93f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul da Bahia, Campus Sosígenes Costa, Centro de Formação em Ciências Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais, 2021.

Orientador: Marcos Eduardo Cordeiro Bernardes.

1. Estuários - Buranhém, Rio (MG e BA) – Porto Seguro, BA. 2. Hidrodinâmica – Modelos matemáticos. 3. Delft3D (Programa de computador). I. Título.

CDD – 551.483

Sistema de Bibliotecas (SIBI)

Elaborada por Raquel da Silva Santos – CRB-5ª Região/ 1922

**MODELAGEM DO EFEITO DO VENTO LOCAL SOBRE A
HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO BURANHÉM E DE SUA
PLUMA COSTEIRA**

Comissão Julgadora



Prof. Dr. Fabrício Berton Zanchi
Universidade Federal do Sul da Bahia



Prof. Dr. Angelo Teixeira Lemos
Universidade Federal do Sul da Bahia



Prof. Dr. Eduardo Siegle
Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo

Aprovada em: dia mês ano (28/07/2021)

Local da Defesa: Webconferência - <https://meet.google.com/est-dnfp-ump>

Dedico este trabalho a
todos aqueles que
contribuíram com sua
realização

AGRADECIMENTOS

A princípio, agradeço a Deus pela força maior, sem a qual nada seria possível; a minha amada família, por terem me ensinado as maiores virtudes desta vida e pelo apoio a todos os momentos; e aos meus amigos que sempre acreditaram em mim.

Ao meu Orientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo Cordeiro Bernardes, pela excelente orientação que tive durante todo esse período; por sua paciência, aprendizado, incentivo e, principalmente, pela disponibilidade a todo momento.

Ao meu Co-Orientador: Prof. Dr. Allison Gonçalves Silva, pelo apoio e aprendizado.

Ao Prof. Dr. Eduardo Siegle e toda equipe do IOUSP, pelo acesso remoto ao computador, sem o qual eu não conseguiria desenvolver minhas simulações.

Ao MSc. Maurício da Rocha pela disponibilidade de dados, ajuda e paciência.

À MSc. Ana Carolina Rodrigues de Sá Silva e Maryfrance de Cassia Santos Diniz pela disponibilidade de dados.

À Marinha do Brasil e ao Condomínio Marina Buranhém, pelo apoio indispensável na coleta dos dados de campo utilizados neste trabalho.

Ao MSc. Lucas Farias pela ajuda na elaboração do mapa.

Sumário

RESUMO.....	15
ABSTRACT	16
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE FIGURAS	18
1. INTRODUÇÃO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Estuário	15
2.2 Forçantes físicas.....	16
2.2.1 Marés.....	16
2.2.2 Descarga fluvial.....	16
2.2.3 Vento.....	17
2.2.4 Plumas costeiras	17
2.3 Modelos numéricos	20
2.3.1 Modelos Hidrodinâmicos	20
2.4 Calibração e validação de modelos numéricos	22
3. OBJETIVOS.....	23
3.1 Objetivo Geral.....	23
3.2 Objetivos Específicos.....	23
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Área de Estudo.....	24
4.2 Dados de campo.....	27
4.3 Modelo Delft3D.....	27
4.3.1 Modelo Delft3D - Módulo FLOW	29
4.3.2 Processamento do Módulo FLOW	31
4.3.3 Grade Delft3D	33
4.3.4 Batimetria.....	34
4.3.5 Testes de Sensitividade	34
4.4 Dados meteorológicos	37
4.5 Dados de descargas fluviais.....	40
4.6 Período de Simulação	41
4.7 Calibração do Modelo	41
4.8 Validação do Modelo	43
4.9 Avaliação Estatística do Modelo.....	43
4.10 Pluma.....	44
4.11 Decomposição de Velocidade	45
5. RESULTADOS.....	47
5.1 Calibração.....	47
5.1.1 Nível	47
5.1.2 Salinidade	49
5.1.3 Velocidade Longitudinal.....	51
5.2 Validação.....	54
5.2.1 Nível	54

5.2.2	Salinidade	56
5.2.3	Velocidade na direção longitudinal.....	60
5.2.4	Velocidade na direção transversal.....	60
5.3	Plumas	62
5.3.1	Séries Temporais.....	62
5.3.1.1	Nível de Água.....	63
5.3.1.2	Salinidade	63
5.3.1.3	Velocidade.....	70
5.4.1	Análise do comportamento espacial da pluma	77
5.4.1.1	Salinidade	78
5.4.1.2	Velocidade.....	80
CONSIDERAÇÕES FINAIS		85
REFERÊNCIAS		88

MODELAGEM DO EFEITO DO VENTO LOCAL SOBRE A HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO BURANHÉM E DE SUA PLUMA COSTEIRA

RESUMO

Compreender a interação entre forçantes físicas como as marés, vazão fluvial e ventos é essencial nos estudos de hidrodinâmica estuarina e costeira. Espera-se contribuir para possíveis medidas de gestão ambiental, uma vez que as praias são os principais atrativos turísticos e econômicos de Porto Seguro e, ao mesmo tempo, influenciadas pelos múltiplos fenômenos que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Buranhém, no seu estuário e na zona marinha. O objetivo deste trabalho foi modelar o efeito do vento local e sua interação com a descarga fluvial e as marés na hidrodinâmica do estuário do rio Buranhém (Porto Seguro, BA) e de sua pluma costeira. Foi escolhido o modelo numérico Delft3D, que se justifica pelo fato de já estar calibrado e validado para a área de estudo quanto ao efeito das marés e das descargas fluviais, em Rocha (2019). No presente estudo, foi adotada discretização vertical com 10 camadas Z, a fim de se tentar modelar a estratificação vertical de sal, identificada em campo especialmente sob condições de marés de quadratura. Para as etapas de calibração e validação, foram incorporados dados reais de vento. Adotou-se avaliação quantitativa dos resultados, com a utilização dos parâmetros estatísticos Skill e RMSE. Para compreensão dos possíveis efeitos do vento e reprodução de pluma, considerou-se uma vazão fluvial de até 75 m³/s, além das seguintes condições idealizadas: sem vento, com vento NE, S e SE, e intensidade de 10 m/s para esses três últimos cenários. Além das localidades utilizadas na calibração e validação (P1 - Quinta do Porto; P2 - Marinha e P3 - Marina Buranhém), foram incorporados outros pontos na região costeira adjacente, como o Recife de Fora (P6) e praias onde são realizadas análises de balneabilidade, como a do Mundaí (P4), Taperapuã (P5) e Mucugê (P7). Os resultados referem-se exclusivamente às condições superficiais, uma vez que não foi possível a modelagem em todas as camadas verticais. Para os períodos de calibração e validação, o efeito local do vento foi secundário em relação às marés e descarga fluvial na hidrodinâmica do estuário do rio Buranhém. Já nas simulações da pluma, sob condições idealizadas, a modelagem indica que o vento pode influenciar na hidrodinâmica estuarina. A geomorfologia e a topobatimetria da região foram fatores relevantes nas trocas de água entre a bacia hidrográfica, o estuário e a região marinha adjacente. Exemplo disso é a presença do beachrock/arenito na desembocadura do sistema estudado, o que reforça a importância de uma representação fidedigna das características do ambiente para sua adequada modelagem. Já na zona costeira adjacente, a influência do vento local fica evidente quando comparados os resultados para os cenários considerados. Sob condições de vento NE, espera-se que a pluma atinja regiões litorâneas ao sul da desembocadura do rio Buranhém, como a praia do Mucugê (P7). Já sob condições de ventos S e SE, a pluma tende a se deslocar para norte, sem contudo atingir diretamente o Recife de Fora (P6) nas condições simuladas. A pluma deslocou-se muito próximo à linha de costa, onde se localizam praias como a do Mundaí (P4) e de Taperapuã (P5). Ao se analisar as componentes longitudinal e transversal de velocidade na área de estudo, foram modeladas correntes de até 0,6m/s. No ambiente costeiro adjacente, evidenciou-se a influência das marés na modulação das correntes. Sob eventos extremos de vazão e vento, a pluma do rio Buranhém pode afetar a hidrodinâmica estuarina, além da costeira, inclusive em trechos da linha de costa onde estão situados importantes atrativos turísticos do município.

Palavras-chave: Delft3D, modelagem numérica, dinâmica estuarina, Porto Seguro.

MODELING THE LOCAL WIND EFFECT ON THE HYDRODYNAMICS OF THE BURANHÉM RIVER ESTUARY AND ITS COASTAL PLUME

ABSTRACT

Understanding the interaction between physical forcings such as tides, river flow and winds is essential in studies of estuarine and coastal hydrodynamics. It is expected to contribute to possible measures of environmental management, since beaches are the main tourist and economic attractions of Porto Seguro and, at the same time, influenced by the multiple phenomena that occur in the hydrographic basin of the Buranhém river, its estuary and the marine area. The objective of this work was to model the effect of local wind and its interaction along with river discharge and tides on the hydrodynamics of the Buranhém river estuary (Porto Seguro, Bahia, northeastern Brazil) and its coastal plume. The numerical model Delft3D was chosen, which is justified by the fact that it was already calibrated and validated for the study area regarding the effect of tides and river discharges, in Rocha (2019). In the present study, the vertical discretization with 10 Z layers was adopted, in order to try to model the vertical salt stratification, identified in the field especially under neap tides. For the calibration and validation steps, real wind data were incorporated. A quantitative evaluation of the results was adopted, using the statistical parameters Skill and RMSE. To understand the possible effects of wind and plume reproduction, a freshwater flow of up to 75 m³/s was considered, along with the following conditions: no wind, NE, S and SE winds, and intensity of 10 m/s for these three scenarios. In addition to the locations used in the calibration and validation (P1 - Quinta do Porto; P2 - Navy and P3 - Marina Buranhem), other points were incorporated in the adjacent coastal region, such as Recife de Fora (P6) and beaches where bathing analyzes are performed, such as Mundai (P4), Taperapua (P5) and Mucuge (P7). The results were exclusively representative of surface conditions, since modeling in all vertical layers was not possible. For the calibration and validation periods, the local wind effect was of secondary importance in relation to tides and river discharge on the hydrodynamics of the Buranhém river estuary. On the plume simulations, under idealized conditions, results suggest that the wind can influence the estuarine hydrodynamics. The geomorphology and topobathymetry of the region were relevant factors in the exchange of water between the hydrographic basin, the estuary and the adjacent marine region. An example of this is the presence of beachrock/sandstone at the mouth of the studied system, which reinforces the importance of a reliable representation of the characteristics of the environment for an adequate modeling. In the adjacent coastal zone, the impact of the local wind is evident when comparing the results for the considered scenarios. Under NE wind conditions, the plume is expected to reach coastal regions south of the mouth of the Buranhém River, such as Mucuge Beach (P7). On the other hand, under S and SE wind conditions, the plume tends to move to northwards, without being able to directly reach Recife de Fora (P6) in the simulated conditions. The plume moved very close to the coastline, where beaches such as Mundai (P4) and Taperapua (P5) are located. Longitudinal and transverse velocity components in the study area reached up to 0.6m/s. In the adjacent coastal environment, the influence of tides on current modulation was evident. Under extreme events of flow and wind, the Buranhem river plume can affect the estuarine hydrodynamics, in addition to the coastal one, including stretches of the coastline where important tourist attractions in the municipality are located.

Keywords: Delft3D, numerical modelling, estuarine dynamics, Porto Seguro.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação dos pontos de comparação entre dados de campo e modelados (P1 a P3). Para os demais pontos (P4 a P7), só é possível a visualização dos resultados modelados.	27
Tabela 2– Síntese dos dados de campo utilizados na dissertação.....	32
Tabela 3 - Sistematização dos parâmetros físicos e definição das variáveis utilizadas.....	35
Tabela 4 - Constantes harmônicas de maré na estação 40154, Latitude 16° 27'2''S, Longitude 39° 39'W, analisados no período de 30/05/1999 a 30/06/1999, com nível médio de 1,08m. Fonte: BNDO (1999).....	37
Tabela 5 - Definição dos parâmetros de ajuste realizados no modelo 2D e 3D para o período de calibração.....	42
Tabela 6 - Classificação dos parâmetros estatísticos Skill (ALLEN et al., 2007) e RMSE (WILLIAMS and ESTEVES, 2017).....	44
Tabela 7 Comparação dos parâmetros estatísticos para o período de calibração obtidos por Rocha (2019), que corresponde às simulações sem a inclusão do vento e adoção da camada sigma, em comparação aos resultados obtidos nesta dissertação, com a inclusão do vento e adoção da camada Z. Os valores destacados em vermelho referem-se aos resultados que apresentaram piores valores para cada caso.	53
Tabela 8 - Comparação dos parâmetros estatísticos para o período de validação entre os resultados quantitativos obtidos por Rocha (2019), que corresponde às simulações sem a inclusão do vento e adoção da camada sigma, em comparação aos resultados obtidos nesta dissertação, com a inclusão do vento e adoção da camada Z. Os valores destacados em vermelho referem-se aos resultados que apresentaram piores valores para cada caso.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subdivisão das zonas do rio, estuário e oceano. Fonte: Miranda, Castro e Kjerfve (2002).....	15
Figura 2 - Comportamento da pluma com geometria idealizada. Fonte: Adaptado de MacCready (2004).....	19
Figura 3 - Interconectividade entre as variáveis categorias de modelos. Fonte: Duarte (2010).	20
Figura 4 - Localização do estuário do rio Buranhém. P1 (Quinta do Porto), P2 (Marinha) e P3(Marina Buranhém) - pontos de comparação entre dados de campo e modelados. P4 (praia do Mundaí), P5 (praia de Taperapuã), P6 (Recife de fora) e P7 (praia do Mucugê) - pontos de visualização dos resultados modelados. As isóbatas (linhas de mesma profundidade) não foram consideradas.	25
Figura 5- Rosa dos ventos para Porto Seguro com dados obtidos pela RedeMET no período de 25/11/2002 a 14/08/2010. Fonte: Silva (2016).	26
Figura 6 - Etapas do processo de modelagem das simulações hidrodinâmicas.....	29
Figura 7- Grade numérica utilizada neste estudo, com destaque para a região do rio e do estuário. Fonte: Adaptado de Rocha (2019).	33
Figura 8 - Representação dos limites do oceano adjacente (“Oc1”, “Oc2” e “Oc3”) e local de prescrição da vazão do rio Buranhém (“Rio”). Em A), tem-se o domínio de forma ampla, com a indicação dos 7 pontos utilizados para análise dos resultados; B), a representação dos pontos utilizados para comparar dados de campo e modelados, com destaque na área do estuário/rio; e em C), recorte da região da praia do Apaga Fogo, ilustrado por tons de azul claro e esverdeado.	36
Figura 9 - Série histórica da intensidade de velocidade do vento (m/s) utilizada para o período de calibração. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.	38
Figura 10 - Série histórica da intensidade de velocidade do vento (m/s) utilizada para o período de validação. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.	38
Figura 11 - Rosa dos ventos para o período de calibração (01/08/2015 a 06/08/2015).	39
Figura 12- Rosa dos ventos para o período de validação (19/08/2016 a 24/08/2016).	39
Figura 13 - Série histórica da vazão média diária utilizada para o período de calibração. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.	40
Figura 14 - Série histórica da vazão média diária utilizada para o período de validação. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.	40
Figura 15 - Decomposição do vetor velocidade em componentes longitudinal (u) e transversal (v) e a representação do ângulo entre o eixo longitudinal do estuário e o norte verdadeiro (y). Fonte: MIRANDA et al., (2002).....	45
Figura 16– Série temporal de nível de água referente ao P1 para o período de 01/08/2015 a 06/08/2015. Dados observados em vermelho e modelados em azul.	48
Figura 17 - Série temporal de nível de água referente ao P2 para o período de 01/08/2015 a 06/08/2015. Dados observados em vermelho e modelados em azul.	49

Figura 18 - Série temporal de salinidade (A - superfície e B - fundo) no P1 durante o período de calibração. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.....	50
Figura 19 - Série temporal de salinidade (A - superfície e B - fundo) no P2 durante o período de calibração. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.....	51
Figura 20 - Série temporal da velocidade longitudinal (m/s) do P2 durante o período de calibração. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.....	52
Figura 21- Série temporal de nível de água referente ao P2 para o período de 19/08/2016 a 24/08/2016. Dados observados em vermelho e modelados em azul.	55
Figura 22 - Série temporal de nível de água referente ao P3 para o período de 19/08/2016 a 24/08/2016. Dados observados em vermelho e modelados em azul.	56
Figura 23 - Série temporal de salinidade (A – superfície, B – fundo e C – diferença entre fundo e superfície) no P1 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.	57
Figura 24- Série temporal de salinidade (A – superfície, B – fundo e C – diferença entre fundo e superfície) no P2 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.	58
Figura 25 - Série temporal de salinidade (A – superfície, B – fundo e C – diferença entre fundo e superfície) no P3 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.	59
Figura 26 - Série temporal da velocidade longitudinal do P2 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul. A área tracejada corresponde aos dados observados que não foram considerados devido a um erro no equipamento de medição.	60
Figura 27- Série temporal da velocidade transversal do P2 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul. A área tracejada corresponde aos dados observados que não foram considerados devido a um erro no equipamento de medição.	61
Figura 28 - Série temporal de nível d'água (m) do P1 para a situação sem vento. A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de 75m ³ /s é atingida. As circunferências em vermelho representam os instantes de maré que serão utilizados na seção 5.4.1.	63
Figura 29 - Série temporal de salinidade superficial do P1 para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de 75m ³ /s é atingida.	64
Figura 30 - Série temporal de Salinidade do P2 para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de 75m ³ /s é atingida.	65
Figura 31- Série temporal de Salinidade do P3 para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de 75m ³ /s é atingida.	66
Figura 32 - Série temporal de Salinidade do P4 (Mundaí) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de 75m ³ /s é atingida.	67
Figura 33 - Série temporal de Salinidade do P5 (Taperapuã) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de 75m ³ /s é atingida.....	68
Figura 34 - Série temporal de Salinidade do P6 (Recife de fora) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de 75m ³ /s é atingida.....	69

Figura 35 - Série temporal de Salinidade do P7 (Mucugê) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.	70
Figura 36 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P1 (Quinta do Porto) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.....	71
Figura 37- Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P2 (Marinha) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.....	72
Figura 38 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P3 (Marina Buranhém) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.....	73
Figura 39 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P4 (Mundaí) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.....	74
Figura 40 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P5 (Taperapuã) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.....	75
Figura 41 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P6 (Recife de Fora) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.....	76
Figura 42 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P7 (Mucugê) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.....	77
Figura 43- Comportamento espacial da pluma referente a salinidade de superfície, na condição de preamar, para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D).	79
Figura 44 - Comportamento espacial da pluma referente a salinidade de superfície, na condição de baixamar, para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D).	80
Figura 45 - Comportamento espacial da pluma durante condição de preamar de sizígia, com destaque para a região do estuário, referente a intensidade da velocidade horizontal (m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D).	81
Figura 46 - Comportamento espacial da pluma com destaque na zona costeira, durante condição de preamar de sizígia, referente a intensidade da velocidade horizontal (m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D).....	82
Figura 47 - Comportamento espacial da pluma com destaque para a região do estuário, durante condição de baixamar de sizígia, referente a intensidade da velocidade horizontal (m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D).....	83
Figura 48 - Comportamento espacial da pluma com destaque para a região do estuário, durante condição de baixamar de sizígia, referente a intensidade da velocidade horizontal	

(m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D).
..... 84

1. INTRODUÇÃO

A ocupação da população no país é bastante irregular e encontra-se localizada, na maior parte, nas zonas litorâneas, o equivalente a 26% da população brasileira (IBGE, 2010). Devido aos aspectos econômicos, ecológicos e socioculturais, especificamente associadas à disponibilidade de água, navegação, turismo, lazer, recursos pesqueiros, dentre outros, a região costeira apresenta inúmeros benefícios à população, o que justifica o seu intenso povoamento em grande parte do território brasileiro (IBGE, 2010).

De acordo com o MMA (2019), a zona costeira do Brasil se estende a uma porção terrestre linear de aproximadamente 8.500 km, o que abrange 17 estados e mais de quatrocentos municípios. Esses sistemas costeiros, por possuírem ambientes diversos e serem compostos por considerável variabilidade climática - dentre outros fatores, apresentam uma grande variedade de ecossistemas que incluem, dentre outros, os manguezais, recifes de corais, estuários, dunas, restingas, praias arenosas, marismas, lagoas. No presente estudo, destacam-se os estuários.

Segundo Silva (2016), o movimento da água do estuário depende, em diferentes escalas espaço-temporais, de vários processos continentais (descarga ou vazão fluvial), atmosféricos (ventos e chuvas) e oceânicos (correntes, marés, ondas geradas pelo vento e demais processos oscilatórios, além de variações do nível do mar). Além desses processos, outras características do meio que influenciam a hidrodinâmica estão associados com a geomorfologia, climatologia, condições de tempo e o grau de antropização.

As descargas de água doce de rios e estuários para o continente representam uma importante conexão entre os ecossistemas terrestres e marinhos. Através da variedade de forças que atuam nestes ambientes de transição, torna-se fundamental a caracterização de sua estrutura e a dispersão final da pluma no oceano costeiro. Estes fluxos podem ser totalmente não lineares, e a depender do tempo, podem influenciar processos estuarinos e costeiros, condicionadas pela turbulência, batimetria costeira, circulação de plataforma, ondas internas, dentre outros fatores (NASH E MOUM, 2005).

De acordo com Geyer et al. (2004), quando a água doce de um estuário flui para o oceano, tem-se a formação de uma pluma. Suas características, em interação com os demais processos meteoceanográficos, são fundamentais para determinar o destino de vários constituintes, sejam eles, poluentes, sedimentos, nutrientes terrígenos etc.

Devido à intensa urbanização nas zonas costeiras, os impactos das plumas de rios nos ecossistemas costeiros são fortemente influenciados por ações antrópicas e têm resultado em graves problemas ambientais, principalmente por servir por muito tempo como depósitos para resíduos de fontes pontuais (descarga de efluentes industriais e esgoto) e fontes difusas, como o escoamento oriundo de áreas agrícolas) (CHANT, 2011). Diante deste contexto, a fim de garantir uma gestão sustentável dos recursos naturais dos ambientes estuarinos e costeiros, torna-se imprescindível a realização de estudos ambientais, como hidrodinâmicos, para uma melhor compreensão desses ecossistemas aquáticos.

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), estima-se que até 2025, o rio Buranhém, localizado no município de Porto Seguro – Bahia, e pertencente à bacia hidrográfica do rio Buranhém (BHRB), também seja utilizado como manancial para captação de água para o abastecimento urbano da zona urbana de Porto Seguro (BA). Contudo, de acordo com Silva et al. (no prelo), vazões históricas nessa bacia já não podem ser assumidas como estatisticamente representativas para estimativas futuras da quantidade de água disponível. Ainda que os aportes de poluentes sejam mantidos nos níveis atuais - o que é improvável, a redução da quantidade de água já causaria o aumento da concentração desses compostos químicos indesejados pela diluição insuficiente, com impactos negativos na qualidade da água. Nesse mesmo estudo, conclui-se que as vazões outorgáveis do rio Buranhém já se encontram perto do limite máximo, de modo que não haveria água suficiente para abastecimento simultâneo das duas maiores cidades da região: Porto Seguro e Eunápolis, sendo que esta já é abastecida por esse rio. Outras consequências desse contexto de redução de vazão e piora na qualidade da água podem ser a intensificação da intrusão salina na região, com implicações ambientais, sociais e econômicas. Considerando-se que há outras intervenções previstas na região, como a dragagem do estuário do rio Buranhém e a construção de marina, estudos como este são essenciais para a compreensão da hidrodinâmica local, assim como os efeitos do vento e da pluma sobre o estuário e zona costeira adjacente, principalmente com o intuito de contribuir com estudos relacionados às condições de navegabilidade, qualidade da água, transporte de sedimentos e morfodinâmica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estuário

Neste estudo, utiliza-se a definição de estuários como sendo corpos de água semi fechados, que possuem uma ligação aberta com o oceano, e que apresentam uma mistura da água continental (água doce) com a água proveniente do oceano (água salgada; CAMERON; PRITCHARD, 1963 apud DUARTE, 2010). Esses ambientes possibilitam vários serviços ecossistêmicos ao meio ambiente, como, por exemplo, servindo como berçário para a vida aquática, proteção costeira, purificação da água, sequestro de carbono, dentre outros benefícios. Os estuários correspondem a um dos ambientes mais importantes das zonas costeiras. Na literatura não há um consenso para a classificação mais completa do estuário, porém esses ambientes podem ser classificados de acordo com aspectos diversos, como: variações de salinidade ou densidade da água, amplitudes de maré da área oceânica adjacente, e características geomorfológicas (SILVA, 2011).

Os estuários podem ser subdivididos em três ambientes: zona de maré do rio, zona de mistura e zona costeira. A zona de maré corresponde à parte do rio que apresenta salinidade praticamente nula; zona de mistura, refere-se ao local onde ocorre a mistura de água fluvial com a água do mar; e zona costeira, corresponde a região adjacente onde há o predomínio da água do mar (KJERFVE, 1987, apud MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). A Figura 1 apresenta a distinção das zonas existentes entre o rio, estuário e oceano.

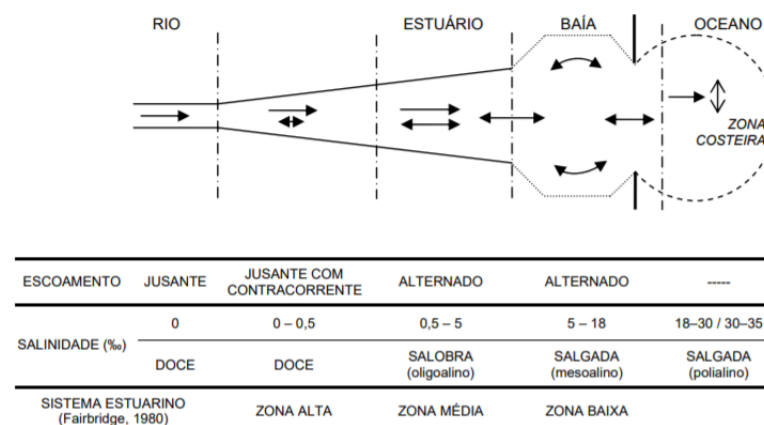


Figura 1 - Subdivisão das zonas do rio, estuário e oceano. Fonte: Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

2.2 Forçantes físicas

A dinâmica estuarina sofre influência de várias forçantes físicas que atuam entre as bacias hidrográficas litorâneas e o oceano adjacente, dentre as principais, tem-se: ondas, marés, correntes, variações do nível do mar, descarga fluvial e condições atmosféricas (ventos e precipitações). Essas forçantes físicas interferem tanto na salinidade do estuário, como na sua estrutura e movimentação das águas (SILVA, 2016), além de processos ecológicos, biológicos, oceanográficos, dentre outros.

2.2.1 Marés

Nos estuários, a transferência de matéria e energia ocorre por meio de processos difusivos e advectivos. Os difusivos são movimentos microscópicos e aleatórios, enquanto os advectivos são movimentos macroscópicos que alteram propriedades como a mistura da coluna d'água, dispersão de poluentes e organismos planctônicos, etc. Em consequência do efeito da turbulência que a maré provoca no estuário, esta corresponde a forçante física que mais favorece os processos de mistura da água estuarina (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

As marés são movimentos essencialmente horizontais da água resultantes das mútuas forças de atração gravitacional e centrífuga que corpos celestes exercem entre si. Nos oceanos e zonas costeiras, as marés podem ser classificadas como marés de sizígia e de quadratura. Quando o Sol e a Lua encontram-se na mesma linha em relação ao planeta Terra, como acontece na Lua cheia e na Lua nova, estas exercem maiores deslocamentos sobre as massas de água e, portanto, geram maiores variações de altura da água (diferença entre a máxima elevação e a mínima), ocorrem as chamadas marés de sizígia. Quando o Sol e a Lua formam um ângulo de 90° com a Terra, como acontece quando a Lua está nas fases quarto crescente ou quarto minguante, ocorre a formação de marés com menores variações do nível de água, estas são chamadas maré de quadratura (NUNES, 2007).

2.2.2 Descarga fluvial

A descarga fluvial ou vazão do rio corresponde a quantidade de água doce que chega ao estuário, e que é resultante do balanço hídrico nas bacias hidrográficas, com por exemplo, precipitação, infiltração, evapotranspiração entre outros processos (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). A ação fluvial em conjunto com a maré induz uma circulação

gravitacional no estuário, tornando-se uma força física importante para esses sistemas. Dentre os efeitos do escoamento fluvial nas características hidrodinâmicas e na qualidade da água dos estuários, Duarte (2010) elenca os principais como sendo: entrada nos estuários de substâncias de poluentes e partículas em suspensão; estratificação de densidade das águas estuarinas; criação de gradientes horizontais de salinidade e influência no tempo de retenção da água fluvial e de residência dos seus constituintes.

2.2.3 Vento

A ação do vento, juntamente com os demais processos (maré e vazão fluvial), além de poder influenciar na circulação do estuário e auxiliar na determinação do grau de estratificação vertical de sal, ajuda no controle da entrada de água salgada e nas trocas de águas, com consequências, por exemplo, nas concentrações de componentes importantes ecologicamente como o oxigênio dissolvido (BECKER; LUETTICH JR.; MALLIN, 2010).

Segundo Nunes (2007), o efeito do vento provoca variação do nível do mar devido à transferência de energia e momento na interface oceano-atmosfera. Este processo do vento dá origem à formação de correntes e de ondas geradoras de marés meteorológicas.

Em estuários e em zonas costeiras, o vento pode atuar de duas maneiras, que pode ser inclusive complementares: efeito local ou remoto. O efeito local ocorre quando os ventos atuam diretamente no local de interesse e causam variações no nível de água. Já no efeito remoto, observam-se variações do nível de água pela atuação de sistemas atmosféricos em locais distantes da área de interesse (SILVA, 2016).

2.2.4 Plumas costeiras

A interação entre o aporte fluvial, a maré e os ventos pode apresentar uma alta variabilidade espacial e temporal e atuar no padrão de mistura das águas estuarinas, sendo fundamental para a interpretação dos sistemas costeiros, uma vez que são capazes de modular as características hidrodinâmicas locais (OLIVEIRA, 2009).

O transporte de matéria e energia entre continente e oceano ocorre predominantemente pelo aporte fluvial. O carreamento de material orgânico e inorgânico, seja dissolvido ou particulado, proveniente das águas fluviais, sofre, durante o percurso, as interferências dos processos físicos, químicos e biológicos, onde há uma transformação de uma parte do material lixiviado do continente (SMITH; HITCHCOCK, 1994; RAYMOND; COLE, 2003).

As plumas costeiras, denominadas também como plumas de turbidez devido a sua coloração visível proveniente do material particulado em suspensão, correspondem a uma das etapas finais do transporte de água e matéria ao longo da interface continente-oceano, e que se evidenciam a partir da desembocadura dos rios sobre a plataforma continental. A interação entre vários fatores, como a magnitude e a duração do aporte fluvial, a variabilidade do vento, da maré, das ondas, da batimetria, e das correntes costeiras e oceânicas, dentre outros, determina a extensão, forma e dinâmica de uma pluma costeira (WRIGHT, 1977; GARVINE, 1987; GARVINE, 1995).

O comportamento de uma pluma de rio pode ser influenciado por várias forças externas, incluindo a rotação terrestre, marés, ventos, ondas geradas pelo vento e correntes. A força de Coriolis pode forçar a pluma em direção à zona costeira adjacente ou à plataforma continental interna. As correntes de maré, próximas da foz do estuário, podem acelerar a expansão da pluma em direção ao oceano, enquanto as correntes de maré ao longo da costa são eficazes na estabilização do crescimento da pluma do rio e o aumento do transporte de água doce ao longo da costa (CHAO, 1989; ISOPE, 2005). A geomorfologia da costa também é importante, uma vez que pode ser importante condicionante do comportamento da pluma e do material por ela transportado.

As correntes ao longo da costa podem intensificar ou atenuar o transporte da pluma de acordo com as suas direções e intensidades. As diferenças de densidade, bem como a mistura promovida pelas marés, são de extrema importância dentro do estuário e na região adjacente à foz do rio, denominada como campo próximo, enquanto o papel do vento é maior em áreas mais distantes da foz sobre a plataforma continental (campo distante), onde a força de Coriolis pode se tornar importante (HETLAND, 2005).

Chen e Sanford (2009) investigaram o efeito resultante do vento na estratificação estuarina e que também pode ser aplicado à pluma. Há duas formas de transporte e mistura da pluma influenciada pelo vento: deflexão pelo vento e mistura vertical direta. Quanto maior a turbulência, mais intensa a mistura vertical da coluna de água, com consequente redução da estratificação vertical. Já o efeito do vento aumenta ou diminui a estratificação, o que irá depender - além da intensidade do vento, de sua direção em relação à direção da frente da pluma. Se a direção do vento for a mesma do eixo principal da pluma, a interação entre as camadas aumenta na medida que a pluma se estende, assim reforçando a estratificação e amplificando o transporte da pluma. Por outro lado, quando o vento é oposto ao sentido de deslocamento da pluma, tem-se uma situação inversa. O fluxo de cisalhamento dominado pelo

vento favorece uma maior inclinação das isopícnais e reduz a estratificação do transporte de água doce. Portanto, além dos efeitos da geomorfologia, a competição entre a intensidade e a direção do vento e fenômenos oceanográficos como as ondas e correntes, irá determinar a mistura e o comportamento da pluma.

No campo próximo, a dinâmica da pluma sofre dois processos que possibilitam significativas misturas entre o estuário e o oceano costeiro. O primeiro, por ocorrer devido a fortes correntes de maré normalmente encontradas na foz dos rios, aumenta a troca de propriedades entre o estuário e oceano, os quais proporcionam um mecanismo para conduzir a água salgada para dentro do estuário e água doce para a zona costeira. Já o segundo mecanismo refere-se a mistura induzida por cisalhamento da água do oceano, em que há o alongamento da pluma do vórtice lateral devido ao seu espalhamento radial (CHANT, 2011).

MacCready (2004) esquematizou esse mecanismo geométrico para caracterizar a dispersão efetiva associada ao campo de fluxo, representados na Figura 2. O transporte de sal é caracterizado pela diferença entre o sal total que sai do estuário durante a vazante e a quantidade de sal que entra no estuário durante a maré enchente. Durante a maré cheia, o estuário delimita a água do oceano costeiro na forma de um fluxo potencial de uma região semicircular que tem um volume igual ao prisma de maré. Em contrapartida, a vazante é observada como um jato com uma forma retangular, cuja largura é igual à largura da foz do estuário. Miranda et al. (2002) definem o prisma de maré como sendo o volume de água transportado pelas marés entre o estuário e o oceano durante a maré enchente.

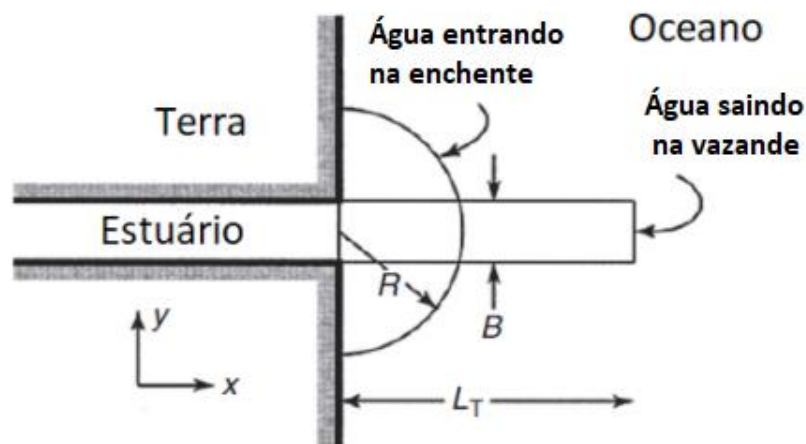


Figura 2 - Comportamento da pluma com geometria idealizada. Fonte: Adaptado de MacCready (2004).

2.3 Modelos numéricos

Segundo Duarte (2010), os modelos numéricos aplicáveis aos sistemas fluviais são geralmente classificados em função dos processos que descrevem e/ou da dimensionalidade do escoamento dominante, podendo ser distribuídos em 4 categorias: hidrodinâmicos, hidrológicos, qualidade da água e ecológicos. A gestão integrada dos ecossistemas estuarinos necessita de uma análise de cenário de forma complexa, por meio da interconectividade das diferentes categorias dos modelos numéricos, conforme pode ser observado através da Figura 3.

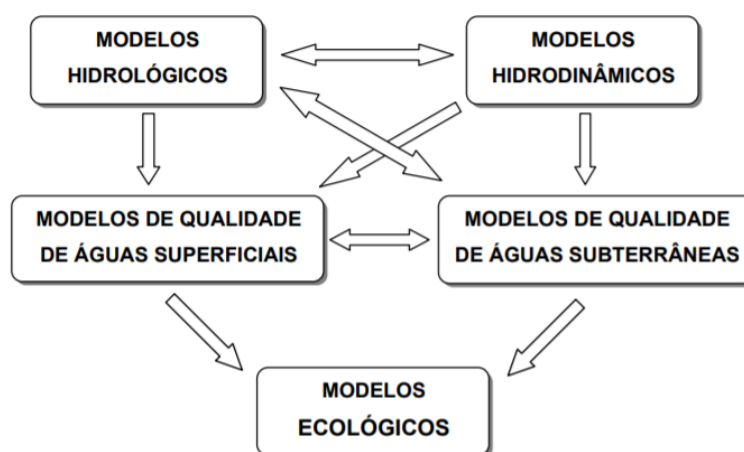


Figura 3 - Interconectividade entre as variáveis categorias de modelos. Fonte: Duarte (2010).

2.3.1 Modelos Hidrodinâmicos

Os modelos hidrodinâmicos consistem em uma descrição matemática dos processos que determinam a circulação, transporte, estratificação, turbulência e renovação dentro de um corpo receptor de água. Esses modelos resolvem as soluções numéricas das equações de conservação da quantidade de movimento e de conservação de massa líquida para prever o movimento da massa hídrica, considerando os principais efeitos dinâmicos desse sistema, como marés, escoamento fluvial, vento, mistura, difusão turbulenta (DUARTE, 2010).

Embora estes modelos possam ser aplicados em estudos focados na dinâmica oceânica e costeira, também podem ser utilizados para estudos de processos químicos (ex: qualidade da água), sedimentares (ex: morfodinâmica), bioecológicos (ex: transporte de organismos planctônicos) etc. As principais utilizações de modelos hidrodinâmicos se dão em lagos,

reservatórios, rios, estuários, sistemas costeiros e oceânicos. A escolha de um modelo hidrodinâmico deverá levar em conta os objetivos do trabalho, o tipo de corpo d'água, escala temporal e espacial e processos físicos preponderantes (PEREIRA, 2003).

A utilização de modelos hidrodinâmicos em ambientes estuarinos ocorre através da interação entre fenômenos oceanográficos, fluviais, meteorológicos e propriedades morfológicas. A salinidade corresponde a uma das principais variáveis conservativas, ou seja, aquelas em que se assume que sua quantidade total não varia ao longo dos domínios espaço-temporais da área estudada e que podem ser utilizadas como indicadores físico-químicos da presença de água do mar. Quando em uma região estuarina há uma diminuição da salinidade, espera-se que tenha havido um predomínio relativo da água doce em relação a águas de origem marinha. Já o aumento da salinidade no estuário indica que há uma predominância da água salgada oriunda do oceano em relação as águas de origem continental. O comportamento desta movimentação depende, dentre outros processos, da variação relativa entre descarga fluvial, ondas, ventos e da interação com a geomorfologia da região de interesse (SILVA, 2016).

Os resultados destes modelos têm se mostrado uma ferramenta essencial em estudos com fins de gerenciamento dos recursos hídricos. Como parte da fundamentação teórica, foi necessária a realização de estudos de alguns trabalhos acadêmicos que pudessem proporcionar uma maior compreensão do assunto em questão. Dentre os estudos que foram analisados, tem-se o trabalho desenvolvido por Capo et al. (2009); e o de Kakoulaki, MacDonald e Horner-Devine (2014). No primeiro, foi possível entender o processo de sedimentação no estuário de Konkouré, localizado na República da Guiné (país da África Ocidental), utilizando dados de batimetria, de sedimentos, de corrente, de elevação da água e de salinidade. Já no segundo trabalho, pôde-se verificar o papel dos ventos no movimento e trajetória da pluma do rio Merrimack, localizado a nordeste dos Estados Unidos.

Já a nível nacional, os trabalhos mais relevantes da área que contribuíram para um melhor embasamento teórico foram desenvolvidos por Andutta (2011), Andutta et al. (2016), Seiler et al. (2020), Santos (2010), Silva et al (2018), Siegle et al. (2019), Oliveira et al. (2019). Os três primeiros trabalhos utilizaram o mesmo modelo hidrodinâmico, DELFT3D, para diferentes áreas de estudos. Santos (2010) e Siegle et al. (2019) utilizaram modelos diferentes para uma área de estudo localizado a 120 km ao sul de Porto Seguro/Bahia; Oliveira et al. (2019) também utilizaram um outro modelo, TELEMAC-3D, para o maior sistema litoral do mundo: Patos – Mirim; e Silva et al (2018), estudaram a hidrodinâmica a

partir da análise de dados da mesma área de estudo do presente trabalho (estuário do rio Buranhém).

2.4 Calibração e validação de modelos numéricos

A calibração é uma das etapas do processo da modelagem que consiste na estimação dos valores dos parâmetros calculados pelo modelo, por meio do ajuste entre esses e os valores observados em campo, podendo ser feita de três modos diferentes: tentativa-e-erro ou manual, automática ou semi-automática (SEIBT, 2013).

A calibração de modelos hidrodinâmicos aplicados a sistemas estuarinos e costeiros objetiva o ajuste dos resultados obtidos na simulação com os valores observados em campo. Geralmente, os parâmetros de calibração utilizados para realizar esse ajuste são os coeficientes de viscosidade turbulenta (nas direções consideradas) e os coeficientes de atrito Chézy, Manning, Strickler, etc. (DUARTE, 2010), além dos modelos de turbulência e características da malha, como número de elementos e discretização espacial.

Já a validação corresponde a uma outra etapa de ajuste de um modelo numérico. Esta etapa é realizada a partir da calibração, cujo objetivo é verificar se o modelo calibrado reproduz satisfatoriamente a realidade em situações diferentes das utilizadas na calibração (LIMA, 2012). Nessa etapa, o conjunto de dados de campo a ser utilizado para comparação com os resultados modelados deve ser diferente daqueles utilizados na calibração, assim como os parâmetros e configurações do modelo já não são mais alterados.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Modelar o efeito do vento local e sua interação com a descarga fluvial e as marés na hidrodinâmica do estuário do rio Buranhém (Porto Seguro, BA) e de sua pluma costeira.

3.2 Objetivos Específicos

- Compreender a importância do vento local na hidrodinâmica do estuário em relação aos efeitos das marés e da descarga fluvial;
- Analisar a dinâmica da pluma do estuário do rio Buranhém na região costeira adjacente, sob marés reais, além de condições extremas de vazões e ventos;
- Identificar a influência da pluma do rio Buranhém sobre áreas atualmente monitoradas para balneabilidade das águas em praias da região e do Parque Municipal do Recife de Fora, sob diferentes condições de vento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho corresponde ao estuário do rio Buranhém, localizado no município de Porto Seguro – Bahia, e pertencente à bacia hidrográfica do rio Buranhém (BHRB). O município de Porto Seguro está localizado no extremo sul do estado da Bahia, na região denominada como Costa do Descobrimento. A leste, está o Oceano Atlântico; ao norte, faz divisa com o município de Santa Cruz Cabrália; ao sul, com Prado; e a oeste, com Itabela, Itamaraju e Eunápolis (NETO, 2012).

De acordo com os dados obtidos no IBGE (2018), o município de Porto Seguro possui uma população estimada de 146.625 pessoas e uma área da ordem de 2.286 km². Contudo, além da população fixa, recebe anualmente uma população flutuante aproximadamente de seis a 10 vezes mais do que a população fixa.

Já a BHRB possui uma área de aproximadamente 2.505 km², e abrange parte do extremo sul do estado da Bahia e leste de Minas Gerais. Suas principais nascentes estão localizadas no município de Santo Antônio do Jacinto, na Serra dos Aimorés, em Minas Gerais. O rio Buranhém, também conhecido como rio do Peixe, percorre cerca de 30,5 km no território mineiro e 215,5 km no território baiano. A BHRB é confrontada a oeste e ao norte com a bacia do rio Jequitinhonha; ao norte, com as bacias do rio João de Tiba e dos Mangues; ao sul, com as bacias dos rios Jucuruçu, Caraíva e dos Frades, e a leste com o Oceano Atlântico (AZEVEDO, 2014).

A BHRB, por abrigar municípios de grande apelo turístico, merece uma maior atenção quanto aos impactos provocados em seus recursos hídricos. Além dos impactos de degradação florestal que a bacia vem sofrendo ao longo dos últimos anos e décadas, devido a substituição da cobertura vegetal por monoculturas e pastagens, o que corresponde a 74,88% de sua área coberta por atividades antrópicas, a bacia vem sofrendo problemas de qualidade da água quanto ao lançamento de resíduos oriundos de esgotos domésticos (AZEVEDO, 2014).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019), consultado através do portal “mapa interativo de outorgas”, há 8 pontos de captação de água e 2 pontos de lançamento de esgoto no rio Buranhém. Dos pontos de captação, 4 estão localizados no município de Porto Seguro, para o uso de irrigação e mineração; e 4 localizados no município de Eunápolis, para o uso de abastecimento humano, mineração e

irrigação. Os 2 pontos de lançamento de efluentes são operados pela Empresa Baiana de Água e Saneamento S/A (EMBASA), localizados nos municípios de Eunápolis e Porto Seguro.

Na Figura 4, ilustra-se a localização da BHRB, com destaque para a região estuarina. A figura ainda apresenta a localização dos 3 pontos onde foram coletados dados de campo e os 4 pontos de saída de resultados modelados e utilizados ao longo deste trabalho para ilustrar os resultados de espalhamento da pluma na zona costeira. Observa-se que, nas regiões próximas ao estuário, destaca-se a presença de tabuleiros costeiros, além de áreas de manguezais e um beachrock ao longo da desembocadura, com função hidrodinâmica que se assemelha a uma barra. Já em sua área de entorno, percebe-se uma ampla urbanização próxima ao estuário.

Os recifes/arenitos localizados na desembocadura do rio tendem a direcionar, durante a maior parte do ciclo de maré, a entrada e saída de água paralelamente à costa, na direção norte/sul. Esse controle de fluxo de água entre o rio e a maré gera uma redução da eficiência hidráulica, com possíveis consequências na qualidade da água em consequência do acúmulo de poluentes nessa região (SILVA, 2016).

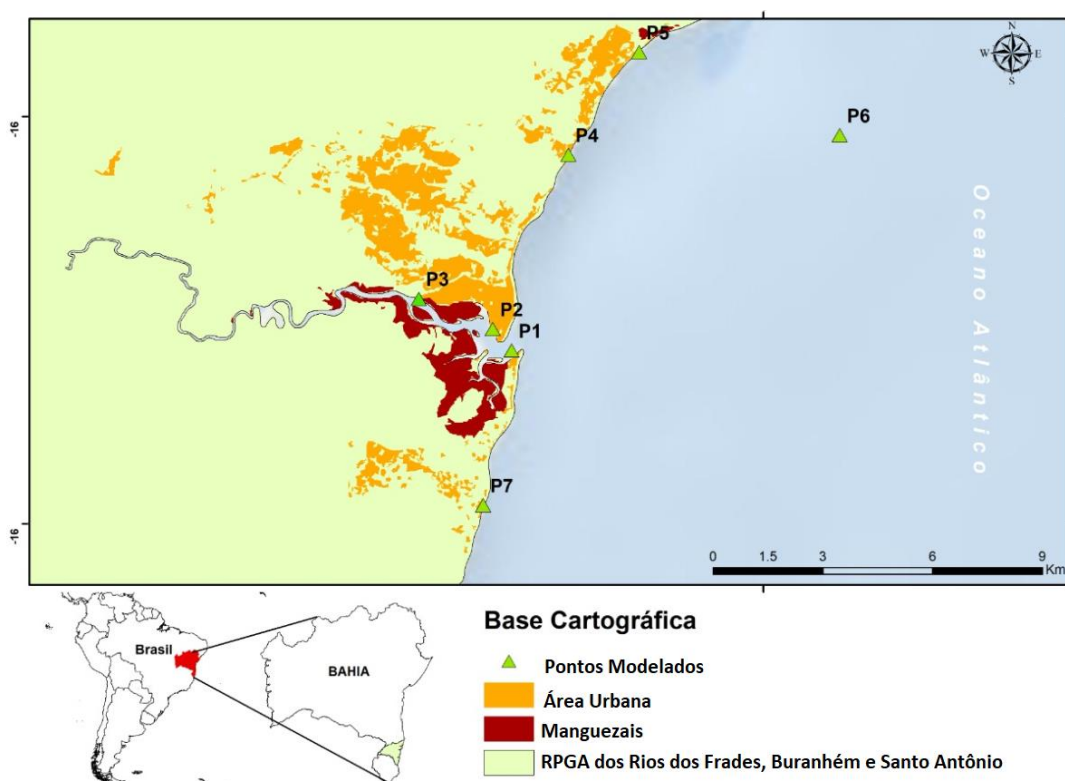


Figura 4 - Localização do estuário do rio Buranhém. P1 (Quinta do Porto), P2 (Marinha) e P3 (Marina Buranhém) - pontos de comparação entre dados de campo e modelados. P4 (praia do Mundaí), P5 (praia de Taperapuã), P6 (Recife de fora) e P7 (praia do Mucugê) - pontos de visualização dos resultados modelados. As isóbatas (linhas de mesma profundidade) não foram consideradas.

No município de Porto Seguro, há duas estações meteorológicas automáticas de superfície: RedeMET (Rede de Meteorológica e Aeronáutica) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A primeira, cujo código indicador de localidade é o SBPS, está localizada na da pista de pousos e decolagens do aeroporto da cidade, nas coordenadas Latitude: 16° 26'19''S e Longitude: 39° 4'51''W. Já a segunda (código: A427), localiza-se a cerca de 28km do centro urbano do município em uma área de vegetação densa, nas coordenadas Latitude: 16.39° S, Longitude: 39.18° W e altitude: 86,36m.

Baseado no estudo desenvolvido por Silva (2016), em que foram comparadas as séries históricas de vento obtidas das duas estações meteorológicas, escolheu-se a estação meteorológica da RedeMET por estar localizada mais próxima ao local de estudo e, por isso, ter uma representatividade melhor e mais realística para ser utilizada nas simulações hidrodinâmicas deste trabalho. Ainda de acordo com esse estudo, ao se analisar os dados de vento de 25/11/2002 a 14/08/2010, observou-se que a região apresenta ventos predominantes de leste com intensidades entre 2 e 6 m/s e calmarias em torno de 5% do período (Figura 5).

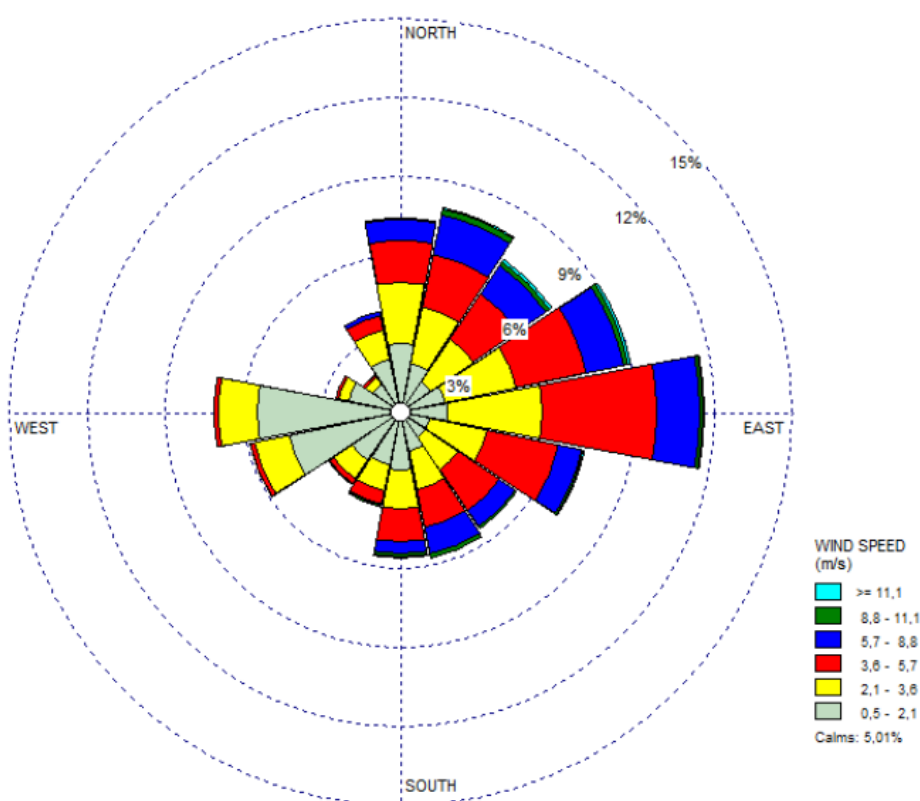


Figura 5- Rosa dos ventos para Porto Seguro com dados obtidos pela RedeMET no período de 25/11/2002 a 14/08/2010. Fonte: Silva (2016).

4.2 Dados de campo

Os dados de campo utilizados neste trabalho foram obtidos através do projeto de pesquisa “Diagnóstico e monitoramento ambiental do estuário do rio Buranhém, Porto Seguro - Bahia”, financiado pelo CNPq.

Inicialmente, foram definidos 3 pontos de comparação entre dados de campo e aqueles modelados: Hotel Quinta do Porto, com estação homônima (P1), Capitania dos Portos, estação “Marinha” (P2) e Condomínio Marina Buranhém, ou estação “Marina” (P3). Os demais pontos (P4 a P7) representam pontos de visualização dos resultados modelados localizados nas praias adjacentes, que foram escolhidos por serem locais onde são realizadas as análises de balneabilidade, além do ponto que representa o Parque Municipal Marinho do Recife de Fora, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 - Identificação dos pontos de comparação entre dados de campo e modelados (P1 a P3). Para os demais pontos (P4 a P7), só é possível a visualização dos resultados modelados.

Pontos de coleta	Nome da estação	Latitude	Longitude
P1	Quinta do Porto	16° 27' 26,9''	39° 3' 42,7''
P2	Marinha	16° 27' 7,8'' S	39° 3' 59,3'' O
P3	Marina	16° 26' 41,1'' S	39° 5' 4,7'' O
P4	Mundaí	16° 24' 33,7'' S	39° 2' 52,4'' O
P5	Taperapuã	16° 23' 2,8'' S	39° 1' 49,6'' O
P6	Recife de fora	16° 24' 16,4'' S	38° 58' 52'' O
P7	Mucugê	16° 29' 43,7'' S	39° 4' 7,7'' O

Os períodos de dados utilizados para as simulações hidrodinâmicas foram divididos em duas campanhas: i) calibração, de 01/08/2015 (maré de sizígia) a 06/08/2015 (maré de quadratura); e ii) validação, de 19/08/2016 (maré de sizígia) a 24/08/2016 (maré de quadratura).

4.3 Modelo Delft3D

O Delft3D, desenvolvido pela empresa DELTARES na Holanda, é um modelo numérico utilizado para ambientes aquáticos, que possui 6 módulos que permitem a interação entre si: FLOW (hidrodinâmico), WAQ (qualidade da água), SEDIMENT (transporte de sedimento), MORSYS (morfodinâmico), WAVE (ondas), ECOLOGY (ecologia) (DELTARES, 2014).

Neste trabalho, utilizou-se o módulo Delft-FLOW para as simulações hidrodinâmicas, em conjunto com os aplicativos RGFGRID para a construção da grade computacional, e o QUICKIN para o tratamento da batimetria. Para o pós-processamento dos dados - ou seja, após a modelagem, na geração dos gráficos, foi utilizado a versão gratuita do Octave.

A Figura 6 apresenta um fluxograma que mostra, de forma resumida, as etapas do processo da modelagem, que é um complemento do estudo de Rocha (2019). Após a definição dos dados de entrada (batimetria, descarga fluvial, dados de vento, maré e condições iniciais) e a realização dos testes de sensibilidade, procedeu-se com a calibração (em 2 e 3 dimensões) e a validação do modelo. No modelo 2D, os ajustes de calibração dos parâmetros físicos foram rugosidade de fundo, viscosidade horizontal e difusividade horizontal. Já no modelo 3D, foram ajustados os parâmetros referentes ao plano vertical: foram testados dois tipos de discretização vertical (σ e Z), espessura das camadas Z , viscosidade e difusividade (ambos verticais). Tanto na calibração como na validação, foram comparados os dados modelados com os dados observados para nível d'água, salinidade de superfície e fundo e velocidade de corrente.

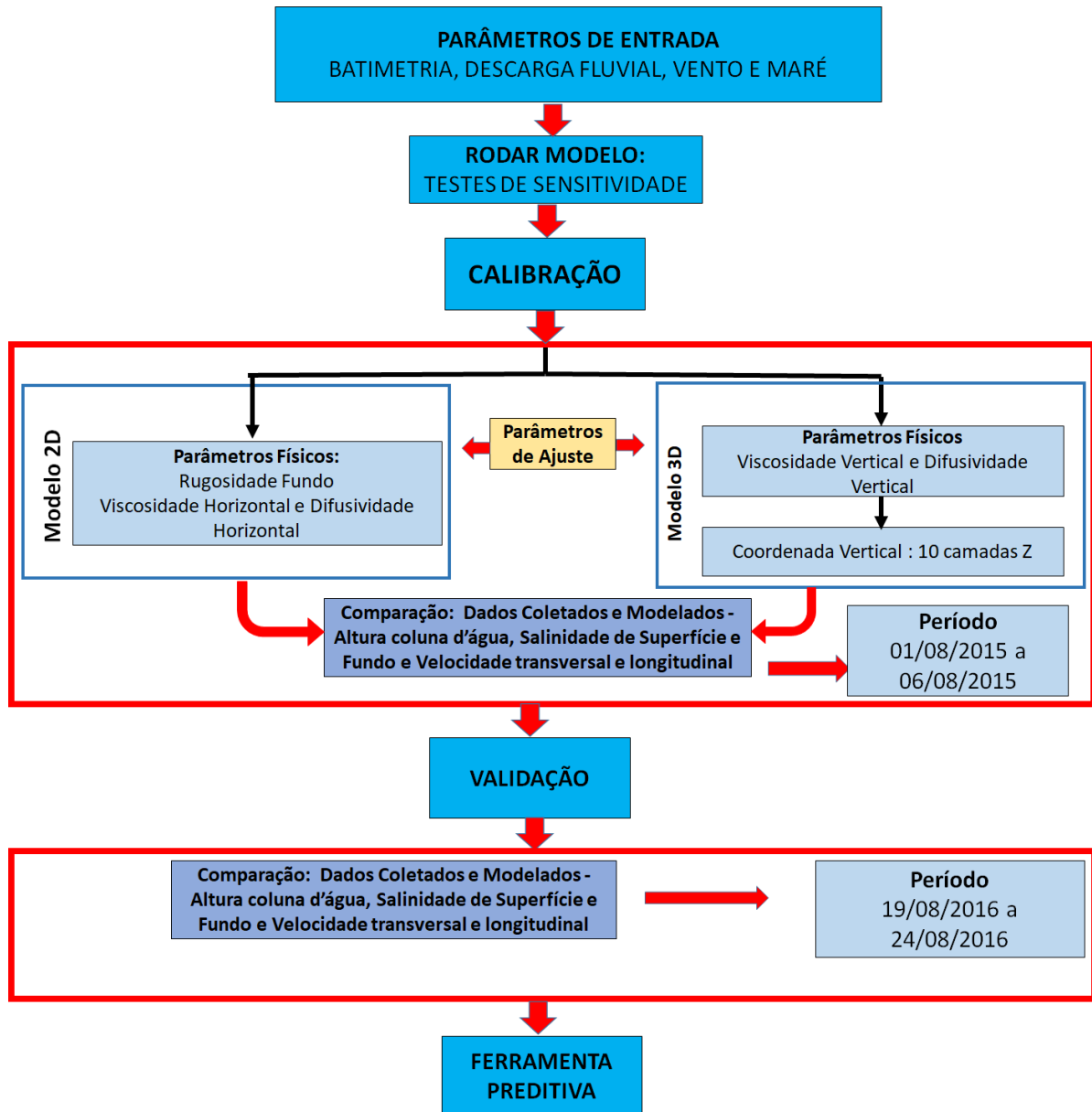


Figura 6 - Etapas do processo de modelagem das simulações hidrodinâmicas.

4.3.1 Modelo Delft3D - Módulo FLOW

O modelo Delft3d – FLOW consiste em um software que resolve as equações hidrodinâmicas do escoamento e do transporte de substâncias em duas e três dimensões, utilizando o método de diferenças finitas (DELTARES, 2014). Este modelo pode ser aplicado para diversas situações, como intrusão salina em estuários, descarga de rios e água doce em baías, estratificação térmica em lagos e marés, transporte de material dissolvido, transporte de poluentes, marés meteorológicas e escoamento de rios (PEREIRA, 2003).

O módulo FLOW resolve as equações de movimento de Navier Stokes, nas direções ξ , η e σ . A Equação 1 representa o movimento horizontal na direção longitudinal, e a Equação 2 o movimento horizontal na direção transversal. A Equação 3, que corresponde a equação de equilíbrio hidrostático, representa o movimento na vertical, enquanto a Equação 4 corresponde a equação da continuidade que simula a conservação de massa, sendo que a componente vertical está reduzida na equação do equilíbrio hidrostático (Equação 3 (DELTA RES, 2014)).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} + \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G\xi\xi}} P\xi + F\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(uv \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M\xi, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} + \frac{u^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} - fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G\xi\xi}} P\xi + F\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(uv \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M\eta, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G\eta\eta}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G\xi\xi}]}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q, \quad (4)$$

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E, Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E, \quad (5)$$

Onde:

- u = velocidade de fluxo na direção ξ (x) (m.s⁻¹)
- v = velocidade de fluxo na direção η (y) (m.s⁻¹)
- ω = velocidade de fluxo na direção z (m.s⁻¹)
- f = parâmetro de Coriolis (s⁻¹)
- ρ_0 = densidade da água (referência) (Kg.m⁻³)
- $P\xi$ = gradiente de pressão hidrostática na direção ξ (x) (kg.m⁻².s⁻²)
- $P\eta$ = gradiente de pressão hidrostática na direção η (y) (kg.m⁻².s⁻²)
- $M\xi$ = fonte ou sorvedouro do momentum na direção ξ (x) (m.s⁻²)
- $M\eta$ = fonte ou sorvedouro do momentum na direção η (y) (m.s⁻²)
- $F\xi$ = fluxo turbulento do momentum na direção ξ (x) (m.s⁻²)

F_{η}	= fluxo turbulento do momentum na direção η (y)	(m.s ⁻²)
U_v	= viscosidade vertical	(m.s ⁻²)
g	= aceleração da gravidade	(m.s ⁻²)
Q = representa a contribuição por unidade de área devido a entrada ou saída de água, precipitação ou evaporação:		
ζ	= nível de água acima de um plano de referência (datum)	(m)
ξ, η	= coordenada horizontal da grade curvilínea	(-)
t	= tempo	(s)
$\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}$	= coeficiente usado para transformar coordenadas curvilíneas para rectangular	(m)
$\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\xi\xi}}$	= coeficiente usado para transformar coordenadas curvilíneas para rectangular	(m)
d	= profundidade abaixo de plano de referência (datum)	(m)
U	= velocidade média na direção ξ (x)	(m.s ⁻¹)
V	= velocidade média na direção η (y)	(m.s ⁻¹)
H	= profundidade total ($H = d + \zeta$)	(m)
q_{in}	= fonte local por unidade de volume	(s ⁻¹)
q_{out}	= sumidouro local por unidade de volume	(s ⁻¹)
E	= evaporação	(m.s ⁻¹)
P	= precipitação	(m.s ⁻¹)

4.3.2 Processamento do Módulo FLOW

O processamento do módulo FLOW consiste, basicamente, em 6 etapas consecutivas e que serão apresentadas detalhadamente a seguir. De forma geral, inicia-se com a criação de uma grade curvilínea ortogonal para a delimitação da área de estudo; obtenção dos dados batimétricos para elaboração do modelo digital; realização de testes de sensibilidade para a definição das condições de contorno, condições iniciais e passo de tempo; inserção dos dados oceanográficos, meteorológicos e descarga fluvial; calibração, e por fim, a validação do modelo. Cumpridas essas etapas com sucesso, o modelo numérico está apto para ser usado como ferramenta preditiva.

Para o processamento do modelo, os parâmetros de entrada são: batimetria do local em estudo, descarga fluvial, intensidade e direção dos ventos, além dos dados de maré. Todos os dados necessários para a modelagem foram obtidos de fontes secundárias (Tabela 2).

Tabela 2– Síntese dos dados de campo utilizados na dissertação.

Identificação do dado		Período Coletado	Ponto Coletado	Equipamento Utilizado	Frequência Amostral
DADOS METEOROLÓGICO	Temperatura do ar	01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16 (12:30 h às 13:30h)	RedeMET	Não se aplica	Horária
	Vento	01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16 (12:30 h às 13:30h)	RedeMET	Não se aplica	Horária
	Vazão	01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16	CPRM/ANA	Curva-Chave	Diária
DADOS HIDROLÓGICOS	Salinidade e Temperatura da Água - Superfície	01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16	P1	DST CT– Marca Star Oddi- número de série S7508	10 min
	Salinidade e Temperatura da Água – Fundo	01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16	P2	CT 267 - Modelo: ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
			P3	CT 269 - Modelo ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
			P1	DST CTD – Marca Star Oddi - número de série S7645	10 min
	Altura da coluna d'água	01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16	P2	CTD 270 - Modelo ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
			P3	CTD 268 -Modelo ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
			P1	DST CTD – Marca Star Oddi - número de série S7645	10 min
	Velocidade	01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16	P2	ADP - Marca: Nortek Aquadopp Profiler e frequência: 1 MHz	30 min
			P3	ADP - Marca: Nortek Aquadopp Profiler e frequência: 1 MHz	30 min
		01/08/15-06/08/15 19/08/16-24/08/16	P2	ADP - Marca: Nortek Aquadopp Profiler e frequência: 2 MHz	30 min

4.3.3 Grade Delft3D

Para a delimitação da área de estudo no modelo, utilizou-se o módulo RGFGRID do Delft3D na elaboração da malha numérica. Com o objetivo de permitir uma melhor representação das curvas e contornos do rio e do estuário, a resolução das células variou de acordo com as áreas de maior e menor interesse do estudo, a fim de diminuir o número de células e, conseqüentemente, reduzir o tempo computacional. De acordo com Pereira (2003), para a construção da grade, é necessário satisfazer as duas restrições de natureza numérica:

- As linhas da grade devem interceptar-se o mais ortogonalmente possível, a fim de permitir um código computacional mais eficiente para resolução das equações, com o máximo de estabilidade computacional;
- O espaçamento da grade deverá variar suavemente sobre a região modelada.

A confecção da malha numérica foi realizada por Rocha (2019), em que considerou a região de maior detalhamento (ou resolução) a que abrange o domínio fluvial até a foz do estuário, enquanto a de menor resolução foi a área marinha (Figura 7). A grade cobre uma extensão de aproximadamente 20,5km na região do rio até a foz do estuário (com tamanho de células variando de 30 a 300m); e 370km², na fronteira oceânica (com células entre 80 a 1.300m). A fim de minimizar instabilidades numéricas, precisou-se realizar alguns ajustes na malha, especialmente em pontos na região fluvial em relação à malha utilizada por Rocha (2019).

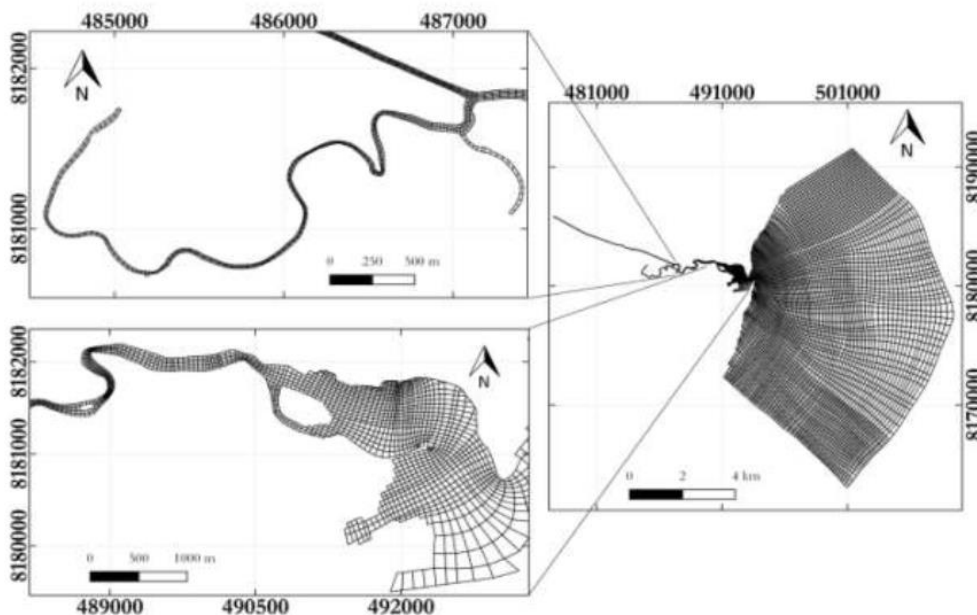


Figura 7- Grade numérica utilizada neste estudo, com destaque para a região do rio e do estuário. Fonte: Adaptado de Rocha (2019).

O Delft3D-FLOW oferece suporte a dois tipos de sistemas de coordenadas na horizontal: cartesiano (com coordenadas em metros) e esférico (com coordenadas em graus decimais). Normalmente, a utilização do sistema de coordenadas esféricas é adotada para situações em que se deseja trabalhar com grandes áreas, como, por exemplo, para estudos em escala regional/global (DELTARES, 2019).

Para a definição da grade na discretização do domínio, adotou-se o sistema de coordenadas cartesianas com as seguintes configurações:

- Dimensões da grade: 136.956 nós divididos em 678 células na direção M (longitudinais) e 202 na direção N (transversais);
- Latitude da área do modelo: 16º S, em que se considera que a força de Coriolis é constante para toda a área;
- Orientação: 0, que corresponde ao ângulo entre o Norte verdadeiro e a direção y;
- Número de camadas: 10, com as seguintes espessuras 2, 3, 5, 7, 12, 18, 26, 16, 7 e 4%. Houve tentativas de utilização de número superior de camadas, mas por problemas de instabilidade nas simulações, tal abordagem não foi viável dentro do cronograma desta dissertação.

4.3.4 Batimetria

Assim como na elaboração da grade numérica, a construção da batimetria do modelo foi realizada por Rocha (2019), o qual utilizou o módulo QUICKIN pertencente ao modelo Delft3D. Os dados de profundidade do oceano adjacente foram obtidos por meio da carta Náutica Nº 1204, disponibilizada pelo Centro de Hidrografia da Marinha, enquanto os dados batimétricos da foz do estuário até o domínio fluvial foram adquiridos a partir de 2 campanhas batimétricas realizadas no período de 19/08/2016 a 22/08/2016. As profundidades utilizadas para a confecção do modelo digital foram: 3,8m (P1); 2,1m (P2); 2,7m (P3); com profundidade máxima de 5m na zona estuarina e de aproximadamente 23m na costa (Figura 8).

4.3.5 Testes de Sensitividade

Na plataforma do modelo DELFT3D-FLOW, para definição dos parâmetros físicos, há várias guias que estão relacionadas às propriedades físicas da área a ser modelada. As abas “Constantes”, “Rugosidade” e “Viscosidade” são necessárias a todo tipo de processo e, por

isso, estão sempre visíveis. As demais guias (modelo de fluxo de calor, sedimento, morfologia, vento e marés) deverão ser ativadas pelo usuário para tornarem-se visíveis.

Para a definição das condições iniciais, condições de contorno e passo de tempo, foram necessários alguns testes de sensibilidade. Na Tabela 3, apresenta-se a sistematização dos parâmetros físicos adotados bem como a definição das variáveis utilizadas.

Tabela 3 - Sistematização dos parâmetros físicos e definição das variáveis utilizadas.

Passo de Tempo		12 segundos					
Condições Iniciais - Valores Uniformes	Nível de Água (m)	Salinidade (ppt)		Temperatura (°C)			
	0	31		23			
Condições de Contorno	Limites						
	“Oc1”, “Oc2”, “Oc3”	37		26			
	Limite “Rio”	0		24			
Parâmetros Físicos	Aceleração da gravidade (m.s ⁻²).	Massa específica da água (kg.m ⁻³).	Densidade do ar (kg/m ³)	Coeficiente de arrasto do Vento			
				Pontos	A	B	C
	9.81	1.024	1.0	Coeficientes de arrasto do vento	0.00063	0.00723	0.00723
				Coeficientes da Velocidade do Vento(m/s)	0	100	100

As condições de contorno do modelo são definidas por 4 limites abertos: em 3 (“Oc1”, “Oc2” e “Oc3”) inseridos na região do oceano, os quais são forçados pela maré astronômica e 1 limite (“Rio”), que corresponde à vazão fluvial do rio Buranhém. A Figura 8-A apresenta, de forma ampla, a representação dos 4 limites utilizados no modelo; os pontos com destaque na área do estuário/rio (Figura 8-B); e recorte da região da praia do Apaga Fogo, onde se visualiza a existência de um pequeno canal conectando o estuário do rio Buranhém à zona costeira adjacente, ao sul do beachrock existente na desembocadura (Figura 8-C). Nos 3

limites abertos do oceano, adotou-se como tipo de força oito constantes harmônicas de maré, conforme Tabela 5.

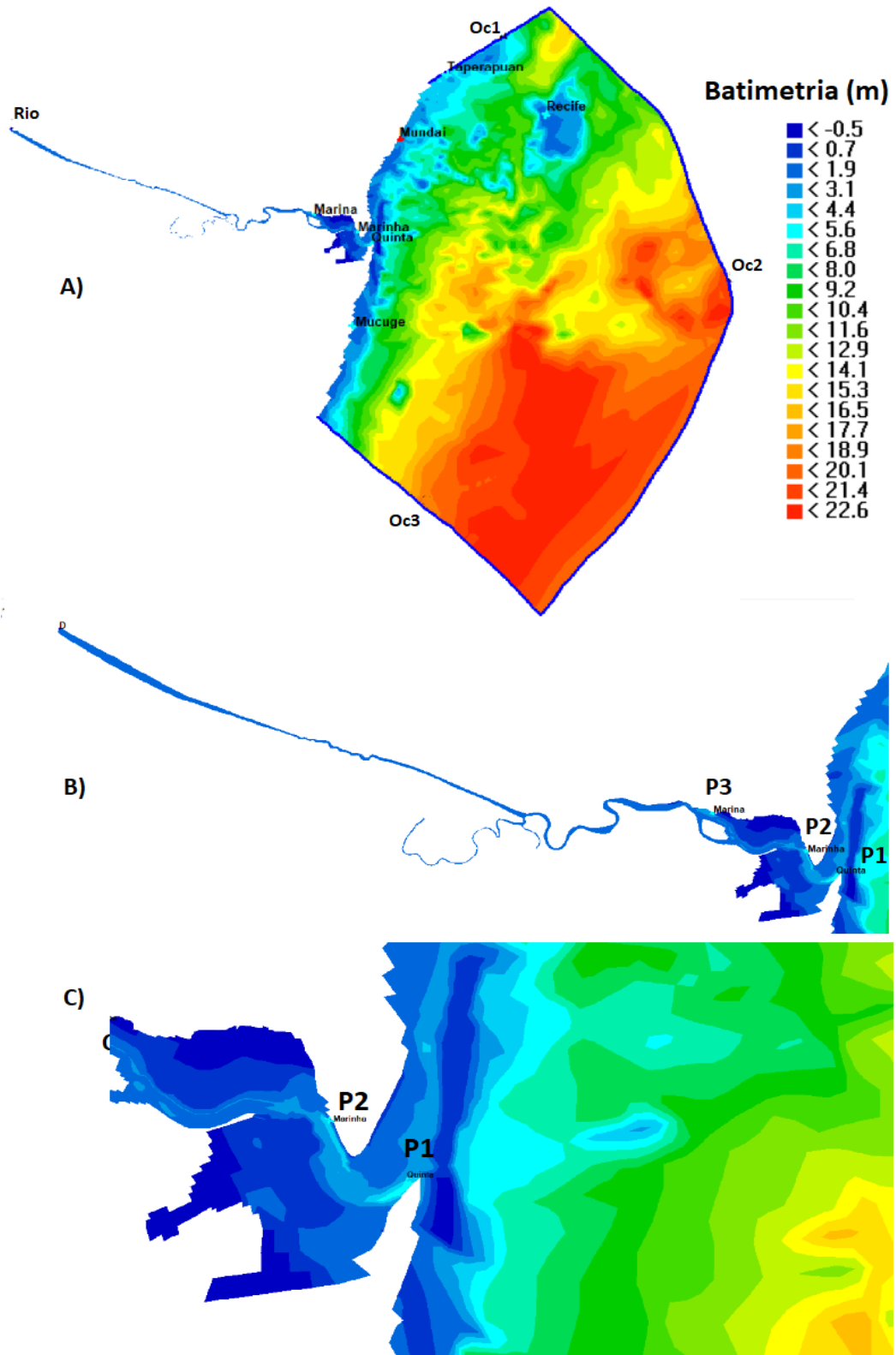


Figura 8 - Representação dos limites do oceano adjacente (“Oc1”, “Oc2” e “Oc3”) e local de prescrição da vazão do rio Buranhém (“Rio”). Em A), tem-se o domínio de forma ampla, com a indicação dos 7 pontos utilizados para análise dos resultados; B), a representação dos pontos

utilizados para comparar dados de campo e modelados, com destaque na área do estuário/rio; e em C), recorte da região da praia do Apaga Fogo, ilustrado por tons de azul claro e esverdeado.

Tabela 4 - Constantes harmônicas de maré na estação 40154, Latitude 16° 27'2''S, Longitude 39° 39'W, analisados no período de 30/05/1999 a 30/06/1999, com nível médio de 1,08m.

Fonte: BNDO (1999).

NOME	Velocidade de Fase (graus/horas)	Amplitude (m)	Fase (graus)
O₁	13,94	0,05	114,62
P₁	14,95	0,01	182,55
K₁	15,04	0,04	188,06
N₂	28,43	0,10	113,65
M₂	28,98	0,65	112,00
L₂	29,52	0,02	84,77
S₂	30	0,25	128,60
K₂	30,08	0,06	129,94

4.4 Dados meteorológicos

No modelo, o efeito do vento pode ser simulado através de duas formas: vento constante (dependente do tempo, mas uniforme no espaço); e vento e pressão variável (variável no espaço e no tempo). Para o vento constante, o qual foi considerado neste trabalho, deverá ser especificada a série temporal em (dd mm aaaa mm ss), a velocidade do vento (m/s) e sua direção (graus). A direção do vento é medida no sentido horário (definição náutica) a partir do norte verdadeiro (DELTARES, 2014).

Para a consideração do efeito atmosférico no comportamento hidrodinâmico da área de estudo, os dados de velocidade e direção do vento foram obtidos através da estação meteorológica RedeMET, localizada no aeroporto da cidade de Porto Seguro (Figura 9).

As intensidades da velocidade do vento registrada pela RedeMET para o período de calibração variaram de 0 a 8,24 m/s, tendo a média de 2,97 m/s e desvio padrão de 1,26m/s (Figura 09). Já para o período de validação, as intensidades da velocidade do vento foram entre 1,03 a 9,78 m/s, com média de 3,26 m/s e desvio padrão de 1,75 m/s (Figura 10).

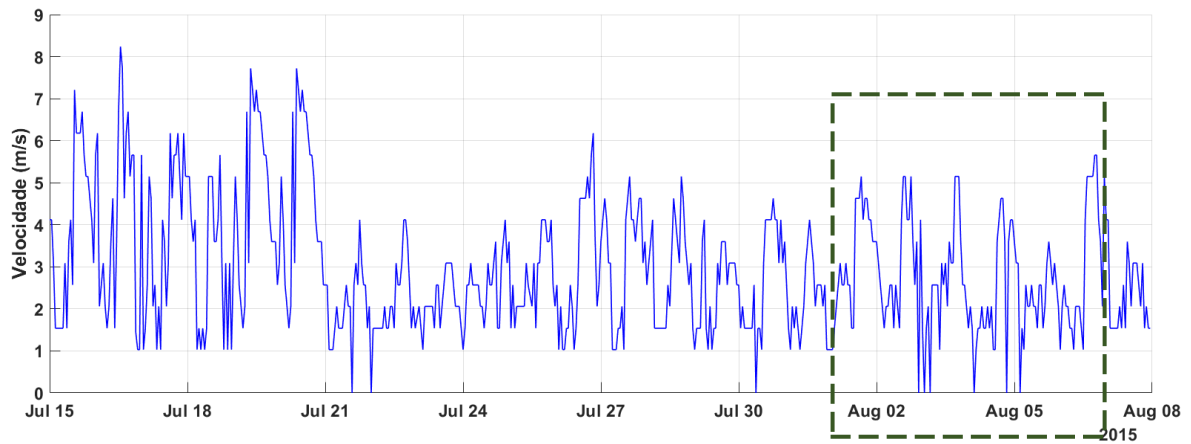


Figura 9 - Série histórica da intensidade de velocidade do vento (m/s) utilizada para o período de calibração. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.

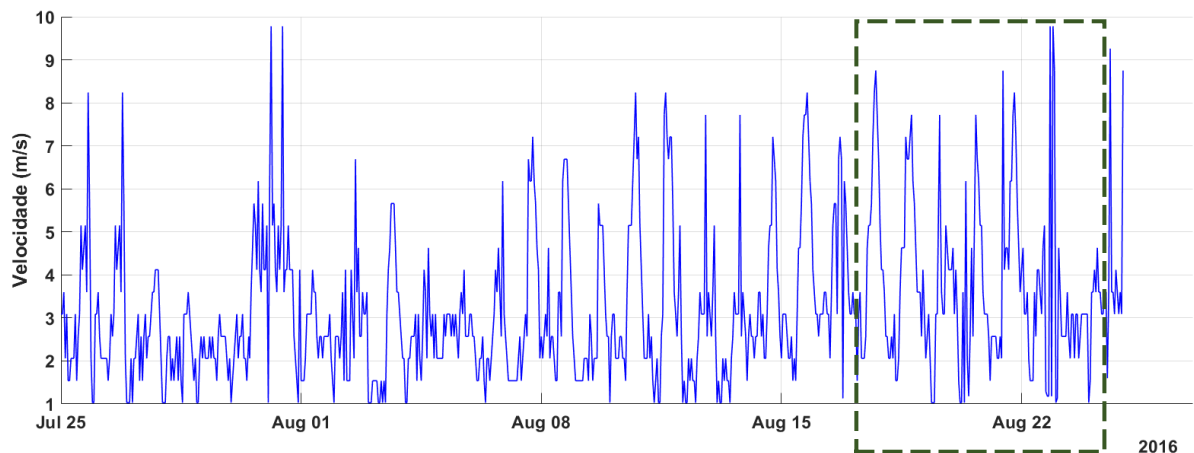


Figura 10 - Série histórica da intensidade de velocidade do vento (m/s) utilizada para o período de validação. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.

As Figuras 11 e 12 apresentam as rosas do vento para o período de calibração e validação, respectivamente. Ao analisar a Figura 11, observa-se que há uma predominância de vento sudeste, com intensidade maiores entre 2 e 6 m/s e relevância em torno de 10 a 15%. Nota-se também uma pequena componente do vento sudoeste com intensidades menores (de 2 a 4m/s).

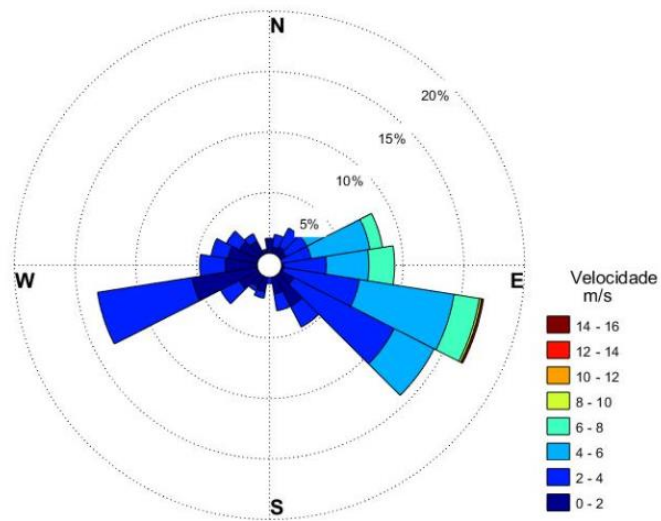


Figura 11 - Rosa dos ventos para o período de calibração (01/08/2015 a 06/08/2015).

Já no período de validação (Figura 12), o vento se comportou de forma diferente. Há uma predominância de vento nordeste com maiores intensidades (valores entre 2 a 8m/s, chegando a rajadas de até 10m/s), enquanto nota-se uma pequena parcela do vento sudoeste com ventos menos intensos (velocidade de 0 a 4m/s). Pode-se dizer que a circulação do vento ocorre tipicamente em regime de brisa, onde durante o dia a massa de ar sopra do mar para o continente (vento de nordeste) e à noite há uma inversão, soprando do continente para o mar (vento de oeste/sudoeste).

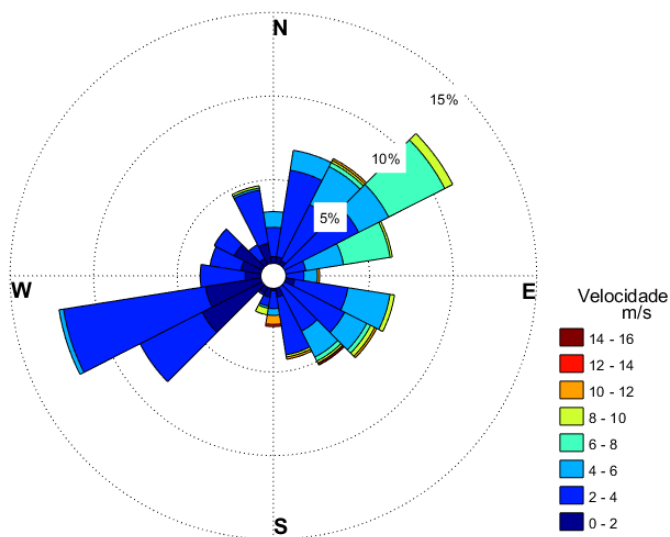


Figura 12- Rosa dos ventos para o período de validação (19/08/2016 a 24/08/2016).

4.5 Dados de descargas fluviais

Os dados de vazão foram sistematizados a partir do banco de dados da ANA – portal HidroWeb, obtidos através da estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (Código: 55170000, latitude: 16° 25' 30" S e longitude 39° 21' 12" O, sob responsabilidade da CPRM), a montante da região de estudo.

As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, as séries históricas de vazão média diária utilizada para o período de calibração e validação. Na calibração, a vazão variou de 11.81 a 24.31 m³/s, com vazão média de 14.95m³/s. A variação da vazão para o período de validação foi de 2.69 a 10.21 m³/s, apresentando vazão média de 4.85m³/s.

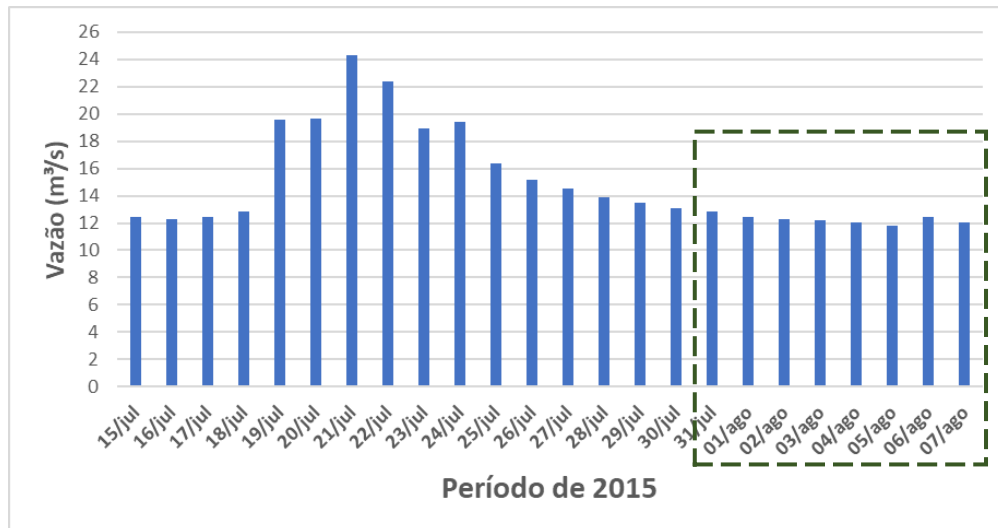


Figura 13 - Série histórica da vazão média diária utilizada para o período de calibração. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.

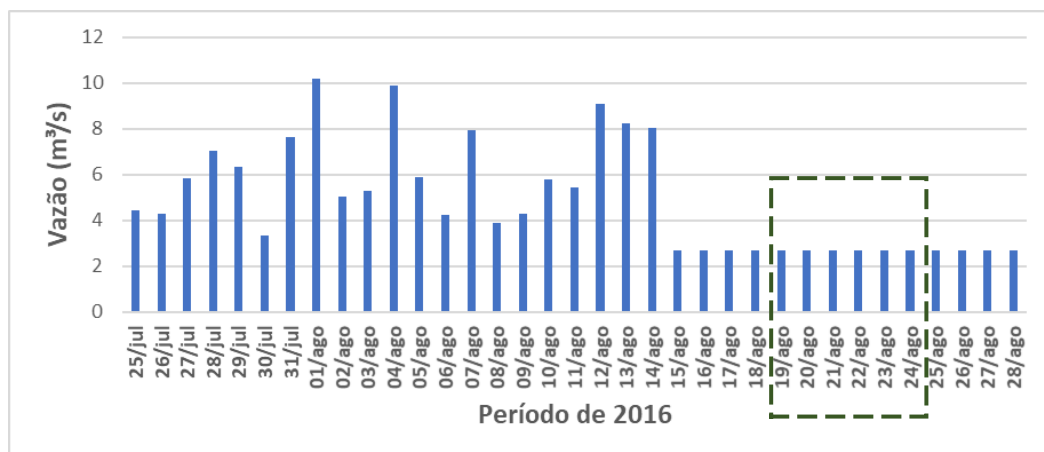


Figura 14 - Série histórica da vazão média diária utilizada para o período de validação. A área tracejada corresponde ao período de interesse usado para a comparação dos resultados. Os demais dias representam o período de aquecimento do modelo.

4.6 Período de Simulação

Os períodos utilizados para a realização das simulações hidrodinâmicas foram de 24 dias para a etapa da calibração (15/07/2015 a 07/08/2015) e 34 dias para a validação (25/07/2016 a 28/08/2016). Tanto na calibração como na validação, considerou-se um período inicial de aquecimento de 19 e 29 dias, respectivamente. Para que a modelagem pudesse rodar adequadamente, foi necessário ajustar os dados de entrada das séries históricas de vazão e vento. No ano de 2015, registraram-se, em alguns meses, vazões acima da média mensal, o qual o modelo não conseguia em razão do baixo número de elementos na malha no trecho fluvial, o que gerava instabilidades no modelo. Como a existência desses picos elevados de vazão estava dentro do período de aquecimento do modelo, considerou-se um valor constante de vazão para esse período, assumindo-se a vazão média do período utilizado efetivamente para a comparação das variáveis. Para a série histórica de vento, precisou-se corrigir as falhas por meio da interpolação dos dados.

4.7 Calibração do Modelo

No processo de calibração, os ajustes dos parâmetros do modelo foram realizados em duas e três dimensões (2D e 3D). Os parâmetros físicos de rugosidade de fundo, viscosidade horizontal e difusividade horizontal foram utilizados no modelo 2D. Já no 3D, utilizou-se como ajuste os parâmetros referentes ao plano vertical: sistema de coordenadas (sigma e Z), espessura das camadas, viscosidade e difusividade.

No subgrupo de dados do modelo 2D, a rugosidade poderá ser tanto a de fundo quanto a das paredes laterais. Para o cálculo da rugosidade de fundo, o modelo oferece 4 fórmulas (Chézy, Manning, White-Colebrook e Z0), para as quais podem ser especificados diferentes coeficientes, seja através da definição de um valor uniforme em cada direção (longitudinal e transversal) ou com variação de espaço nas direções u e v. Nesses casos, os valores devem ser importados de um arquivo de atributo. Na rugosidade de fundo, há opções como: condição de deslizamento, as opções livre, parcial e nula.

A rugosidade de fundo adotada neste trabalho corresponde ao coeficiente de Chézy definido por Rocha (2019), que utilizou o valor constante de $m^{1/2}.s^{-1}$ nas direções “u” e “v”. Por considerar o atrito constante, espera-se ter ocorrido uma limitação no desempenho do modelo por não parametrizar de forma adequada o escoamento nas áreas de manguezais no

domínio da malha. A condição de parametrização de rugosidade da margem adotada foi a de escorregamento livre, por se tratar de uma simulação hidrodinâmica relativamente em grande escala (DELTARES, 2019).

No modelo bidimensional e tridimensional, todos os valores de viscosidade e difusividade (horizontal e vertical) que apresentaram uma melhor concordância dos parâmetros estatísticos estão especificados na Tabela 6.

Na direção vertical do modelo 3D, o Delft3D-FLOW oferece dois tipos de grades que possuem características distintas de espessura de camada: Coordenadas Z (a espessura da camada é fixa e o número de camadas varia com a profundidade), e Sigma (a espessura da camada varia com a profundidade e o número de camadas é constante). Os melhores resultados quantitativos ocorreram com o sistema de coordenada Z, com 10 números de camadas com as seguintes espessuras 2, 3, 5, 7, 12, 18, 26, 16, 7 e 4%. Tentativas com mais de 10 camadas foram realizadas, porém resultaram em erros que inviabilizaram a conclusão das simulações.

Tabela 5 - Definição dos parâmetros de ajuste realizados no modelo 2D e 3D para o período de calibração.

CALIBRAÇÃO			
MODELO 2D (Horizontal)		MODELO 3D (Vertical)	
Rugosidade de Fundo: Chézy ($m^{1/2}.s^{-1}$)	56	Viscosidade ($m^2.s^{-1}$)	0,005
Viscosidade ($m^2.s^{-1}$)	0,005	Difusividade ($m^2.s^{-1}$)	0,005
Difusividade ($m^2.s^{-1}$)	0,005	Modelo de fechamento de turbulência	K - Epsilon
		Sistema de Coordenadas	Z
		Espessura das camadas	Variável (2,3,5,7,12, 18,26,16,7 e 4)

Após a realização desta primeira etapa, que corresponde a estimação dos valores em ambos os modelos (2D e 3D), o período de calibração estendeu-se de 01/08/2015 a 06/08/2015. Os dados modelados foram comparados aos observados de nível d'água (P1 e P2), salinidade de superfície e fundo (P1 e P2) e velocidade longitudinal (P2). Os demais pontos não foram utilizados devido à inexistência de dados de campo.

4.8 Validação do Modelo

O modelo foi validado com dados coletados em campanha realizada de 19 a 24/08/2016, utilizando-se os mesmos parâmetros definidos na calibração, exceto os dados de vazão e de vento. Semelhante à calibração, porém com um período de coleta diferente, foram validados os dados de nível de água em P2 e P3; velocidade transversal e longitudinal, P2; e salinidade de superfície e de fundo, P1, P2 e P3. Vale ressaltar ainda que no P1 há dados observados somente para a salinidade. Tanto na calibração como na validação, os dados de velocidade foram perdidos no P1.

4.9 Avaliação Estatística do Modelo

A avaliação quantitativa dos resultados obtidos na calibração e validação ocorreu por meio da utilização de dois métodos estatísticos: o Erro Médio Quadrático (ou Root Mean Square Error - RMSE) representado pela Equação 06; e o parâmetro Skill proposto por Willmott et al. (1985) e aprimorado por Warner et al. (2005) (Equação 07), cujo valor varia de 0 a 1 (resultado ideal). Ambos são utilizados para quantificar a precisão dos dados modelados em relação aos observados. A Tabela 6 apresenta a classificação dos parâmetros estatísticos.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum |x_{\text{modelo}} - x_{\text{obs}}|^2}{N}} \quad (06)$$

Onde: X é a variável de interesse, e N o número total de dados.

$$\text{SKILL} = \frac{1 - \frac{\sum |x_{\text{modelo}} - x_{\text{obs}}|^2}{\sum (|x_{\text{modelo}} - \bar{x}_{\text{obs}}| + |x_{\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}}|)^2}}{1 - \frac{\sum |x_{\text{modelo}} - \bar{x}_{\text{obs}}|^2}{\sum (|x_{\text{modelo}} - \bar{x}_{\text{obs}}| + |x_{\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}}|)^2}} \quad (07)$$

Onde: X é a variável de interesse, e \bar{X} é a média temporal.

Tabela 6 - Classificação dos parâmetros estatísticos Skill (ALLEN et al., 2007) e RMSE (WILLIAMS and ESTEVES, 2017).

Skill						
Classificação	Excelente	Muito bom	Bom		Pobres	
Intervalo	>0,65	0,65 a 0,50	0,50 a 0,20		< 0,20	
RMSE						
Variável	Nível de Água (m)	Salinidade	Velocidade(m/s)			
Classificação	Valores Satisfatórios		Muito bom	Bom	Moderados	Pobres
Intervalo	0 a 0,10 – na foz 0 a 0,30 – na montante.	< 0,38	< 0,05	< 0,10	< 0,20	>0,30

4.10 Pluma

Com o objetivo de buscar melhor entender o comportamento da pluma e dos possíveis materiais carreados por ela às praias da região, realizou-se análises de séries temporais de todos os pontos definidos na Tabela 2, incluindo, além dos três pontos utilizados nas etapas de calibração e validação (P1, P2 e P3), Recife de fora (P6), e três pontos nas praias do Mundaí (P4), Taperapuã (P5) e Mucugê (P7). Foram escolhidos estes pontos por serem os locais onde são realizadas as análises de balneabilidade pelo INEMA, órgão ambiental estadual.

O período utilizado para a realização da análise de séries temporais e espaciais foi do dia 15/07/2015 a 07/08/2015. Na etapa da modelagem hidrodinâmica, permaneceram as mesmas configurações adotadas nas etapas anteriores (calibração e validação), modificando-se apenas os dados de entrada das séries históricas de vazão e vento, que foram considerados idealizados. Para a série de dados de vazão, adotou-se um valor inicial de 10 m³/s, aumentando 5m³/s gradativamente até o dia 27/07/2015, o qual permaneceu com o valor constante de 75m³/s até o final do período, que por sua vez corresponde a aproximadamente três vezes a vazão média mensal (SILVA, 2016). Esse incremento na vazão, de 5 em 5 m³/s foi adotado com o objetivo de evitar instabilidades numéricas durante as simulações.

A fim de se compreender a influência dos diferentes cenários de ventos no comportamento da pluma, foram simuladas 4 situações: sem vento, vento Nordeste, vento Sudeste e vento Sul. Assim como para as vazões, adotaram-se valores de intensidades de ventos idealizados, com uma série crescente de 0 a 10m/s até o dia 25/07/2015, quando a intensidade do vento foi mantida constante até o final do período de simulação, isso ocorreu para as situações de ventos de NE, SE e S.

4.11 Decomposição de Velocidade

Para a decomposição da velocidade, que ocorreu por meio do cálculo das componentes longitudinal e transversal, precisou-se ajustar os dados de velocidade de corrente de acordo com o sistema de coordenadas, os quais foi considerado a declinação magnética local e a orientação do estuário, conforme Equação 08 (MIRANDA et al., 2002).

$$\Theta = 90^\circ - (dd \pm D) \pm y \quad (08)$$

Onde:

Θ = ângulo ajustado [°];

dd = direção da velocidade medido pelo ADP [°];

D = declinação magnética local [°];

y = ângulo entre o eixo transversal do estuário e o norte verdadeiro [°] (Figura 15)

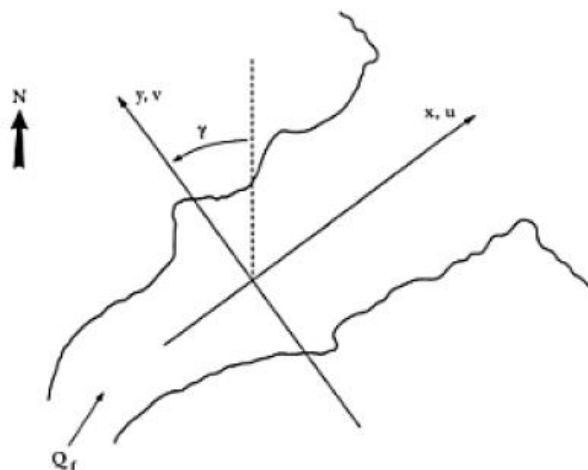


Figura 15 - Decomposição do vetor velocidade em componentes longitudinal (u) e transversal (v) e a representação do ângulo entre o eixo longitudinal do estuário e o norte verdadeiro (y).

Fonte: MIRANDA et al., (2002).

A obtenção do ângulo ajustado seguiu a definição adotada por Silva (2016), que considerou a declinação magnética local (D) o valor de 24° 30' O (-24,50°) para o ano de 2015. Assim como, adotou-se para o Ponto 2 (Marinha), o ângulo entre o eixo transversal do estuário e o norte verdadeiro de +58° (Equação 9).

$$\Theta = 90^\circ - (dd - 24,5^\circ) + 58^\circ \quad (09)$$

Por meio do ajuste do ângulo, a velocidade foi decomposta nas componentes longitudinal e transversal, utilizando as relações trigonométricas conforme apresenta Equação 10 e 11, respectivamente. Valores positivos indicam correntes do estuário em direção ao mar (vazante), enquanto valores negativos representam comportamento inverso: correntes do mar em direção ao estuário (enchente).

$$u = V \cdot \cos \Theta \quad (10)$$

$$v = V \cdot \sin \Theta \quad (11)$$

Onde:

u = velocidade longitudinal (m.s⁻¹);

v = velocidade transversal (m.s⁻¹);

V = módulo da velocidade (m.s⁻¹);

Θ = ângulo ajustado.

5. RESULTADOS

Apesar de inúmeras tentativas de testes com a discretização das camadas Z, alterações e testes com parâmetros do Delft3D, como “Ztop” e “Zbottom”, simulações com mais de 10 camadas apresentavam instabilidade e não eram concluídas na íntegra. Para tentar sanar esse problema, buscou-se a literatura e outras fontes, mas não houve sucesso na superação desses problemas. O uso de 10 camadas Z viabilizou que as simulações fossem concluídas com sucesso, mas, mesmo nesses casos, em geral os resultados modelados foram disponibilizados quase que ao longo de toda a simulação para as camadas 9 e 10. De acordo com o manual do Delft3D, tais camadas na discretização em Z correspondem às camadas mais superficiais. Portanto, nos resultados a seguir, espera-se desde já que os resultados modelados correspondam ao comportamento superficial exclusivamente, o que certamente impede que o modelo tenha sido capaz de reproduzir a estratificação vertical de propriedades, como a salinidade.

5.1 Calibração

A calibração foi realizada entre o período 01/08/2015 a 06/08/2015. Nesta etapa, compararam-se os dados modelados com os dados observados de nível d’água (P1 e P2), salinidade de superfície e fundo (P1 e P2), e velocidade longitudinal (P2). Vale ressaltar ainda que os demais pontos não foram utilizados devido à inexistência de dados de campo. A concordância dos resultados ocorreu por meio da análise qualitativa (método gráfico) e análise quantitativa (parâmetros estatísticos Skill e RMSE). A Tabela 8 apresenta a comparação entre os resultados quantitativos alcançados neste estudo e aqueles de Rocha (2019).

5.1.1 Nível

- **P1 (Quinta do Porto)**

Para o P1, os dados observados apresentaram variação do nível de água de -1,10 a 1,11m, com amplitude máxima de 2,10m (maré de sizígia), enquanto os dados modelados variaram de - 1,08 a 1,05m e amplitude máxima de 2,13m. Tanto na análise gráfica quanto na

estatística, os resultados apresentaram um excelente desempenho. De modo geral, tanto a amplitude de maré como sua fase foram bem representadas. Contudo, o modelo não foi capaz de reproduzir as condições extremas de nível, seja nas marés altas ou baixas (Figura 16). Os parâmetros estatísticos exibiram uma “excelente” concordância, com valores de Skill de 0,99 e RMSE de 0,07.

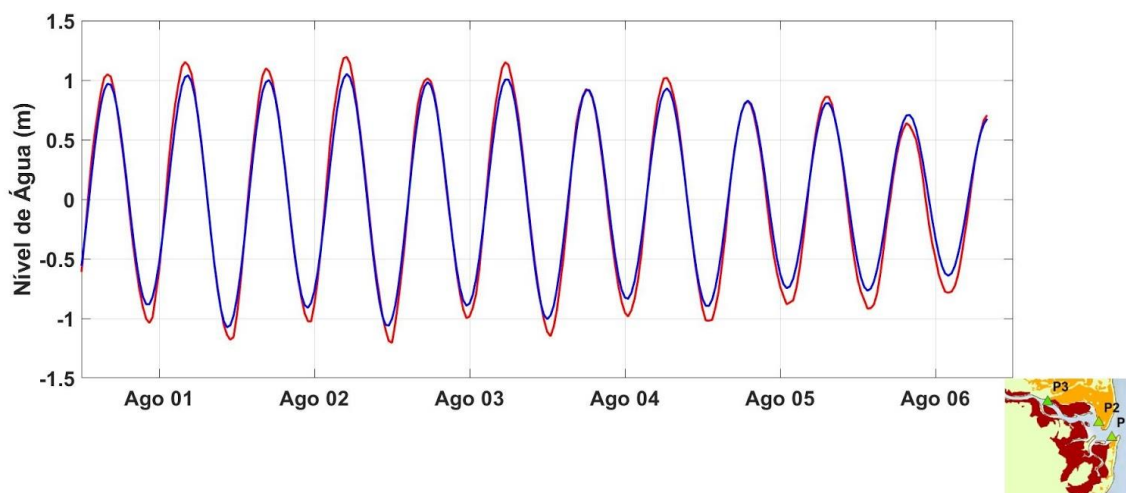


Figura 16– Série temporal de nível de água referente ao P1 para o período de 01/08/2015 a 06/08/2015. Dados observados em vermelho e modelados em azul.

- **P2 (Marinha)**

Na Figura 17, tem-se a comparação dos resultados observados e modelados para o P2. Os dados observados apresentaram valores entre -1,0 a 1,0m e variação máxima de 2,0m (maré de sizígia), enquanto nos dados modelados houve uma variação entre os valores de -1,06 a 1,06m com máxima de 2,10m.

De forma geral, observa-se um comportamento semelhante ao P1, com exceção que neste houve um melhor desempenho gráfico. Mais uma vez, tanto a fase como a amplitude de maré foram bem representados na maior parte do período. Os parâmetros estatísticos também apresentaram uma excelente concordância, com valores de Skill de 0,99 e RMSE de 0,11.

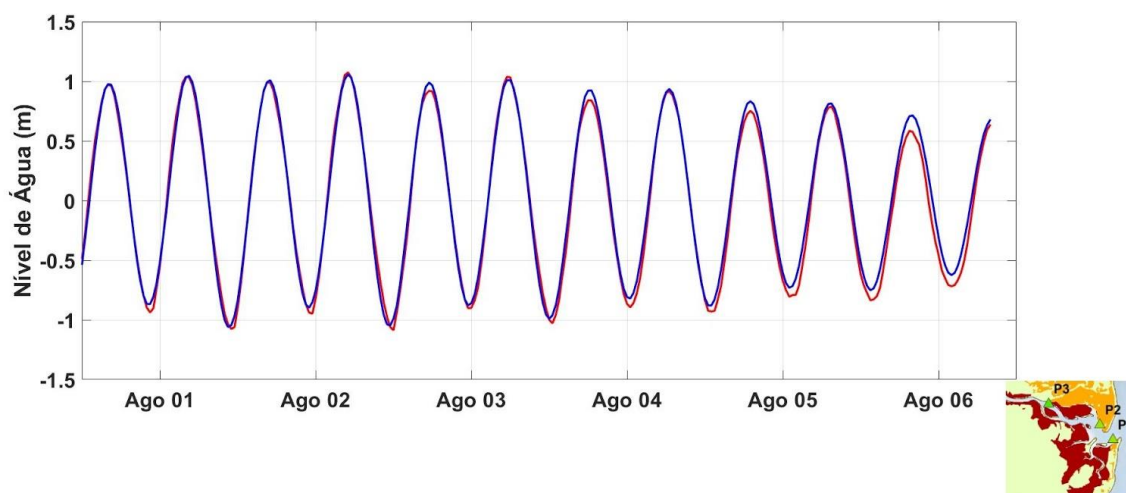


Figura 17 - Série temporal de nível de água referente ao P2 para o período de 01/08/2015 a 06/08/2015. Dados observados em vermelho e modelados em azul.

5.1.2 Salinidade

• P1 (Quinta do Porto)

Na Figura 18-A, tem-se a comparação dos dados de salinidade de superfície para o P1. Os dados observados apresentaram resultados de salinidade variando entre 5,41 a 36,15 - com média de 23,45, enquanto os dados modelados apresentaram uma média de 26,67 com mínimo de 12,25 e máximo de 34,36.

Na análise gráfica, o modelo não consegue acompanhar os menores valores de salinidade observada, principalmente na maré de quadratura (de 04 a 06 de agosto). Mesmo havendo essa diferença gráfica, o que pode ser confirmado através do alto valor do RMSE (9,19), o parâmetro Skill apresentou uma “excelente” concordância, com valor de 0,86. As limitações da batimetria na zona do estuário e a adoção do atrito constante no espaço e no tempo, entre outros fatores, podem ter interferido nas diferenças observadas.

Para a salinidade de fundo (Figura 18-B), os dados observados apresentaram valores entre 8,77 a 36,48 - com média de 25,69, enquanto os dados modelados apresentaram uma média de 27,05 com mínimo de 12,37 e máximo de 34,51. Ao comparar graficamente com a salinidade de superfície, observa-se que nesta, embora ainda haja uma subestimação dos dados observados, o modelo já consegue reproduzir melhor os valores de salinidade nas baixa-mares. Os parâmetros estatísticos também apresentaram uma melhora ao se comparar a salinidade de superfície observada e modelada, com valores de Skill de 0,90 e RMSE de 6,68.

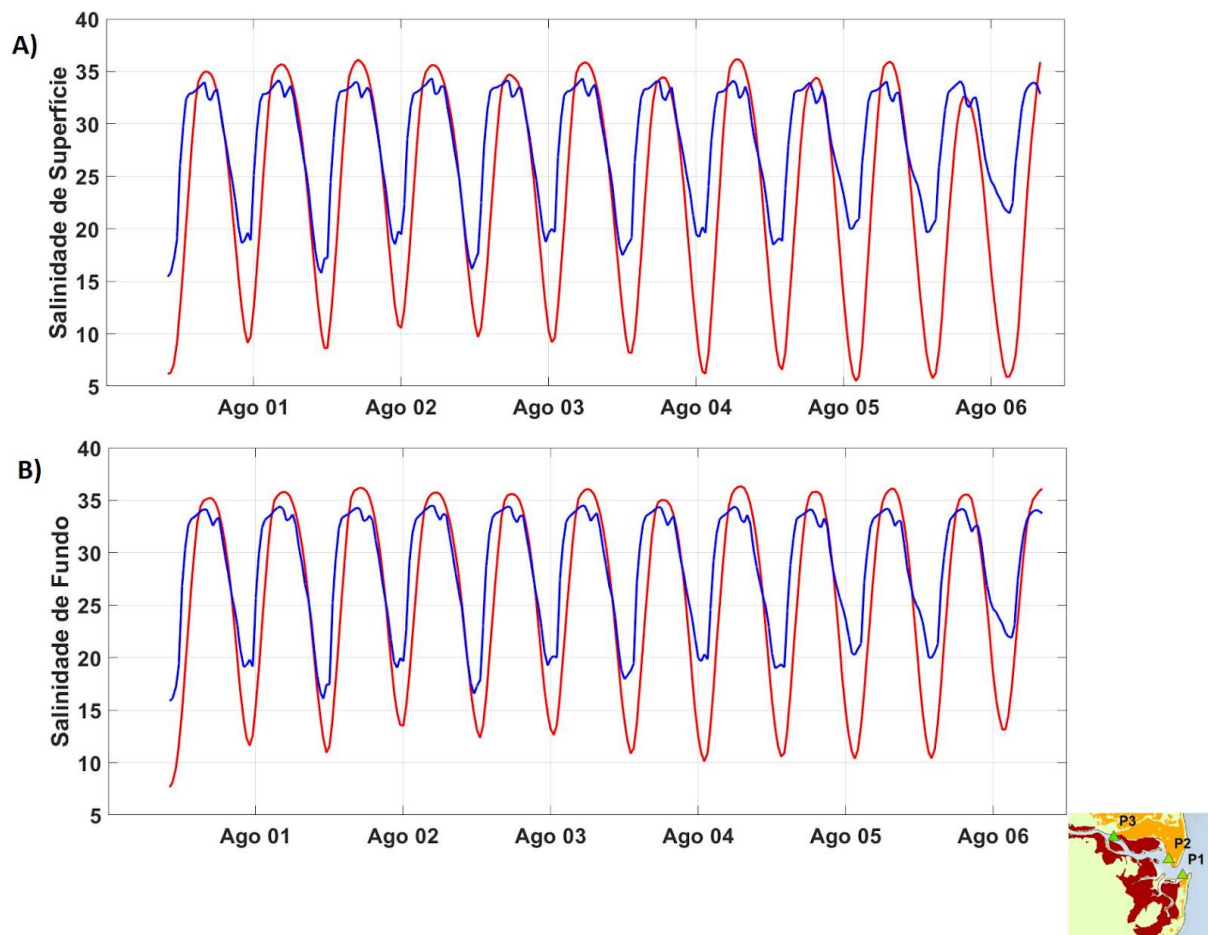


Figura 18 - Série temporal de salinidade (A - superfície e B - fundo) no P1 durante o período de calibração. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.

- **P2 (Marinha)**

A Figura 19 apresenta a calibração da salinidade referente ao P2. Os dados observados da superfície apresentaram salinidade média de 20,39, variando de 1,69 (mínimo) a 35,80 (máximo), enquanto no modelado os resultados da superfície apresentaram salinidade média de 16,77, com mínimo de 0,12 e máximo de 31,86. Ao analisar a Figura 19-A, observa-se que nas amplitudes máxima (maré de enchente) o modelo subestimou os dados de campo, enquanto nas amplitudes mínima (maré vazante) houve uma superestimação, exceto para o período de quadratura (04 a 06 de agosto). Os parâmetros estatísticos apresentaram uma concordância entre os dados com valores de Skill de 0,95 e RMSE de 5,74.

Na salinidade do fundo (Figura 19 - B), os dados observados apresentaram salinidade média de 21,87, variando de 0,99 (mínimo) a 36,06 (máximo). Já os dados modelados

apresentaram salinidade média de 16,94, variando de 0,13 (mínimo) a 31,89 (máximo). Tanto o gráfico quanto os parâmetros estatísticos se comportaram de forma similar aos analisados na salinidade de superfície, com valores de Skill de 0,94 e RMSE de 6,08.

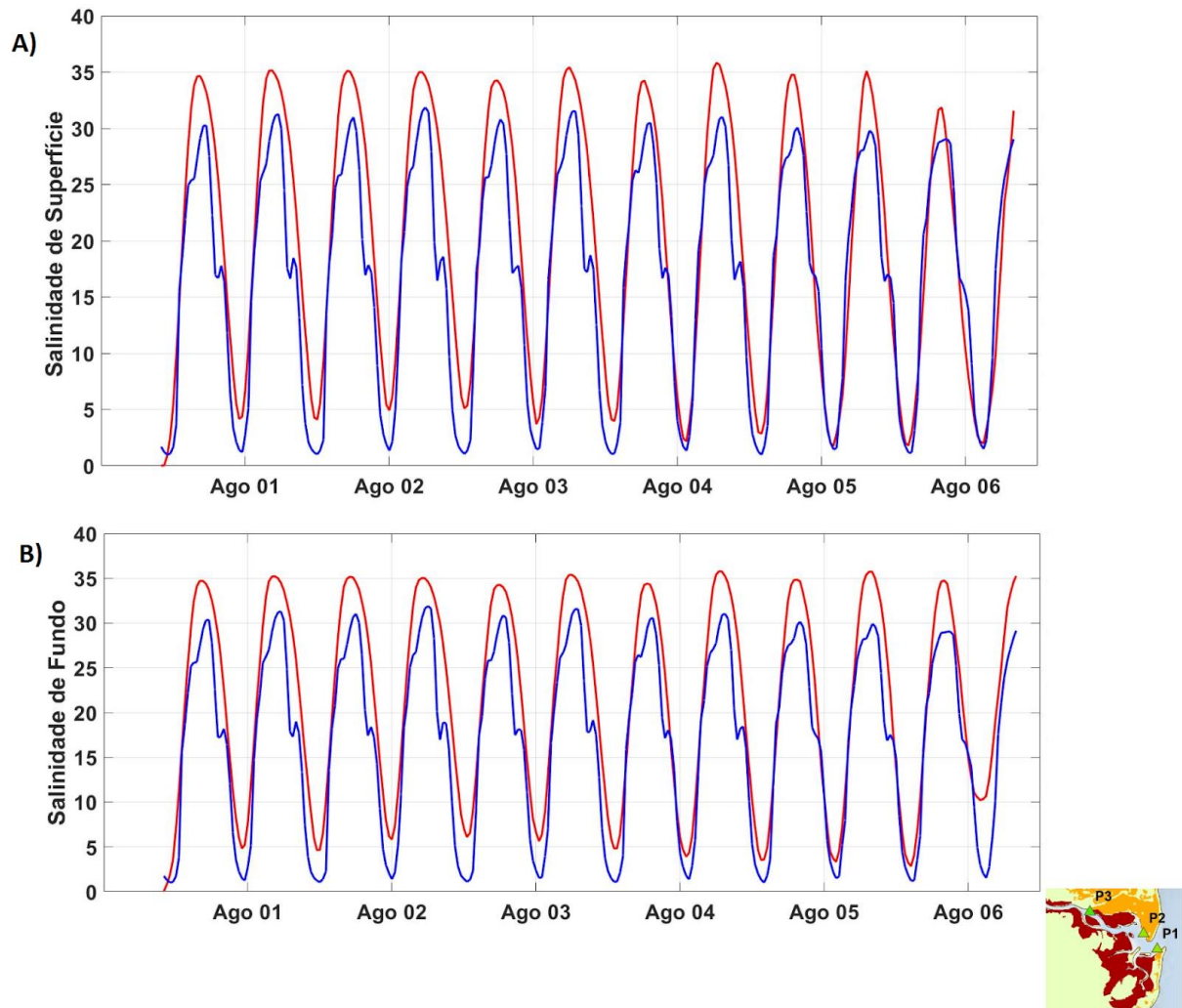


Figura 19 - Série temporal de salinidade (A - superfície e B - fundo) no P2 durante o período de calibração. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.

5.1.3 Velocidade Longitudinal

- **P2 (Marinha)**

Para a velocidade longitudinal, os dados observados e modelados foram comparados no P2 (Figura 20). Os dados observados apresentaram valores entre $-0,43\text{m/s}$ na enchente a $0,87\text{m/s}$ na vazante, com uma média da coluna de água de $0,14\text{m/s}$ na vazante. Por outro lado,

os dados modelados exibiram valores entre $-0,26\text{m/s}$ na enchente e $0,23\text{m/s}$ na vazante, com uma média da coluna de água de $0,01\text{m/s}$ na vazante. Os parâmetros estatísticos apresentaram uma concordância entre os dados com valores de Skill de $0,80$ e RMSE de $0,21$.

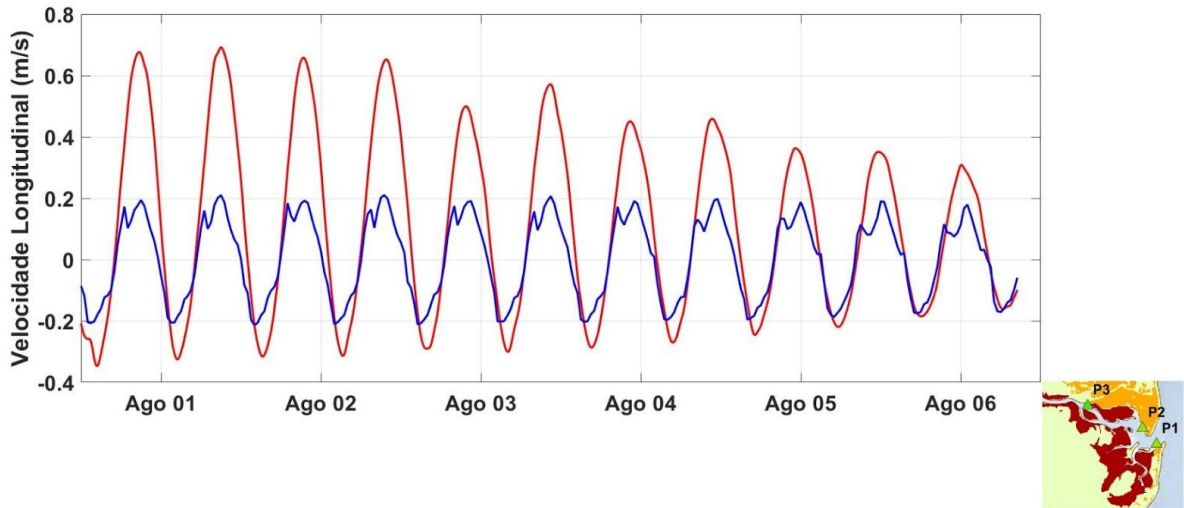


Figura 20 - Série temporal da velocidade longitudinal (m/s) do P2 durante o período de calibração. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.

Na análise da Figura 20, observa-se que o modelo subestima os dados de campo especialmente nas correntes de enchentes. Este fato pode ser decorrente de uma prescrição de valores de vazão adotado no modelo muito acima da vazão real, uma vez que estes dados de vazão foram baseados no método indireto da curva-chave. Eventualmente, desde que devidamente calibrada e validada, a modelagem numérica pode ser utilizada nesses contextos para correções das vazões fluviais estimadas indiretamente.

A Tabela 7 apresenta a comparação entre os resultados quantitativos alcançados por Rocha (2019), que corresponde às simulações sem inclusão do vento e adoção da camada sigma, em relação aos obtidos nesta dissertação, com a inclusão do vento e camadas Z.

Tabela 7 Comparação dos parâmetros estatísticos para o período de calibração obtidos por Rocha (2019), que corresponde às simulações sem a inclusão do vento e adoção da camada sigma, em comparação aos resultados obtidos nesta dissertação, com a inclusão do vento e adoção da camada Z. Os valores destacados em vermelho referem-se aos resultados que apresentaram piores valores para cada caso.

Parâmetro Estatístico		Nível de Água		Salinidade				Velocidade Longitudinal
				Superfície	Fundo	Superfície	Fundo	
		P1	P2	P1		P2		P2
Rocha (2019)	Skill	0,99	0,98	0,94	0,93	0,93	0,90	0,95
	RMSE	0,11	0,13	3,95	3,90	5,03	6,51	0,16
Este estudo	Skill	0,99	0,99	0,86	0,90	0,95	0,94	0,80
	RMSE	0,07	0,11	9,19	6,68	5,74	6,08	0,21

Ao comparar os resultados entre as duas situações, tanto no P1 como no P2, observa-se que a inclusão do vento quase não teve interferência no nível de água, os quais apresentaram um comportamento estatístico semelhante. Com isso, durante a calibração, ainda que o P1 seja o mais próximo ao mar, o efeito do vento local parece ter sido desprezível em razão da possível proteção do estuário pelo relevo da região, assim como pela presença do beachrock nas proximidades, limitando possíveis “empilhamentos” de água na região. Além disso, a presença dos tabuleiros costeiros nas margens do vale do rio Buranhém, assim como a presença dos manguezais na porção estuarina, também funciona como barreiras que reduzem o efeito do vento diretamente sobre a hidrodinâmica local.

Na comparação entre os resultados de salinidade de superfície e fundo do P1, nota-se que, neste estudo, houve uma redução do parâmetro estatístico Skill e um aumento do valor do RMSE, o que pode estar associado devido ao arrasto do vento na superfície da camada de água. Já no P2, os resultados de salinidade mostraram que o parâmetro estatístico Skill apresentou uma melhora, enquanto o RMSE, a melhora foi apenas na salinidade de fundo. Tendo em vista que só há disponibilidade contínua de dados modelados nas camadas 9 e 10,

que representam as camadas mais superficiais para camadas Z, esperava-se que a melhora deste parâmetro pudesse ocorrer na salinidade de superfície e não de fundo, uma vez que esta não foi reproduzida pelo modelo Delft3D, conforme configurado para a região.

Com relação a velocidade longitudinal, para este estudo, o valor do parâmetro estatístico Skill apresentou uma redução e um aumento do RMSE. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato do P2 estar localizado a montante do estuário e, por isso, ter apresentado uma maior influência da vazão fluvial do que o próprio efeito do vento. Além disso, outros fatores como limitações batimétricas e morfológicas adotadas no modelo, podem ter influenciado na qualidade dos resultados.

Ao analisar os parâmetros quantitativos de forma geral observa-se, com exceção dos resultados para a salinidade de superfície e fundo do P2, nos demais casos, Skill e RMSE indicaram juntos que houve piora/melhora nos resultados, o que reforça a coerência de comportamento entre essas ferramentas estatísticas.

5.2 Validação

A validação foi realizada entre o período 19/08/2016 a 24/08/2016. Nesta etapa, foram comparados os dados modelados com os dados observados de nível d'água (P2 e P3), salinidade de superfície e fundo (P1, P2 e P3), e velocidade longitudinal e transversal (P2). Os demais pontos não foram utilizados devido à inexistência de dados de campo. A concordância dos resultados também ocorreu por meio da análise qualitativa (método gráfico) e quantitativa (parâmetros estatísticos Skill e RMSE). A comparação entre os resultados quantitativos alcançados neste estudo e aqueles de Rocha (2019) é apresentada na Tabela 9.

5.2.1 Nível

- **P2 (Marinha)**

A comparação entre os resultados observados e modelados para os dados de nível de água pode ser observada através da Figura 21. Os dados de campo apresentaram variação do nível de água de -1,08 a 1,23m, com amplitude máxima de 2,31m (maré de sizígia), enquanto os dados modelados, os valores variaram de - 1,07 a 1,06m e amplitude máxima de 2,13m.

Tanto na análise gráfica quanto na estatística, os resultados apresentaram um excelente desempenho.

Ao avaliar o gráfico da Figura 21, observa-se que nos primeiros dias, os picos de maré alta não foram atingidos pelo modelo, enquanto na segunda metade do período o modelo superestimou os níveis durante as marés altas e não conseguiu reproduzir os níveis de baixamar. Os parâmetros estatísticos exibiram uma excelente concordância, com valores de Skill de 0,99 e RMSE de 0,12.

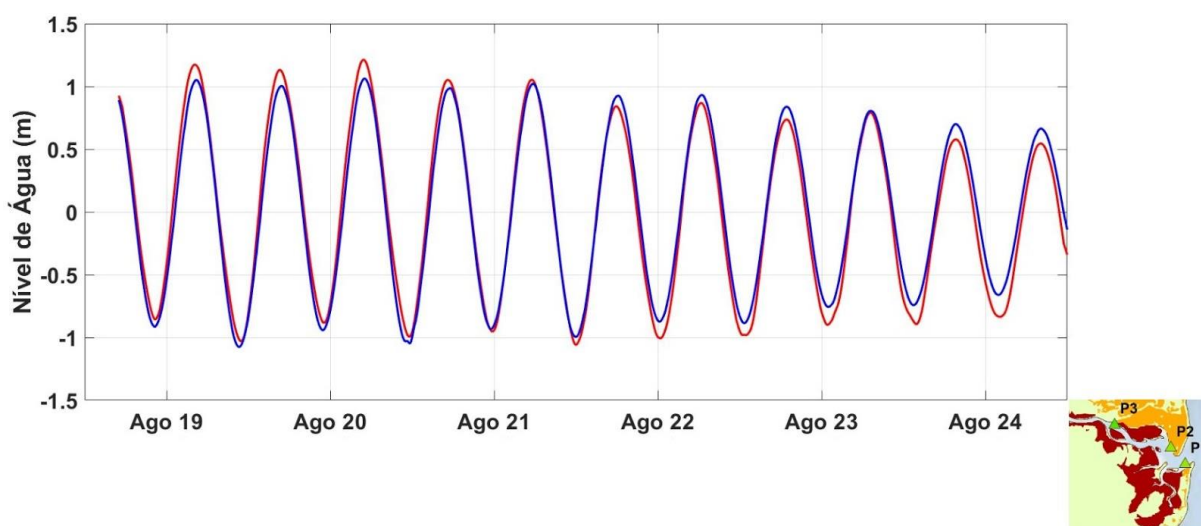


Figura 21- Série temporal de nível de água referente ao P2 para o período de 19/08/2016 a 24/08/2016. Dados observados em vermelho e modelados em azul.

- **P3 (Marina Buranhém)**

Na Figura 22, tem-se a comparação dos resultados observados e modelados para o P3. Os dados observados apresentaram valores entre -1,02 a 1,01 m e variação máxima de 2,03m (maré de sizígia), enquanto nos dados modelados houve uma variação entre os valores de -0,83 a 1,07m com máxima de 1,90m.

De forma geral, observa-se um comportamento diferente com relação ao P2. Sobretudo nas preamars, os dados modelados superestimaram os dados de campo em praticamente todo o período. Já nas marés baixas, os dados modelados conseguem acompanhar os dados de campo no início e ao final do período, com exceção do dia 21/08 até o dia 23/08, quando os dados modelados superestimam tanto nos momentos de marés baixas como altas. Os parâmetros estatísticos também apresentaram uma “excelente” concordância, de acordo com a Tabela 7, com valores de Skill de 0,99 e RMSE de 0,10.

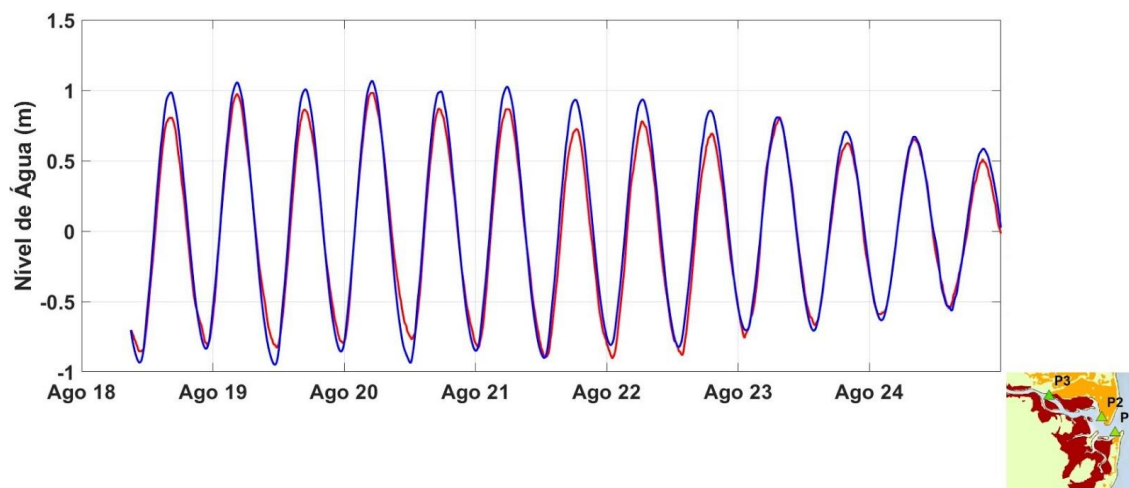


Figura 22 - Série temporal de nível de água referente ao P3 para o período de 19/08/2016 a 24/08/2016. Dados observados em vermelho e modelados em azul.

5.2.2 Salinidade

- **P1 (Quinta do Porto)**

Na Figura 23-A, tem-se a comparação dos dados de salinidade de superfície para o P1. Os dados observados apresentaram resultados de salinidade variando entre 16,66 e 37,28 e média de 30,75, enquanto os dados modelados variaram de 20,72 a 36,67 e média de 31,66.

Na análise gráfica, as maiores diferenças ocorrem nas marés baixas, quando o modelo não consegue reproduzir os menores valores de salinidade observada, principalmente na maré de quadratura (de 23 a 24 de agosto). Mesmo havendo essa discordância gráfica, o que pode ser confirmado através do alto valor do RMSE (4,69), o parâmetro Skill apresentou uma “excelente” concordância, de acordo com a Tabela 7, com valor de 0,71.

Para a salinidade de fundo (Figura 23 -B), os dados observados apresentaram valores entre 17,34 a 37,21 (média 31,42), enquanto os dados modelados variaram de 20,87 a 36,68, com média de 31,84. Ao comparar graficamente com a salinidade de superfície, observa-se um comportamento similar, em que há uma subestimação dos dados modelados nas baixamares. Os parâmetros estatísticos também apresentaram uma melhora, com valores de Skill de 0,76 e RMSE de 3,90. Na Figura 23 – C, observa-se uma considerável estratificação vertical de sal nos dados observados, principalmente no início do período da maré de quadratura e que infelizmente não é reproduzida pelo modelo mesmo com a adoção de camadas Z neste trabalho. Em Rocha (2019), a estratificação vertical de sal também não foi

modelada adequadamente, ainda que com a adoção de camadas sigma, enquanto neste trabalho as limitações apresentadas no início deste capítulo detalham as dificuldades na simulação das propriedades modeladas nas camadas de fundo.

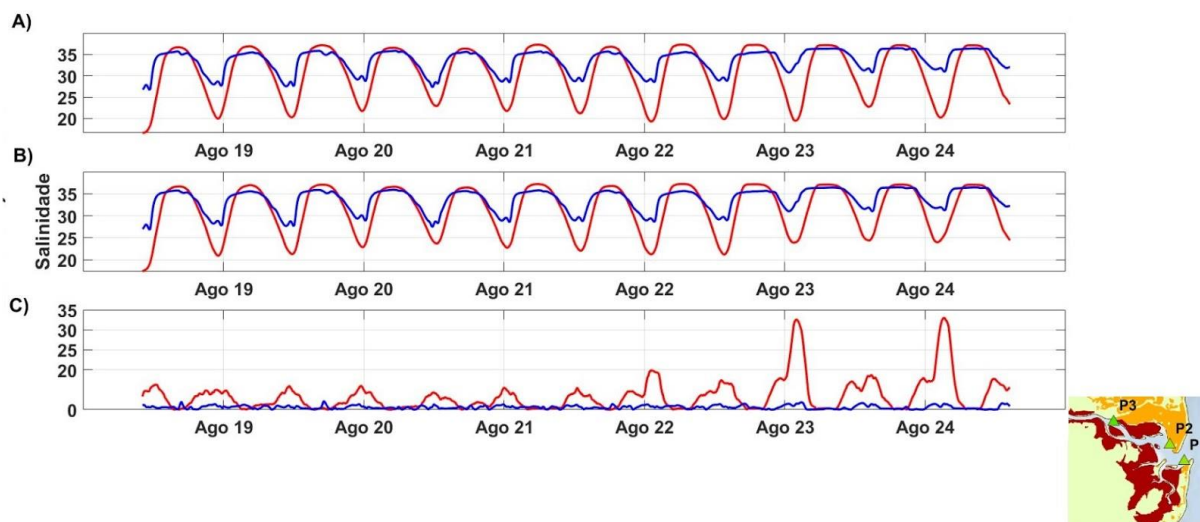


Figura 23 - Série temporal de salinidade (A – superfície, B – fundo e C – diferença entre fundo e superfície) no P1 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.

Ao se analisar a salinidade de superfície do P1 (Figura 23 - A), observa-se que o modelo subestima os valores especialmente no fim das marés vazantes, baixamares e início das marés enchentes e baixas. Porém, com a inclusão do vento, há uma maior diferença sendo notada na maré vazante, principalmente no período de quadratura, o que pode estar associada devido ao arrasto do vento na superfície da camada de água.

Na salinidade de fundo (Figura 23 – B), nota-se também uma diferença nas amplitudes mínimas, sendo observada com mais intensidade no final do período (maré de quadratura). Por outro lado, ao analisar a estratificação vertical de sal (Figura 23 – C), pode-se observar uma diferença considerável, o que provavelmente pode estar relacionado à mudança na discretização vertical (de camadas sigma pra Z).

- **P2 (Marinha)**

A Figura 24 apresenta a validação da salinidade da coluna d'água referente ao P2. Os dados observados da superfície apresentaram salinidade média de 28,50, variando de 12,69 (mínimo) a 36,86 (máximo), enquanto no modelado os resultados da superfície apresentaram salinidade média de 25,35, com mínimo de 1,85 e máximo de 35,89.

Ao se analisar a salinidade de superfície (Figura 24 – A), observa-se que durante as marés cheias, o modelo subestimou os dados de campo durante todo período, enquanto nas baixamares, nos 3 primeiros dias, o modelo reproduziu os dados observados até serem subestimados novamente ao final do período. Os parâmetros estatísticos apresentaram uma ótima concordância entre os dados, com valores de Skill de 0,90 e RMSE de 3,73.

Na salinidade do fundo (Figura 24 -B), os dados observados apresentaram valores entre 14,06 (mínimo) a 37 (máximo), com salinidade média de 28,31. Já os dados modelados os valores foram entre 1,91 (mínimo) a 35,91 (máximo) e média de 25,48. Tanto o gráfico quanto os parâmetros estatísticos se comportaram de forma similar aos analisados na salinidade de superfície, com exceção que na salinidade de fundo houve uma melhora durante o período de quadratura (em termos gráficos) e uma melhor concordância dos parâmetros estatísticos, os quais apresentaram valores de Skill de 0,92 e RMSE de 3,10.

Com relação à diferença entre as salinidades de superfície e fundo (Figura 24 -C), observa-se que o modelo não consegue representar a estratificação de sal que ocorre nesse ponto, enquanto nos dados observados nota a existência de 4 picos no final do período (maré de quadratura). Ainda que se tenha adotado a discretização vertical com camadas Z, das 10 camadas parametrizadas, o modelo só gerou resultados contínuos durante a simulação para duas delas, próximas à superfície. Como tais camadas são próximas entre si, além de estarem próximas às condições de superfície, não se espera de fato que haja uma estratificação vertical de sal significativa entre elas. Vale ressaltar que vários testes para a obtenção de resultados em todas as camadas foram realizados, porém em nenhum deles houve sucesso.

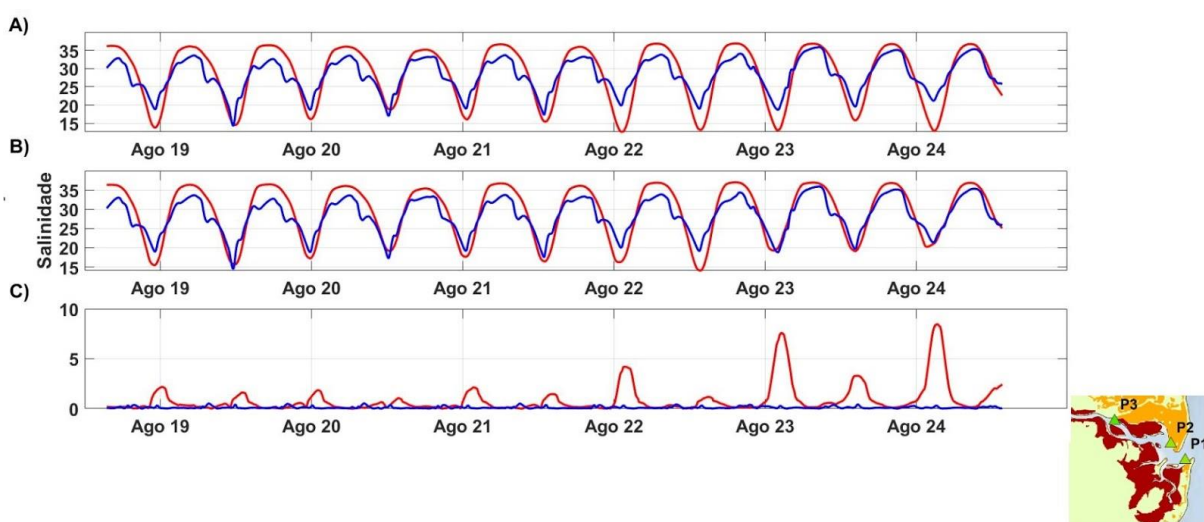


Figura 24- Série temporal de salinidade (A – superfície, B – fundo e C – diferença entre fundo e superfície) no P2 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.

- **P3 (Marina Buranhém)**

A validação da salinidade de superfície e fundo do P3 é observada através da Figura 25. Os dados observados da superfície apresentaram salinidade média de 13,83, variando de 1,88 (mínimo) a 25,31 (máximo), enquanto nos dados modelados a salinidade média foi de 13,46, com mínimo de 0,00 e máximo de 31,88. No gráfico da salinidade de superfície (Figura 25 – A), nota-se que tanto nas marés baixas como altas, os dados modelados superestimaram os observados em todo o período de análise. Os parâmetros estatísticos apresentaram uma ótima concordância entre os dados, com valores de Skill de 0,92 e RMSE de 5,30.

Na salinidade de fundo, o conjunto de dados observados variou de 1,05 (mínimo) a 24,95 (máximo), com média de 13,98. Já os dados modelados, essa variação foi de 0,00 a 31,92 (máximo) e média de 13,56. Na análise gráfica (Figura 25 - B), pode-se observar o mesmo comportamento visualizado na salinidade de superfície: uma superestimação dos dados modelados em todo o período. Os parâmetros estatísticos também apresentaram um excelente desempenho, com valores de Skill de 0,93 e RMSE de 5,24. Assim como no P2, quase não houve estratificação vertical de sal do modelo, podendo observar apenas alguns picos suaves nos dados observados (Figura 25 – C).

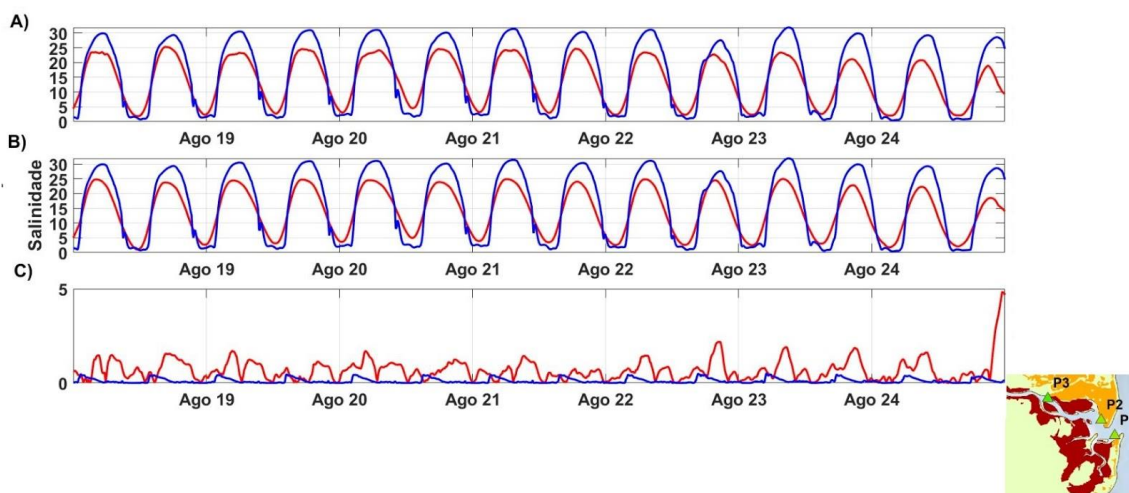


Figura 25 - Série temporal de salinidade (A – superfície, B – fundo e C – diferença entre fundo e superfície) no P3 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul.

5.2.3 Velocidade na direção longitudinal

- **P2 (Marinha)**

A validação da velocidade média na direção longitudinal do P2 pode ser observada através da Figura 26. Para os dados observados, houve uma variação de $-0,33\text{m/s}$ na enchente e $0,54\text{m/s}$ na vazante, com média na coluna de água de $0,10\text{ m/s}$ na direção vazante. Já nos dados modelados, os resultados mostraram uma variação de $-0,45\text{ m/s}$ na enchente e $0,50\text{ m/s}$ na vazante, e uma média de $0,01\text{ m/s}$ em sentido vazante. Observa-se que, tanto na maré vazante como na de enchente, há uma subestimação do modelo em todo o período de análise, sendo mais intenso na maré vazante durante os primeiros dias (período de sizígia). Os parâmetros estatísticos apresentaram uma concordância entre os dados com valores de Skill de $0,80$ e RMSE de $0,14$.

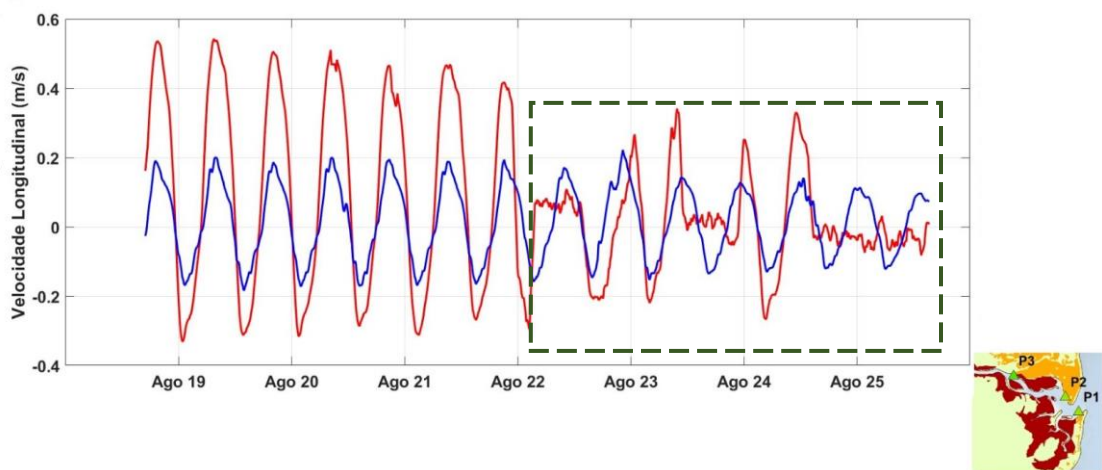


Figura 26 - Série temporal da velocidade longitudinal do P2 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul. A área tracejada corresponde aos dados observados que não foram considerados devido a um erro no equipamento de medição.

5.2.4 Velocidade na direção transversal

Para a validação da velocidade média na direção transversal, os dados observados apresentaram valores entre $-0,35\text{m/s}$ na enchente a $0,19\text{m/s}$ na vazante, enquanto nos dados modelados houve uma variação $-0,64$ a $0,65\text{m/s}$ na enchente e vazante, respectivamente. Na Figura 27, observa-se uma melhor concordância gráfica ao compará-la com a direção longitudinal. Na maré vazante os dados modelados conseguem representar bem os dados de campo durante boa parte do período, com exceção apenas na maré de enchente onde ocorre

uma subestimação do modelo. Assim como na análise gráfica, os parâmetros estatísticos também apresentaram uma excelente qualidade dos resultados, com valores de Skill de 0,98 e RMSE de 0,04.

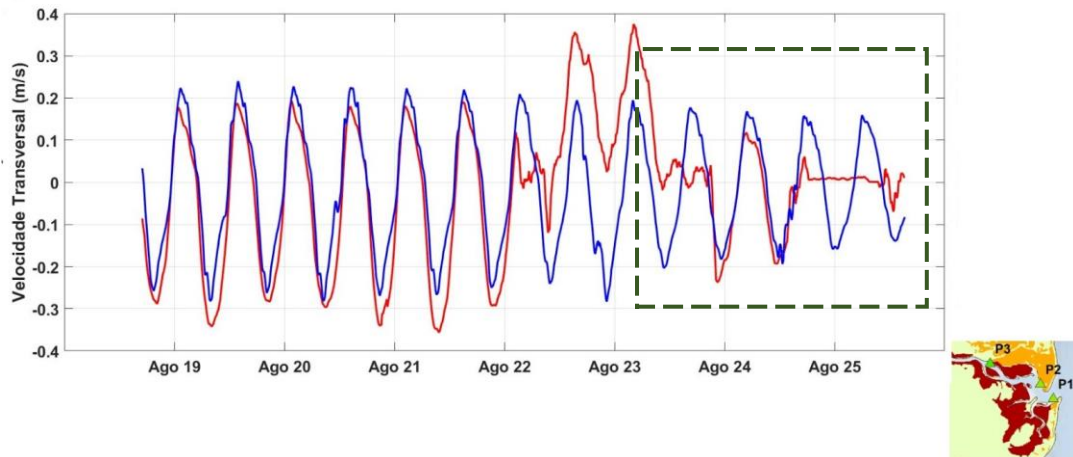


Figura 27- Série temporal da velocidade transversal do P2 durante o período de validação. Dados observados em vermelho e dados modelados em azul. A área tracejada corresponde aos dados observados que não foram considerados devido a um erro no equipamento de medição.

Na Tabela 8 tem-se a comparação entre os resultados quantitativos alcançados por Rocha (2019), que corresponde às simulações sem inclusão do vento e adoção da camada sigma, com os resultados obtidos nesta dissertação, com a inclusão do vento e camada Z.

Tabela 8 - Comparação dos parâmetros estatísticos para o período de validação entre os resultados quantitativos obtidos por Rocha (2019), que corresponde às simulações sem a inclusão do vento e adoção da camada sigma, em comparação aos resultados obtidos nesta dissertação, com a inclusão do vento e adoção da camada Z. Os valores destacados em vermelho referem-se aos resultados que apresentaram piores valores para cada caso.

Parâmetro Estatístico		Nível de Água		Salinidade						Velocidade	
				Superfície	Fundo	Superfície	Fundo	Superfície	Fundo		
		P2	P3	P1		P2		P3		P2	
Rocha (2019)	Skill	0,98	0,98	0,86	0,90	0,87	0,91	0,93	0,94	0,93	0,62
	RMSE	0,14	0,12	3,25	2,53	4,10	3,13	3,75	3,46	0,16	0,41
Este estudo	Skill	0,99	0,99	0,71	0,76	0,90	0,92	0,92	0,93	0,80	0,98
	RMSE	0,12	0,10	4,69	3,90	3,73	3,10	5,30	5,24	0,14	0,04

Ao comparar os resultados entre as duas situações, observa-se que tanto no P2 como no P3, em Rocha (2019) apresentou uma pequena melhora nos parâmetros estatísticos, com valores bem próximos aos deste estudo. Dessa forma, pode-se inferir que durante o período de estudo, a inclusão do vento não teve interferência significativa no efeito do nível de água. Este comportamento pode ser em decorrência da proteção morfológica do beachrock e também dos tabuleiros costeiros.

Na comparação entre os resultados de salinidade de superfície e fundo do P1, nota-se que neste estudo, houve uma redução do parâmetro estatístico Skill e um aumento do valor do RMSE. O mesmo comportamento foi observado no P3, porém com diferenças insignificantes. Esse fato pode ser em decorrência da utilização de uma vazão constante adotada por Rocha (2019), e por isso, não ter tido uma representação mais realística deste ponto, uma vez que sua localização está mais próxima da zona do rio e, conseqüentemente, espera-se ter uma maior contribuição da vazão fluvial. Já no P2, os resultados de salinidade mostram que neste estudo o parâmetro estatístico Skill apresentou uma melhora, enquanto o RMSE, a melhora foi apenas na salinidade de fundo.

Com relação a comparação entre a velocidade, observa-se que com a inclusão do vento, os parâmetros estatísticos apresentaram piores valores na direção longitudinal, enquanto na direção transversal, houve melhores resultados. Tal fenômeno pode ser justificado pelo mesmo motivo discutido nas seções anteriores: a adoção de uma vazão constante na simulação de Rocha (2019).

5.3 Plumas

5.3.1 Séries Temporais

As simulações da pluma foram realizadas por 24 dias, incluindo-se, além dos três pontos utilizados nas etapas de calibração e validação (P1, P2 e P3), as estações Recife de fora (P6) e praias do Mundaí (P4), de Taperapuã (P5) e Mucugê (P7), conforme definidos na Tabela 1. Em cada ponto, foram analisadas as séries temporais de nível d'água, salinidade de superfície e velocidade de corrente para as 4 situações: sem vento, vento nordeste, sudeste e sul. Para todos os cenários de vento, a vazão máxima adotada foi atingida no 13o dia, com valor de 75m³/s e permaneceu constante até o final do período de simulação.

5.3.1.1 Nível de Água

Na análise gráfica do nível de água, observou-se que não houve diferenças perceptíveis entre os resultados para cada ponto nem tampouco para cada situação de vento. Portanto, apenas para efeito de ilustração do comportamento do nível da água - especialmente das marés, para as simulações da pluma, a Figura 28 ilustra o nível de água (m) apenas do P1 na condição sem vento.

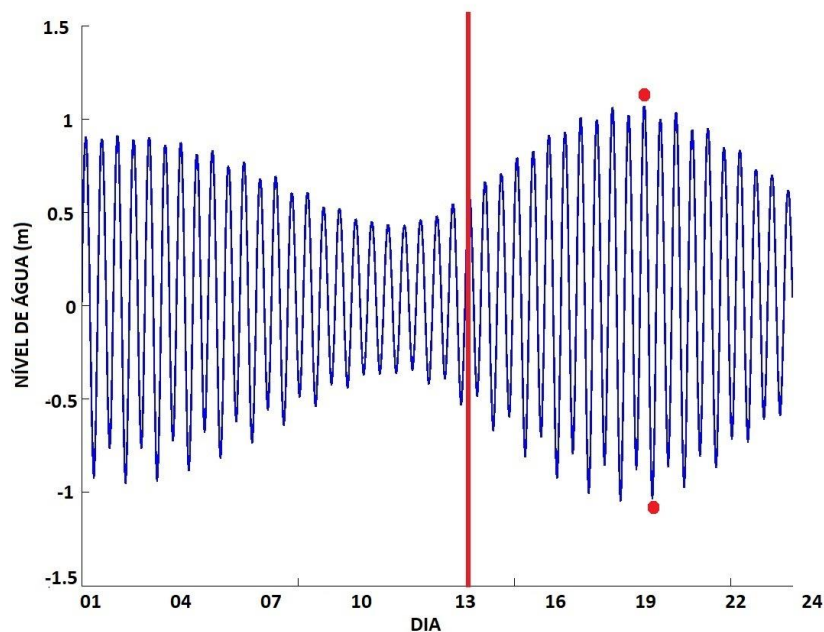


Figura 28 - Série temporal de nível d'água (m) do P1 para a situação sem vento. A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida. As circunferências em vermelho representam os instantes de maré que serão utilizados na seção 5.4.1.

5.3.1.2 Salinidade

- **P1 (Quinta do Porto)**

A Figura 29 apresenta as séries temporais de salinidade superficial do P1 para as 4 situações de vento. Ressalta-se que não foram obtidas séries contínuas de dados de salinidade de fundo por limitações à discretização vertical adotada. Observa-se que, embora haja uma diferença pouco expressiva do comportamento da salinidade para cada situação de vento, essa região é modulada pela interação entre as marés, vazão e vento, pois alternam-se períodos ora de domínio fluvial, ora de salinidade tipicamente estuarina, até atingir valores de água salgada

durante as preamares. Pelos resultados, espera-se uma maior intrusão salina sob ventos de quadrante sudeste e especialmente sob vento sul. Esse comportamento é explicado por conta da existência de um pequeno canal - ilustrado pela Figura 8-C - por onde águas salgadas conseguem adentrar o estuário pela porção sul do beachrock, na praia conhecida como do Apaga Fogo. Essa característica topobatimétrica permite então que ventos de sul sejam capazes de transportar águas mais salgadas para o interior do sistema.

Comparado aos períodos de calibração e validação, quando foram utilizados dados reais de vento sob condições mais amenas (Figuras 09 e 10), a simulação das condições com vento constante de 10m/s indicam que, em determinadas circunstâncias, o vento pode ter um papel relevante na hidrodinâmica estuarina. Afinal, mesmo sob condições de vazões extremas ($75\text{m}^3/\text{s}$), ainda assim a salinidade superficial no interior do estuário foi influenciada especialmente por ventos de sul, com valores se aproximando de 35 nas marés altas.

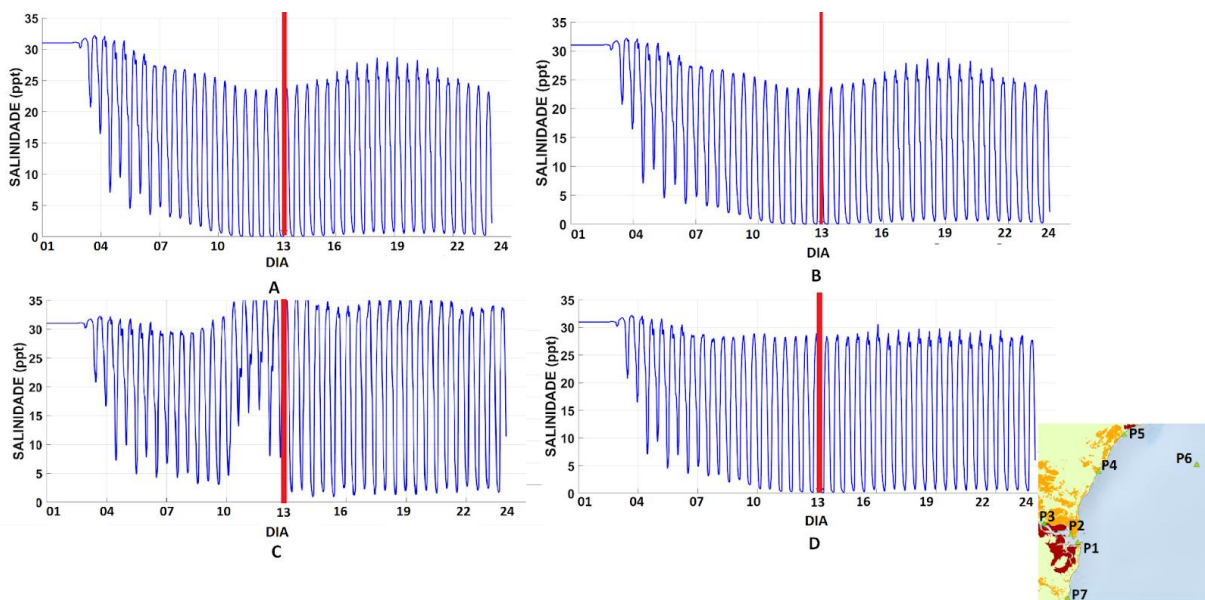


Figura 29 - Série temporal de salinidade superficial do P1 para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P2 (Marinha)**

Como este ponto está situado a montante em relação a P1, confirma-se a redução nos valores de salinidade, ressaltando-se que os resultados obtidos só foram para as camadas superficiais (Figura 30). É razoável supor-se que, se esse foi o comportamento na superfície,

que as camadas de fundo tendam a intensificar ainda mais esse comportamento com as camadas mais salgadas, de fundo. Assim como no caso anterior, o vento sul foi o mais efetivo em aportar águas salgadas para o interior do sistema, enquanto nas outras três condições, as salinidades superficiais máximas modeladas atingiram valores de até 20, aproximadamente. Aparentemente, a barreira hidráulica exercida pelo beachrock na desembocadura do sistema é mais eficaz para a entrada de águas salinas sob ventos de nordeste e de sudeste, mas nem tanto para o vento sul, quando a diferença de salinidade em relação aos demais casos foi por volta de 10 unidades.

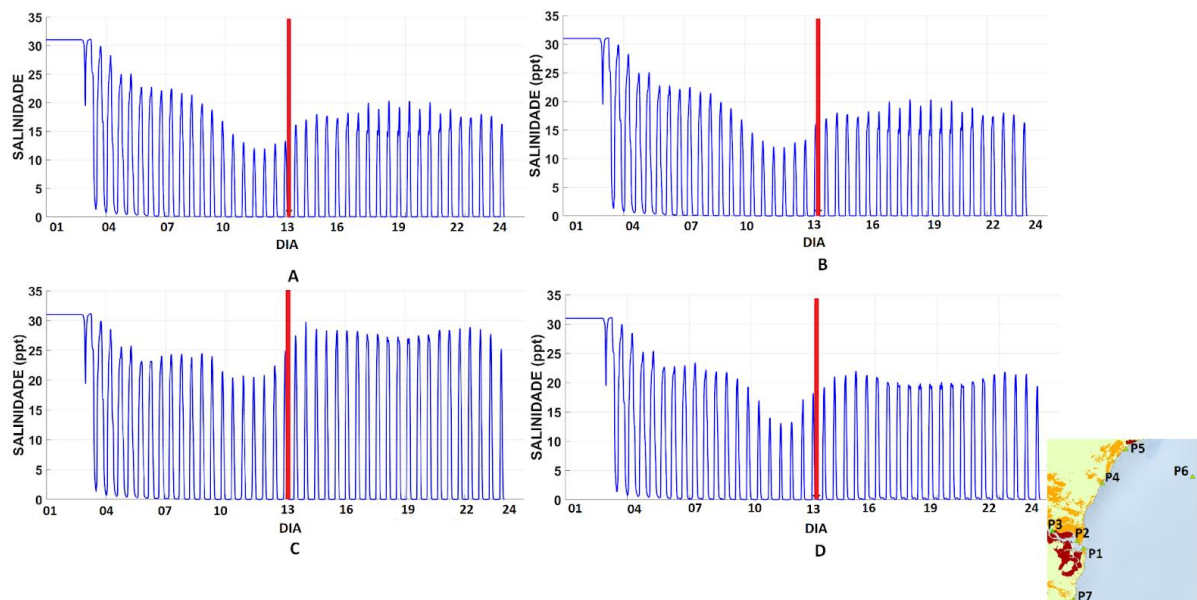


Figura 30 - Série temporal de Salinidade do P2 para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P3 (Marina Buranhém)**

Observa-se um comportamento semelhante nas 4 situações, podendo-se constatar que independentemente do vento, a vazão fluvial dominou os efeitos combinados da maré e do vento, a ponto da salinidade tender a zero (Figura 31). Este fenômeno pode ser justificado devido ao P3 ser o ponto mais a montante de todos e, portanto, mais distante da zona estuarina. Por isso, espera-se uma maior influência da vazão fluvial do que o próprio efeito do vento ou das marés. Sob condições extremas de vazão, como as adotadas nessas simulações, espera-se que o sistema estuarino seja deslocado em direção ao mar enquanto persistir tal cenário.

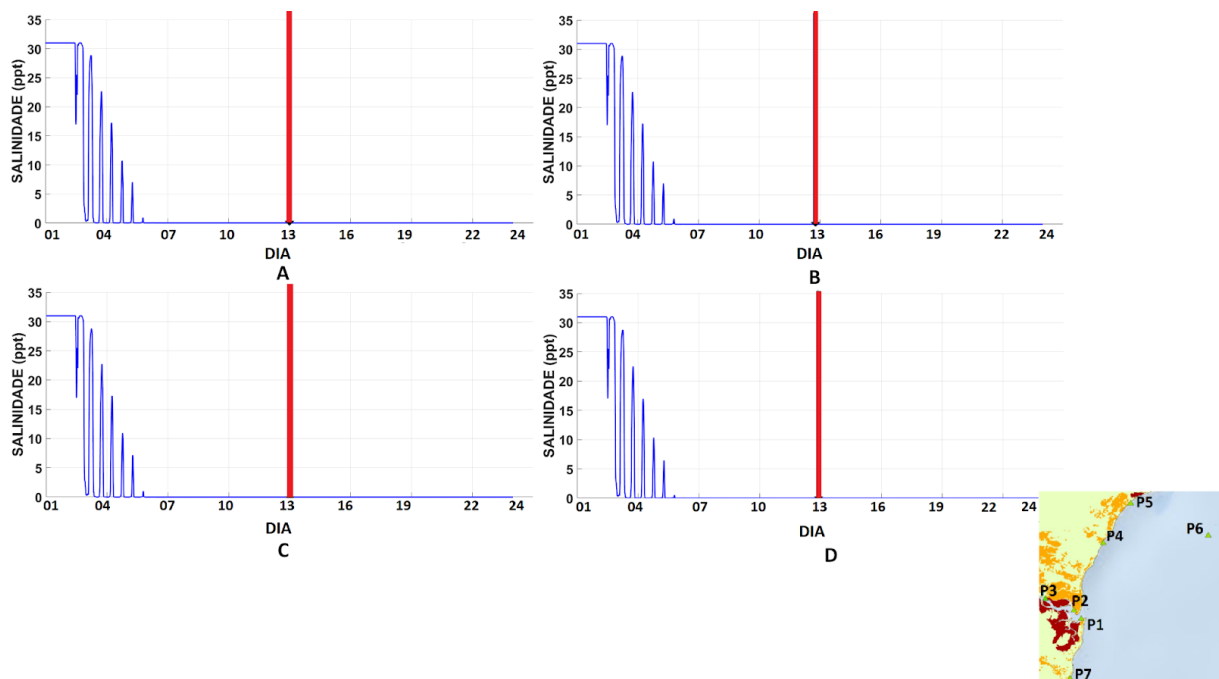


Figura 31- Série temporal de Salinidade do P3 para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P4 (Mundaí)**

Na zona costeira adjacente, espera-se que ventos de Nordeste transportem a pluma para sul, enquanto ventos de Sul e de Sudeste transportem-na para norte. Quando se analisa a distribuição da salinidade na zona costeira adjacente, já se verifica a influência do vento e da pluma entre os cenários simulados para o P4 (praia do Mundaí; Figura 32). A partir do momento em que tem-se uma vazão máxima e constante de $75\text{ m}^3/\text{s}$, nota-se uma maior variabilidade de sal, especialmente com o efeito dos ventos Sul (C) e Sudeste (D). É sob este que se espera um deslocamento da pluma mais ao norte, conforme valores de salinidade ainda inferiores àqueles previstos sob o vento Sul. Em outras palavras, o vento Sudeste parece ser mais eficiente em manter a pluma confinada na faixa litorânea, o que pode trazer repercussões diversas ao destino dos materiais eventualmente carregados pela pluma. Na condição sem vento, a pluma se desloca para norte, dirigida especialmente pela topobatimetria e pelo beachrock na desembocadura do rio Buranhém. Com relação ao vento Nordeste (B), observa-se que este elevou a salinidade até o seu valor máximo e que o mesmo permaneceu constante

até o final do período. Portanto, pode-se dizer que a pluma não chega ao P4 sob efeito deste vento.

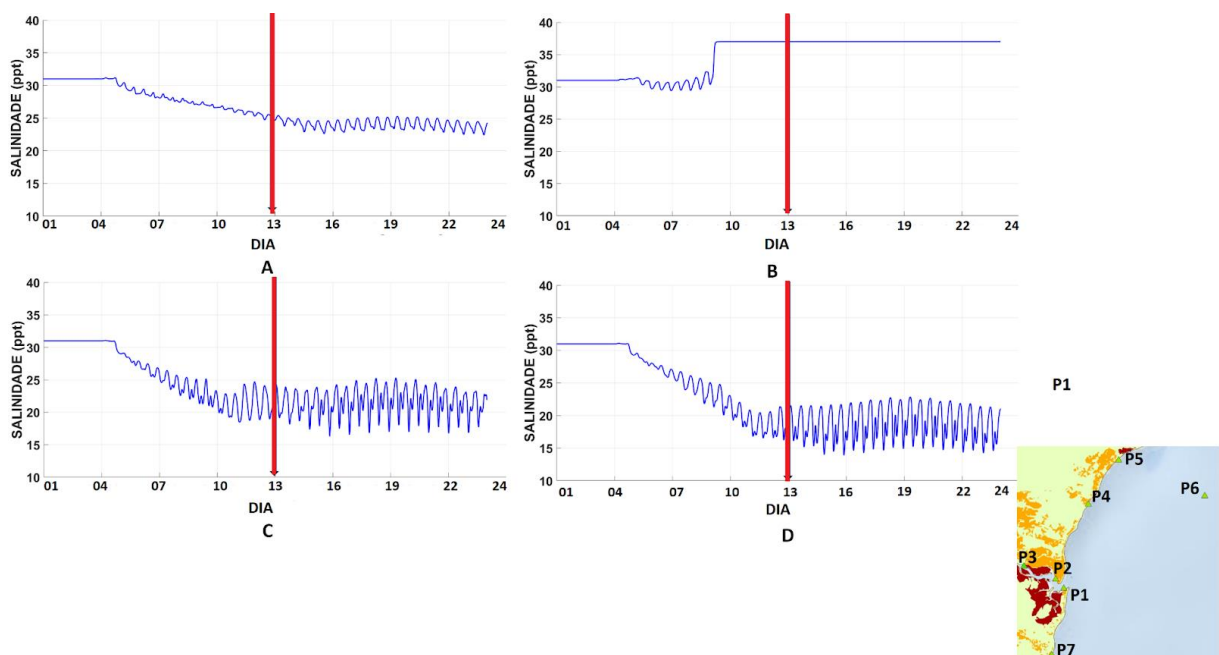


Figura 32 - Série temporal de Salinidade do P4 (Mundaí) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P5 (Taperapuã)**

Ao comparar a série temporal de salinidade do P5 (praia de Taperapuã) dos 4 cenários de ventos adotados (Figura 33), a condição sem vento (Fig.33-A), houve uma maior variabilidade da salinidade, estimada a partir do momento em que se atinge a vazão máxima de $75\text{m}^3/\text{s}$. Nos demais casos (B, C e D), mesmo com vazão máxima e constante, o efeito do vento parece dificultar o transporte de água doce pluma ao P5. Este comportamento inesperado pode ser devido a um problema de ordem numérica e não física, uma vez que por este ponto está situado mais perto da borda da malha e, portanto, o transporte da pluma pode estar sendo mascarado por condições de contorno do modelo numérico. Para trabalhos futuros em que se deseje analisar o comportamento hidrodinâmico e da qualidade da água nessa região da praia de Taperapuã, recomenda-se que a malha numérica seja expandida mais ao norte.

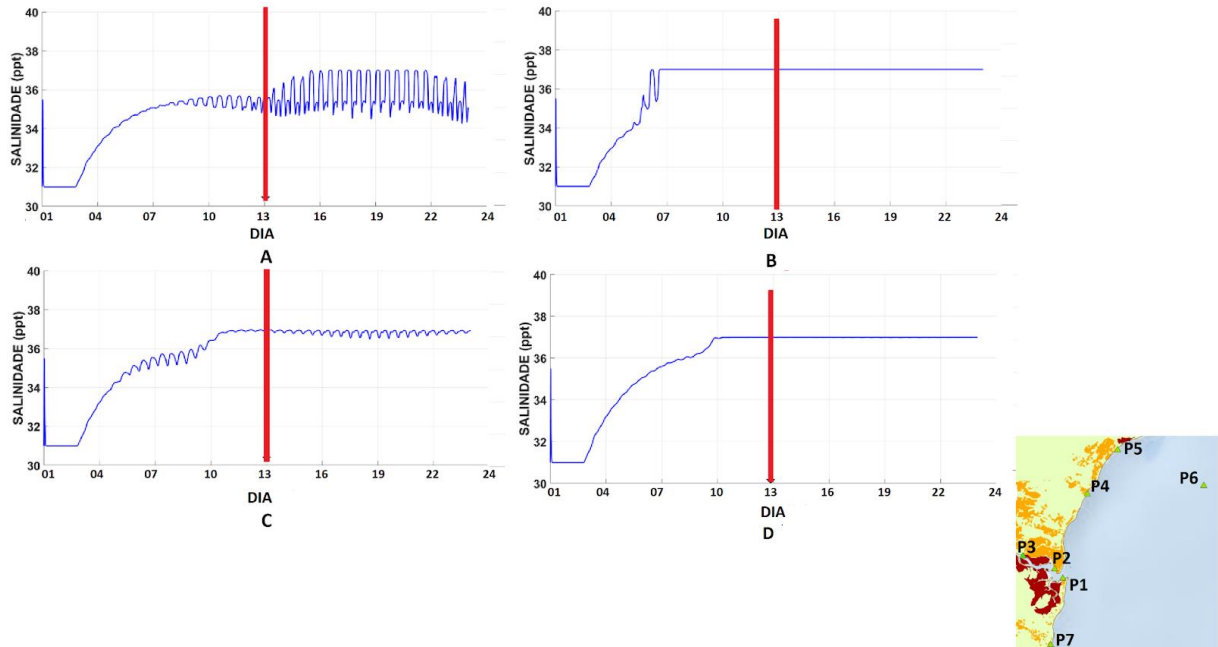


Figura 33 - Série temporal de Salinidade do P5 (Taperapuã) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P6 (Recife de Fora)**

Ao analisar-se a Figura 34, que representa a série temporal de salinidade do P6 (Recife de fora), observa-se, de forma geral, um comportamento semelhante nas 4 situações de vento. Mesmo sob vazão máxima ($75\text{m}^3/\text{s}$) e ventos intensos de Sul (C) e Sudeste (D), situações em que se esperaria uma maior contribuição desses ventos, a pluma não consegue ser transportada ao P6 durante o período simulado.

Este comportamento condiz com resultados obtidos em estudos geológicos realizados nessa área do Recife de fora. De acordo com Turbay et al. (com. pessoal), que realizaram análises mineralógicas e geoquímicas para identificação da proveniência da pluma em alguns recifes do banco Royal Charlotte, constataram que o Recife de fora sofre uma maior influência da pluma oriunda do rio Jequitinhonha, localizado mais ao norte da área de estudo, uma vez que as concentrações de elementos imóveis como háfnio, nióbio, tântalo, tório, lantânio, ítrio e zircônio, encontrados no recife estão mais próximas das concentrações observadas neste rio.

Por outro lado, na tese desenvolvida por Abrantes (2018), em que estudou a influência da pluma do rio Buranhém sobre comunidades de corais de recifes costeiros de Porto Seguro, mostrou que todos os dados indicaram uma forte influência desse rio na estrutura e densidade

das populações de corais e esponjas no Recife de Fora. Além disso, Arantes (2012) ao descrever a geomorfologia, sedimentologia e características biológicas da área do Recife de Fora, sugeriu que a região do recife sofre uma grande influência terrígena/costeira. Dessa forma, esses estudos sugerem que há um gradiente de influência de sedimentação da foz do rio Buranhém até o Recife de Fora que, em linha reta, estão separados por aproximadamente 9,5km.

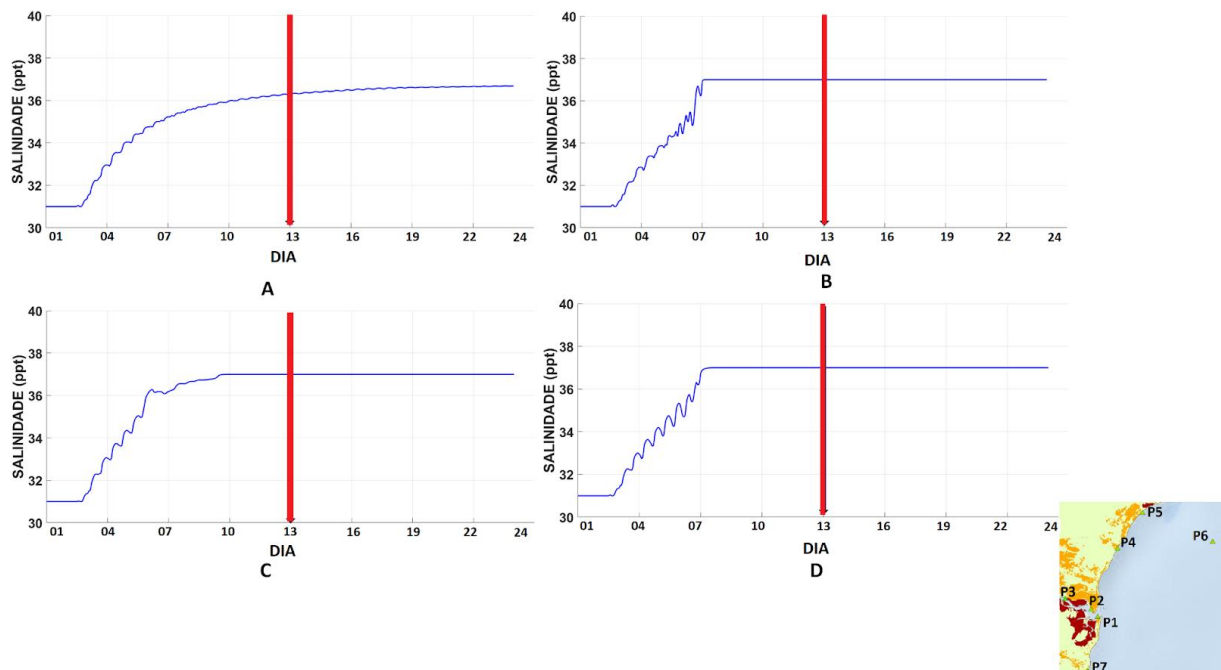


Figura 34 - Série temporal de Salinidade do P6 (Recife de fora) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P7 (Mucugê)**

A Figura 35 apresenta a série temporal de salinidade do P7 (praia do Mucugê) para as 4 situações de vento. Localizado ao sul do estuário, espera-se que a pluma se desloque nesse sentido especialmente sob condições de vento Nordeste, o que pode ser confirmado por meio da maior variação vertical de sal observada na Figura 35 -B. Ainda assim, sem o efeito do vento (A), a pluma consegue alcançar o P7 sob vazão máxima ($75\text{m}^3/\text{s}$), onde observa-se uma pequena variabilidade temporal da salinidade. Por outro lado, o efeito dos ventos sul (C) e sudeste (D), impossibilitam o transporte da pluma ao P7.

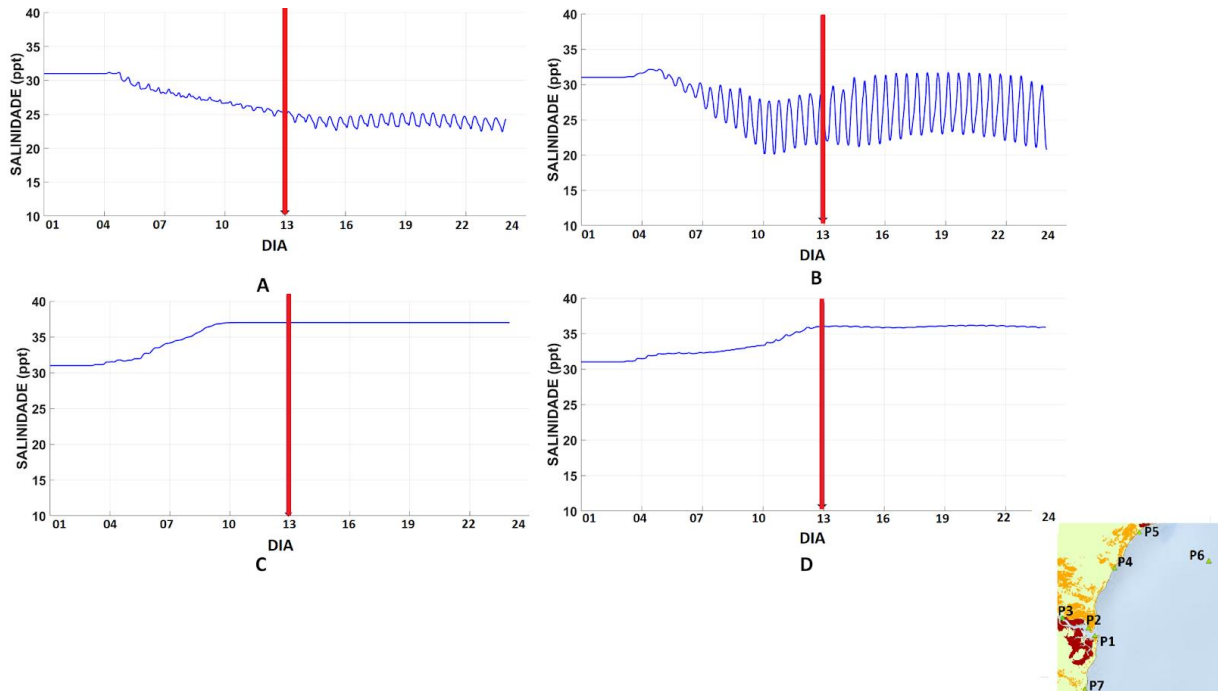


Figura 35 - Série temporal de Salinidade do P7 (Mucugê) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

5.3.1.3 Velocidade

- **P1 (Quinta do Porto)**

As séries temporais dos componentes transversal e longitudinal de velocidade superficial no P1, sob as 4 condições de vento adotadas, são mostradas na Figura 36. Ainda que o P1 seja o mais próximo ao mar, dentre os pontos localizados na região comumente conhecida como zona estuarina, o efeito do vento local não parece influenciar na hidrodinâmica estuarina, provavelmente pelas condições geomorfológicas e topobatimétricas já apresentadas. Além disso, dentre os 4 cenários, observa-se que sem o efeito do vento (Fig. 36-A), a componente longitudinal da velocidade tende a se deslocar - em média, para valores positivos, quando há um predomínio de correntes de vazante, até mesmo acima de $0,4\text{m/s}$. Já as correntes de enchente, sob condições de ventos Sul e Sudeste indicam uma intensificação com valores da ordem $0,3\text{m/s}$, em relação aos resultados sem vento e de vento Nordeste. Esse comportamento nas correntes no P1 reforça a hipótese de que águas marinhas entrem no sistema estuarino a partir da extremidade sul da beachrock, especialmente sob condições de vento Sul, conforme simulado para a salinidade (Figura 29-C).

Ao se analisar o gráfico que representa a resultante das duas componentes de velocidade (longitudinal e transversal), observa-se um comportamento semelhante para as 4 condições de vento, uma vez que a posição do P1 é limitada lateralmente pela morfologia do canal. A leste desse ponto, há um muro de contenção, enquanto a oeste destaca-se a presença de um banco de areia existente há bastante tempo na região, o que restringe as correntes lateralmente.

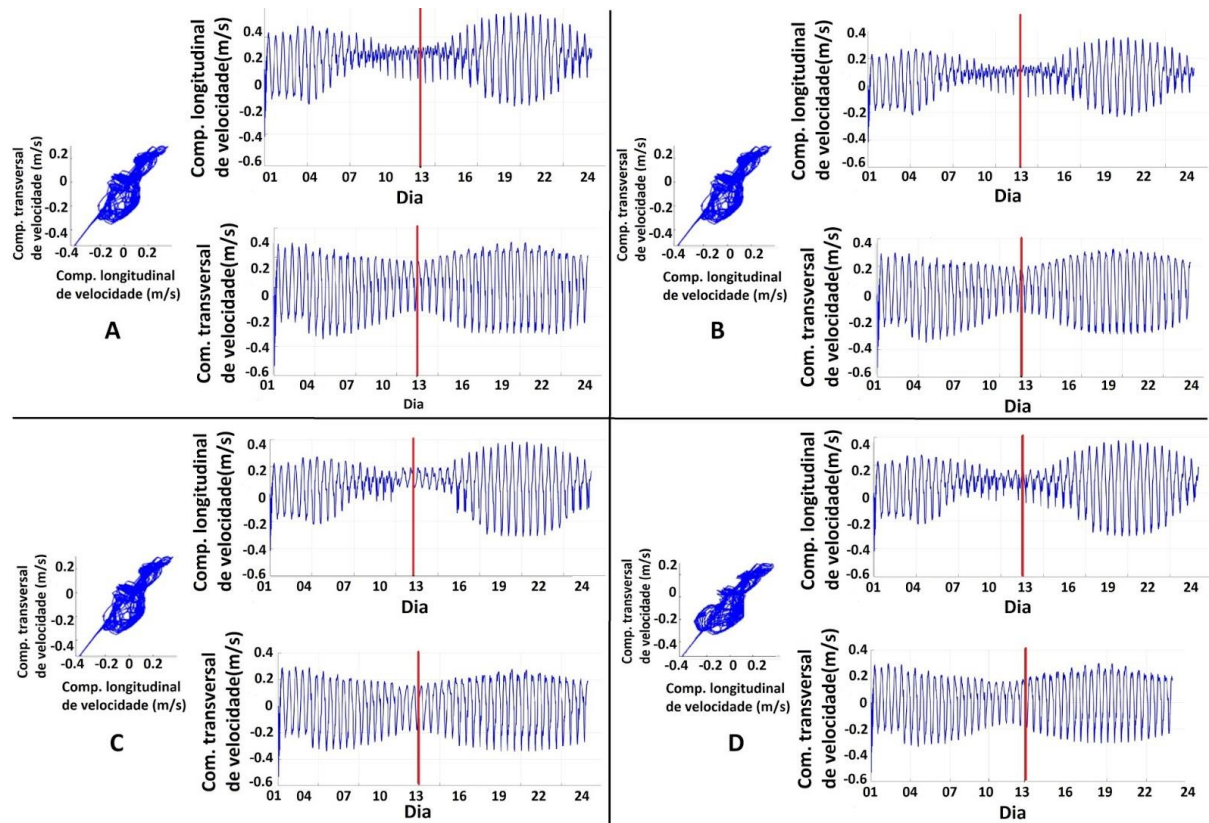


Figura 36 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P1 (Quinta do Porto) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P2 (Marinha)**

O canal estuarino na região do P2 tem seu eixo principal orientado na direção Noroeste-Sudeste (Figura 8-C), o que indica que deve-se esperar que a componente transversal de velocidade seja a mais relevante, como de fato é o caso (Figura 37). Além disso, essa configuração morfológica favorece a atuação de ventos de Sudeste sobre a hidrodinâmica local (Figura 37-D), cujo sentido preferencial das correntes de maré é distinto

do modelado para as demais condições (Figuras 37-A, 37-B e 37-C). Dentre os pontos analisados, o P2 foi o que apresentou as correntes de maré mais intensas. Ventos Sul e Sudeste acentuaram as correntes superficiais predominantemente de enchente, o que sugere que diante de eventos de alta vazão e ventos intensos, ocorra uma inversão no campo de correntes nesse trecho do estuário, com potenciais impactos no aumento do tempo de residência de materiais em suspensão e na capacidade de depuração do estuário.

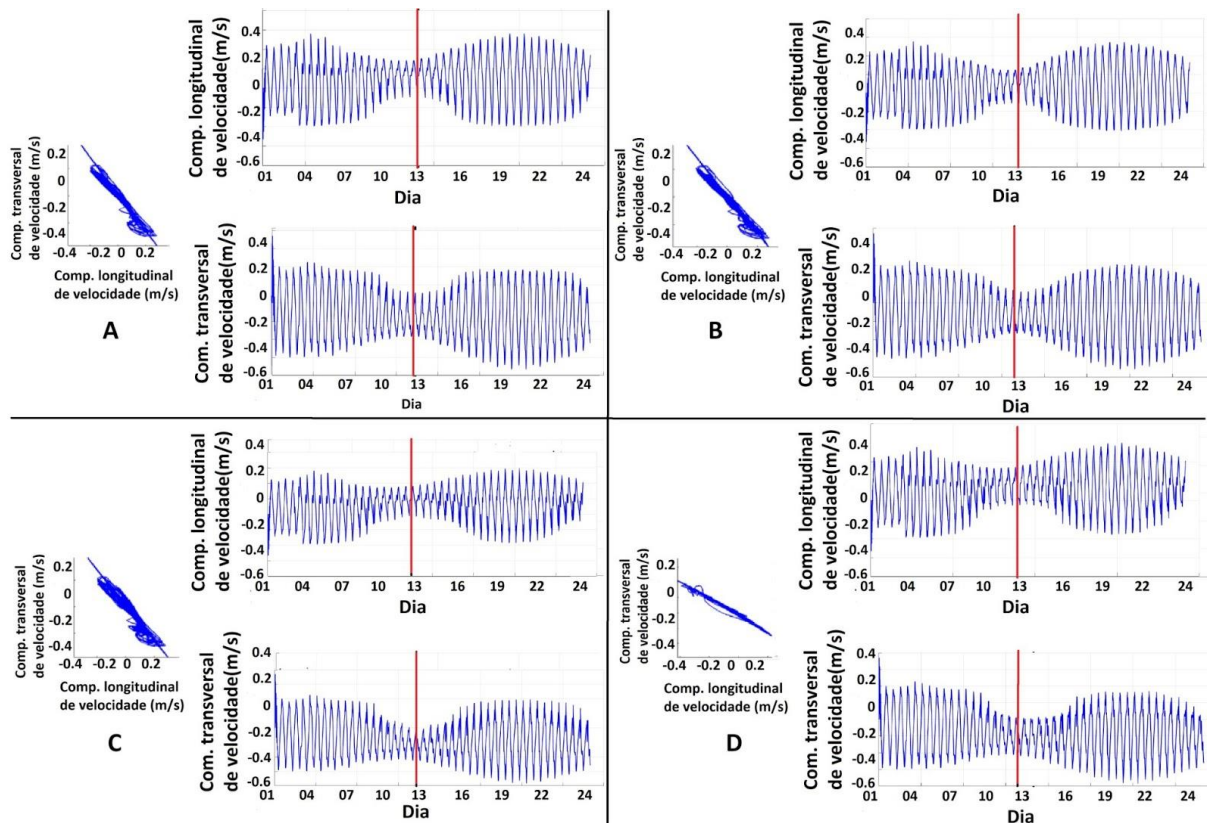


Figura 37- Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P2 (Marinha) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P3 (Marina Buranhém)**

Devido à localização do P3, mais a montante da zona mais frequentemente estuarina, era de se esperar que independentemente do vento, houvesse um maior domínio da vazão fluvial do que o próprio efeito do vento ou das marés, o que pode ser confirmado pelo comportamento semelhante da série temporal de velocidade das 4 situações (Figura 38). Contudo, as correntes simuladas continuam a ser moduladas pelas marés (Figura 28). Nota-se

comportamento similar ao se comparar os gráficos das resultantes das componentes de velocidade, em que há um predomínio de correntes de maré enchente na componente longitudinal, enquanto na transversal tem-se uma maior tendência de correntes de maré vazante. Sob atuação de vento Sul e Sudeste, ainda que de forma mais sutil do que nos pontos anteriores, espera-se uma redução na intensidade das correntes.

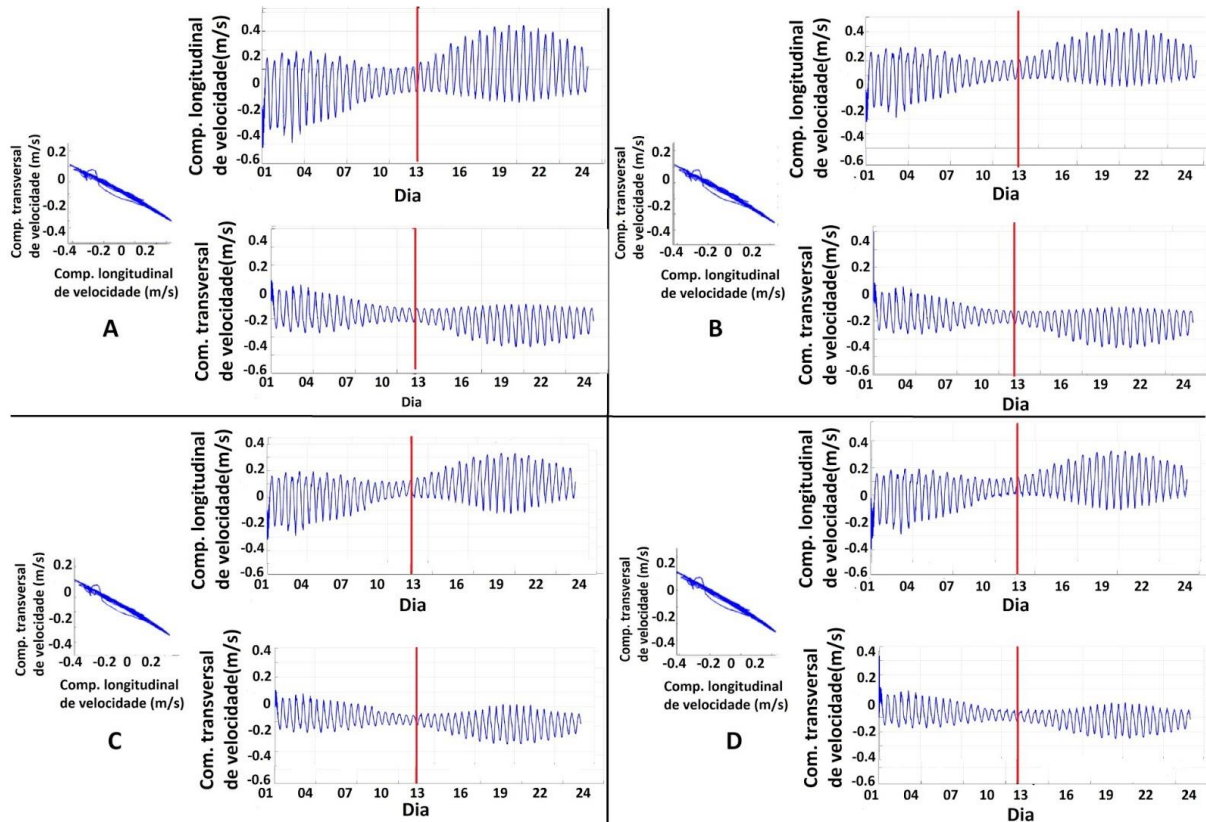


Figura 38 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P3 (Marina Buranhém) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P4 (Mundaí)**

Em ambientes costeiros abertos, sem restrições morfológicas mais acentuadas como em canais, é de se esperar uma redução na intensidade das correntes, além de uma maior influência do vento no direcionamento da pluma em detrimento de uma modulação menos evidente das marés (Figura 39).

Sem a inclusão do vento (Fig. 39-A), nota-se que correntes tendem a transportar a pluma para Nordeste, ao longo da costa. Portanto, reforça-se o papel de controle morfológico

exercido pelo beachrock na desembocadura do sistema, conduzindo a pluma ao longo da linha de costa. Já sob vento Nordeste (Fig.39-B), observa-se que há uma inversão das correntes superficiais, com predomínio para sudoeste, representado por valores negativos nas componentes longitudinal e transversal. Os ventos Sul e Sudeste (Fig. 39- C e D) apresentaram basicamente o mesmo comportamento, com correntes para nordeste acompanhando a linha de costa, sendo estas ainda mais intensas sob vento Sudeste.

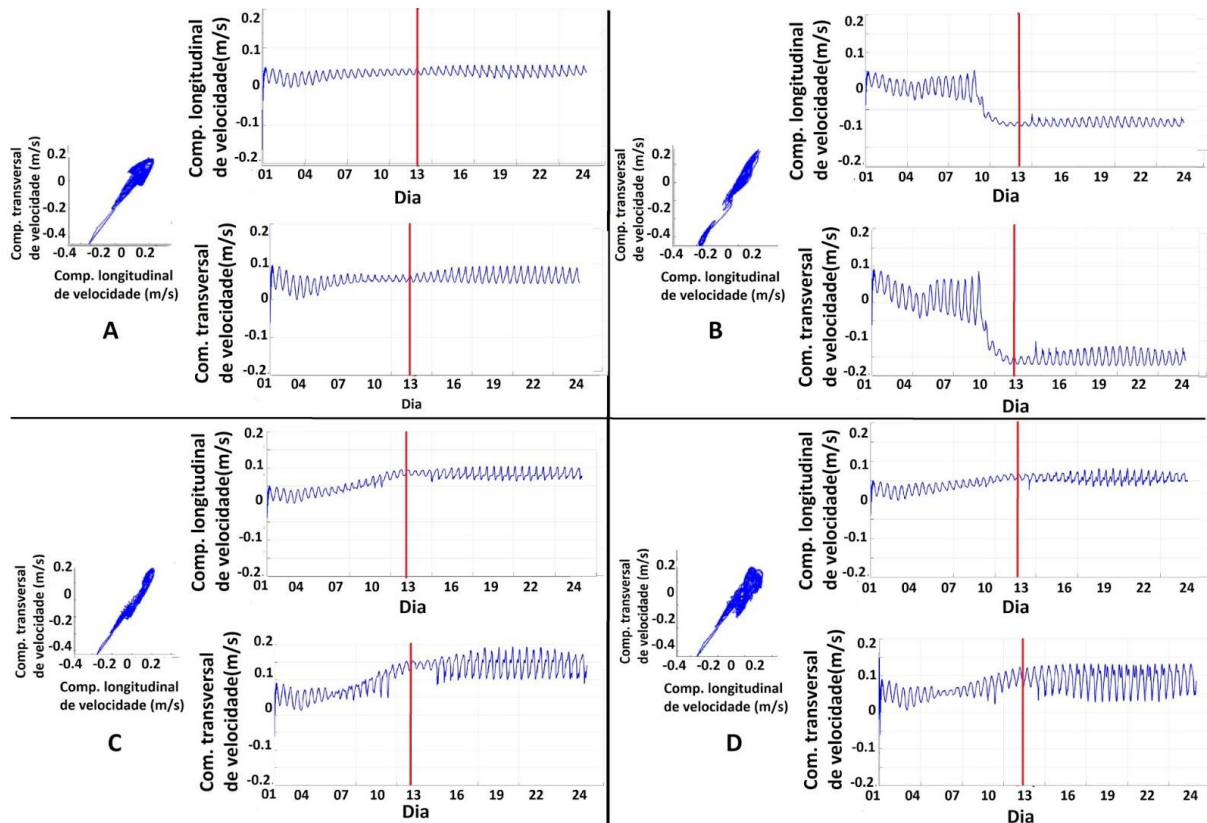


Figura 39 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P4 (Mundaí) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P5 (Taperapuã)**

Quando se analisa a distribuição da velocidade no P5 (praia de Taperapuã), nota-se que o ponto está sobre um dos contornos abertos da malha, o que prejudica a interpretação dos resultados, com velocidades resultantes que não acompanham a linha de costa real, mas sim a orientação da borda da malha (Figura 40). A linha de costa real nesse trecho também é na direção Nordeste - Sudoeste, similar ao comportamento das correntes do P4 (Mundaí).

Portanto, os resultados neste ponto são mais influenciados por um artifício numérico da orientação da malha do que pelas características morfológicas reais daquele trecho do litoral.

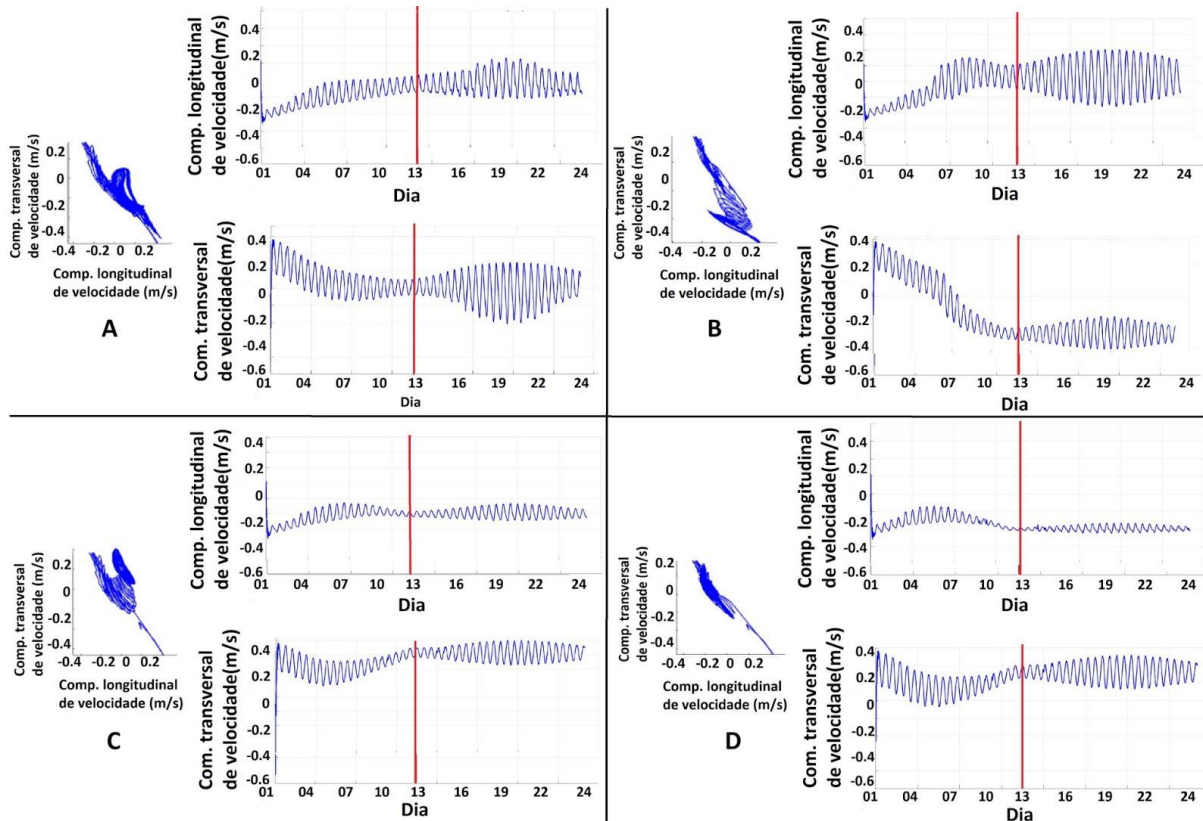


Figura 40 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P5 (Taperapuã) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P6 (Recife de Fora)**

Ao se analisar a Figura 41, que representa as séries temporais dos componentes transversal e longitudinal de velocidade superficial no P6 (Recife de fora), os resultados indicam um padrão de correntes superficiais modulado pelas marés, porém diferente para as 4 condições de vento adotadas. Na condição sem vento, nota-se a predominância de correntes para sudoeste, da ordem de $0,2\text{m/s}$ (Fig. 41 - A). Já sob ventos de Nordeste, esse padrão se intensifica com correntes superficiais entre $0,3$ e $0,4\text{m/s}$ (Fig. 41 - B). Sob condições de vento Sudeste e Sul, especialmente nesta última situação, são previstas correntes superficiais tipicamente dominadas por marés, transversais à costa, orientadas na direção Leste-Oeste com valores médios de $0,4\text{ m/s}$.

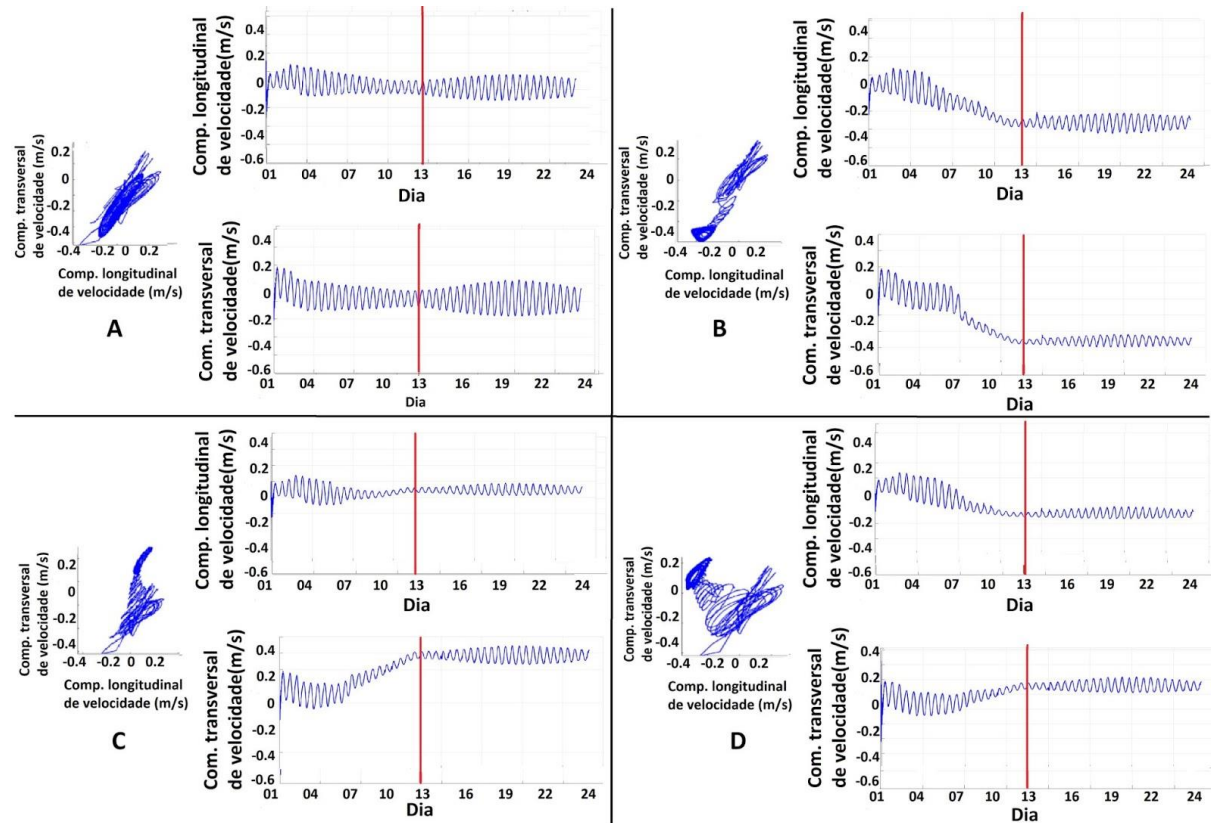


Figura 41 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P6 (Recife de Fora) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

- **P7 (Mucugê)**

As séries temporais dos componentes transversal e longitudinal de velocidade do P7 (praia do Mucugê), sob as 4 condições de vento adotadas, são mostradas na Figura 42. Em todas as situações, predominam correntes de maré transversais à costa, o que é evidenciado pela componente transversal ser de maior magnitude do que a componente longitudinal. Portanto, evidencia-se que nessa região também ocorre o predomínio do efeito das marés sobre as correntes do que pelo efeito do vento ou da vazão fluvial. Esse foi o ponto para o qual foram simuladas as correntes superficiais de menor intensidade, não ultrapassando $0,1\text{ m/s}$.

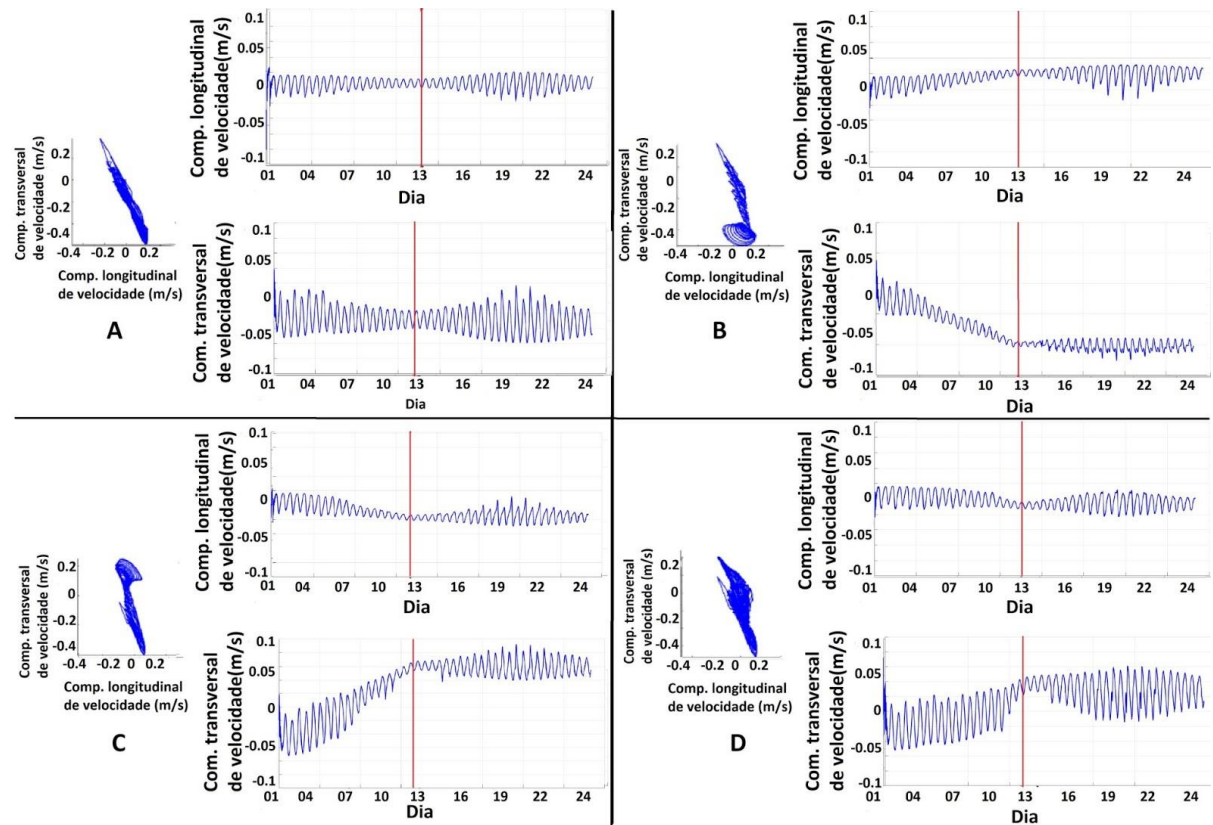


Figura 42 - Série temporal das componentes longitudinal e transversal da velocidade no P7 (Mucugê) para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D). A linha vertical vermelha representa o momento em que a vazão máxima e constante de $75\text{m}^3/\text{s}$ é atingida.

5.4.1 Análise do comportamento espacial da pluma

São apresentados os resultados do comportamento da pluma sob influência dos diferentes cenários de ventos, a partir da distribuição horizontal de salinidade e velocidade. Assim como na seção anterior, adotou-se uma vazão máxima de $75\text{m}^3/\text{s}$ (a partir do 13o dia de simulação) e uma intensidade de vento de 10m/s . Para apresentação dos resultados a seguir, foram escolhidas duas marés de sizígia consecutivas no 18o dia, sendo uma preamar e outra baixamar (Figura 28).

5.4.1.1 Salinidade

- **Preamar**

Durante uma preamar de sizígia, o beachrock fica submerso, o que é representado no modelo, que permite a passagem de água por cima dessa estrutura natural. Além disso, conforme destacado em seções anteriores, há um canal ao sul por onde águas salgadas conseguem adentrar no sistema estuarino. De forma geral, todas as simulações indicam o confinamento da pluma em zonas rasas, ao longo da faixa litorânea, o que pode ser um indício de que o material eventualmente carregado em suspensão pela pluma - como plâncton, esgotos e sedimentos mais finos, possam atingir e influenciar as praias da orla, que são os principais atrativos turísticos de Porto Seguro.

Na condição sem vento, as simulações indicam um espalhamento da pluma preferencialmente para norte, devido ao controle topobatimétrico, mas também há salinidades menores ao sul do domínio (Figura 43-A). Ainda que com algumas diferenças em relação às simulações com ventos Sul e Sudeste (Figuras 43-C e 43-D), respectivamente, em todos esses casos espera-se que as praias da chamada Orla Norte de Porto Seguro sejam afetadas pela pluma, o que pode eventualmente comprometer a qualidade da água. Ressalta-se que as simulações realizadas no presente estudo não levam em conta a presença e deságue eventual de outros rios menores existentes na região que, por sua vez, também podem representar potenciais fontes de poluentes oriundos de esgotos domésticos e da drenagem pluvial. Ainda sob condição de vento Sul, reforça-se a entrada de águas salgadas pela extremidade sul do beachrock, o que causou uma maior salinidade em P1 (Figura 29-C) e P2 (Figura 30-C).

Já sob ventos Nordeste, cuja intensidade se acentua especialmente nos períodos de primavera, há o deslocamento da pluma para sul, em direção às praias da chamada Orla Sul, localizadas especialmente no distrito do Arraial d'Ajuda.

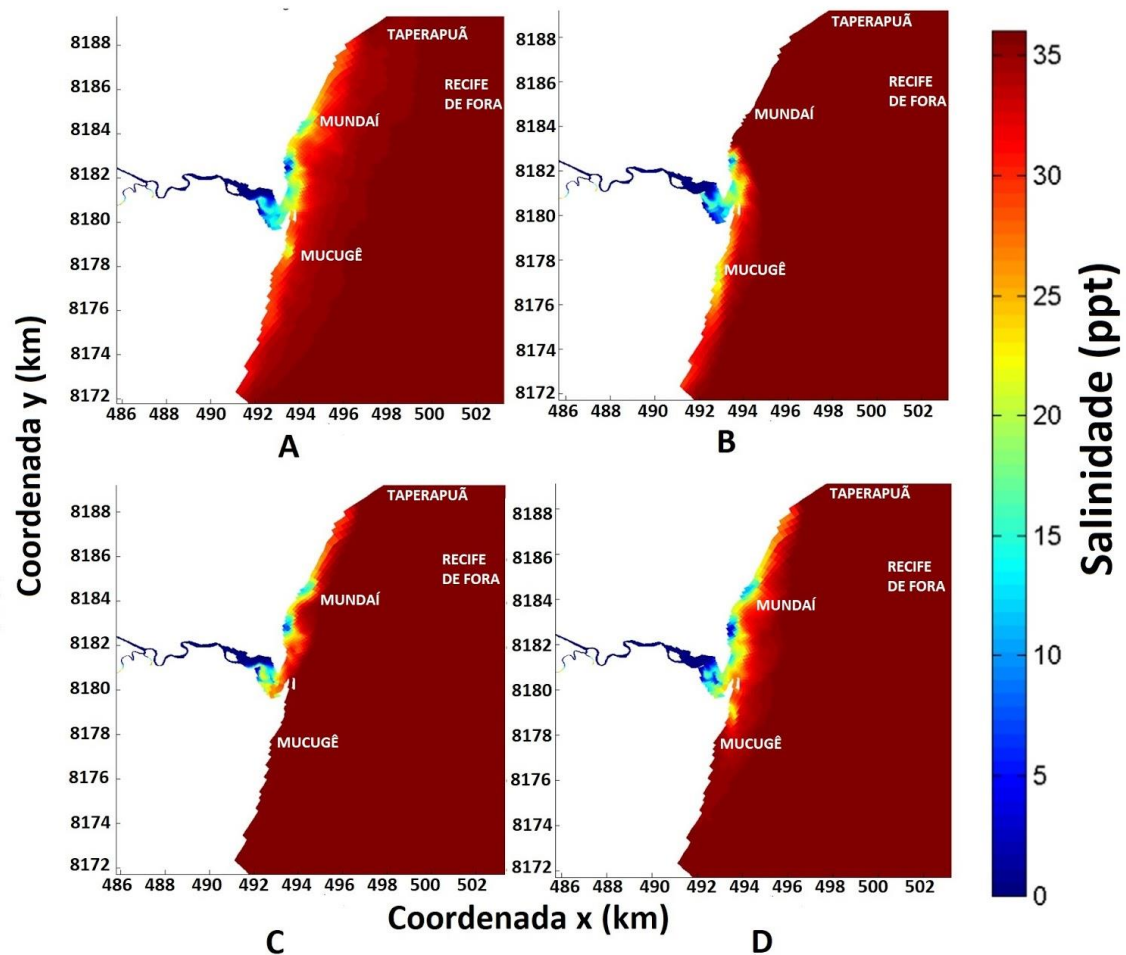


Figura 43- Comportamento espacial da pluma referente a salinidade de superfície, na condição de preamar, para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D).

- **Baixamar**

Os resultados de salinidade a seguir confirmam a importância da modulação pelas marés nessa região, especialmente por se tratar de uma condição de baixamar de sizígia, aliada a uma vazão relativamente alta para o rio Buranhém (Figura 44). Com exceção da simulação com ventos Sudeste, ocasião em que se espera a presença de águas salobras na região interna do beachrock e do sistema estuarino, nas demais simulações espera-se que a zona de mistura entre águas de origem continental e as águas marinhas ocorra ao norte do beachrock, já na região conhecida como Orla Norte.

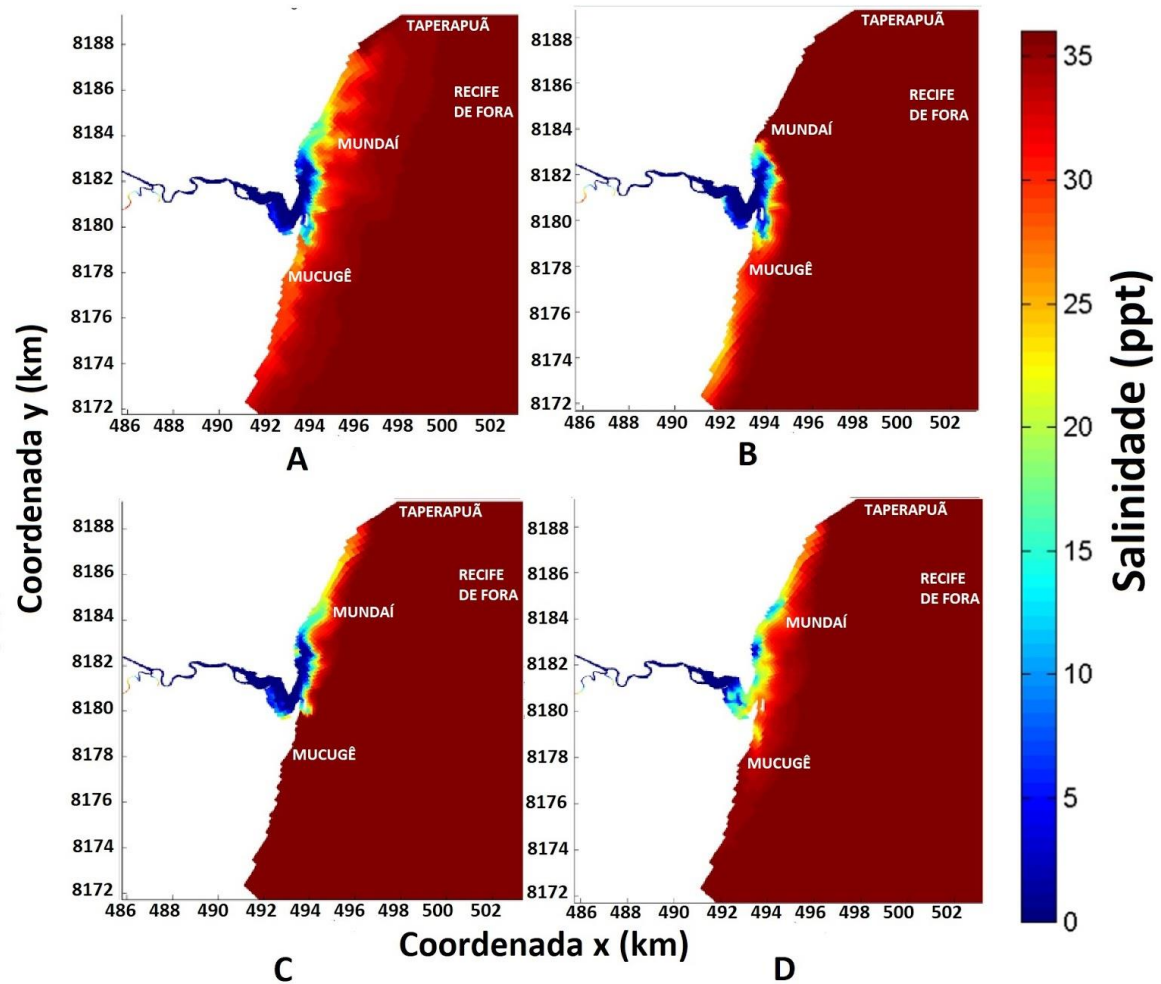


Figura 44 - Comportamento espacial da pluma referente a salinidade de superfície, na condição de baixamar, para as 4 situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D).

5.4.1.2 Velocidade

- **Preamar**

Durante a preamar, independente do efeito do vento, observa-se que não há diferenças perceptíveis entre as correntes no interior do estuário (Figura 45), podendo afirmar que, nos 4 cenários, há um maior domínio da vazão do rio do que o próprio efeito do vento. Na zona costeira (Figura 46), confirma-se a expectativa de um comportamento diferente com a inclusão do vento. Com o vento nordeste (B), é visível a corrente gerada pela pluma em

direção ao sul, enquanto o vento sul (C) e sudeste (D) este comportamento não é representado, o que pode ser devido a possíveis efeitos da morfologia na linha da costa.

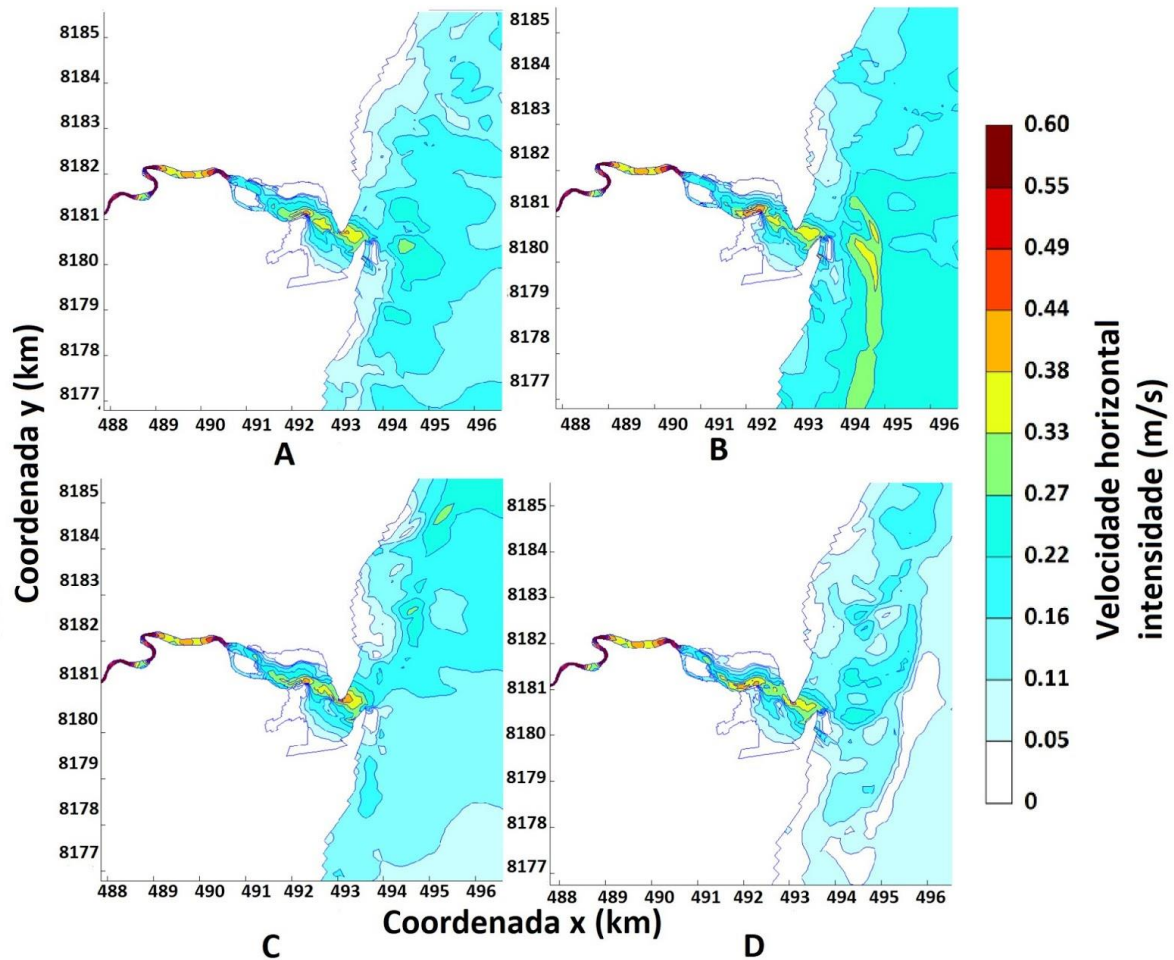


Figura 45 - Comportamento espacial da pluma durante condição de preamar de sizígia, com destaque para a região do estuário, referente a intensidade da velocidade horizontal (m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D).

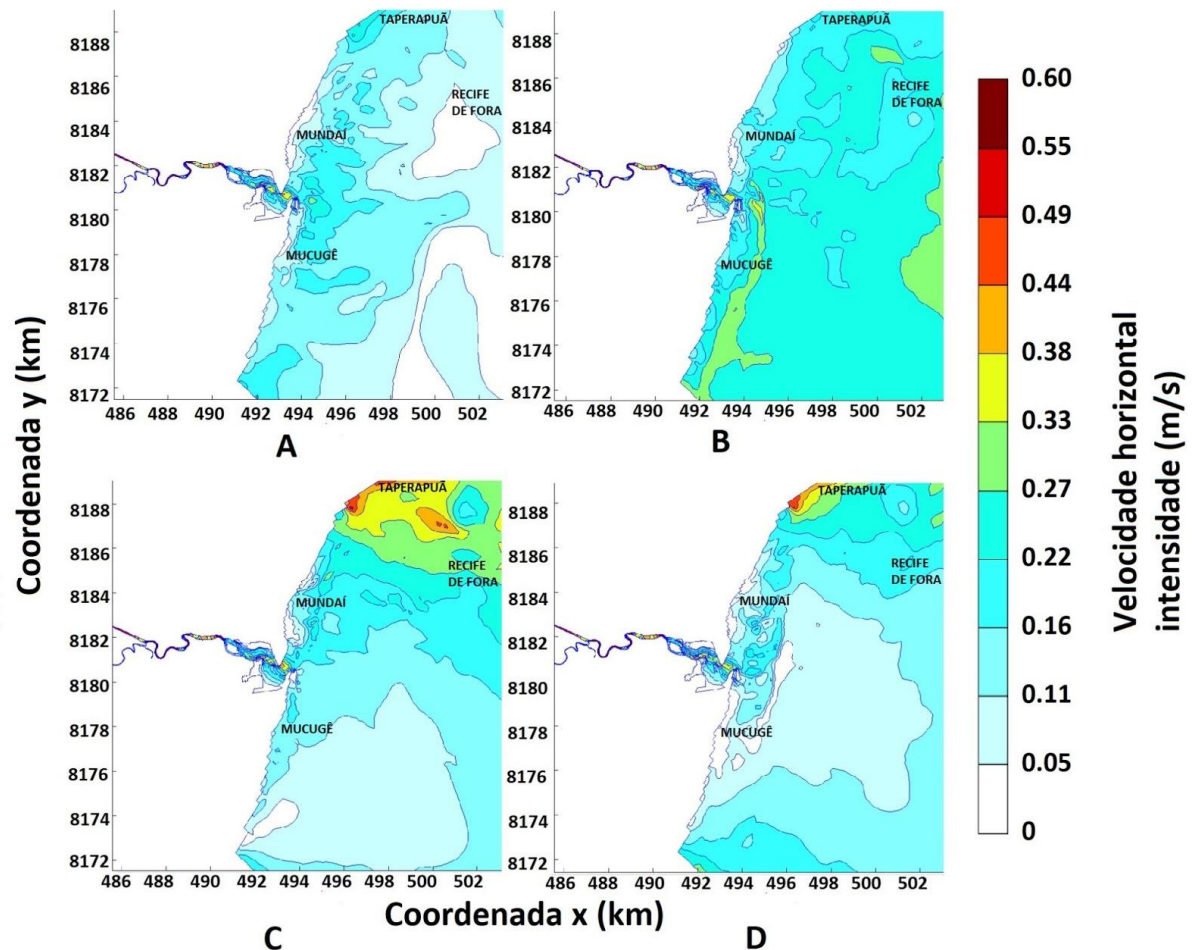


Figura 46 - Comportamento espacial da pluma com destaque na zona costeira, durante condição de preamar de sizígia, referente a intensidade da velocidade horizontal (m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D).

- **Baixamar**

Durante a baixamar, especialmente na região do estuário (Figura 47), não há diferenças perceptíveis no campo de velocidades entre as situações simuladas, provavelmente explicadas pela redução expressiva da pista de vento naquele trecho da área de estudo. As maiores diferenças ocorrem na zona costeira adjacente (Figura 48). No caso do campo de velocidades sob vento Nordeste (Figura 48-B), destaca-se uma região de máxima intensidade próximo ao contorno aberto ao norte (“Ocl”; Figura 8-A), que pode ser um artifício numérico das condições simuladas, uma vez que não há justificativa plausível para maiores intensidades

das correntes em uma região distante da zona de influência mais direta da vazão fluvial ou mesmo das correntes de maré. Já na área do Recife de Fora, uma região mais rasa, pode ocorrer intensificação da velocidade devido à batimetria local, sob diferentes condições de vento.

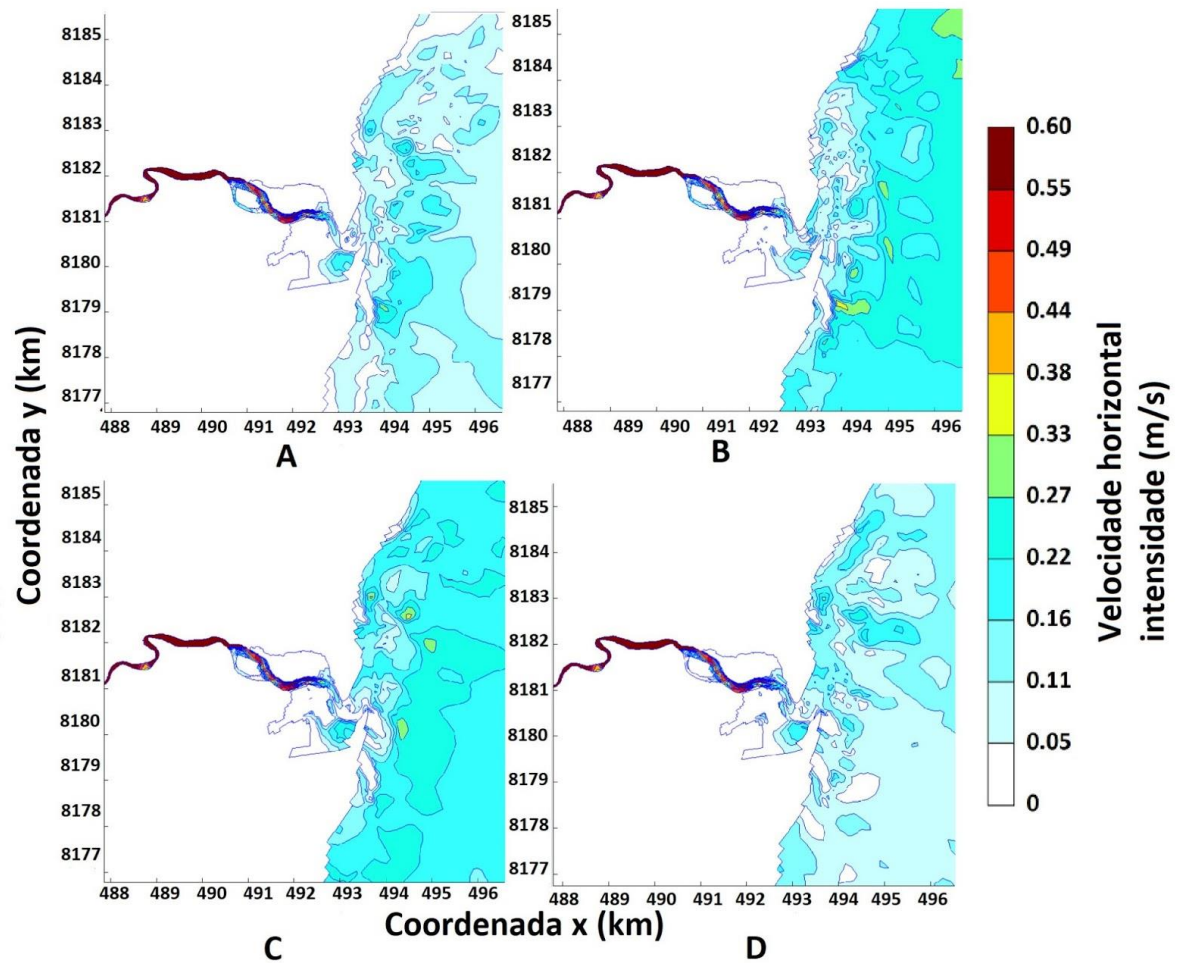


Figura 47 - Comportamento espacial da pluma com destaque para a região do estuário, durante condição de baixamar de sizígia, referente a intensidade da velocidade horizontal (m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul (C) e vento Sudeste (D).

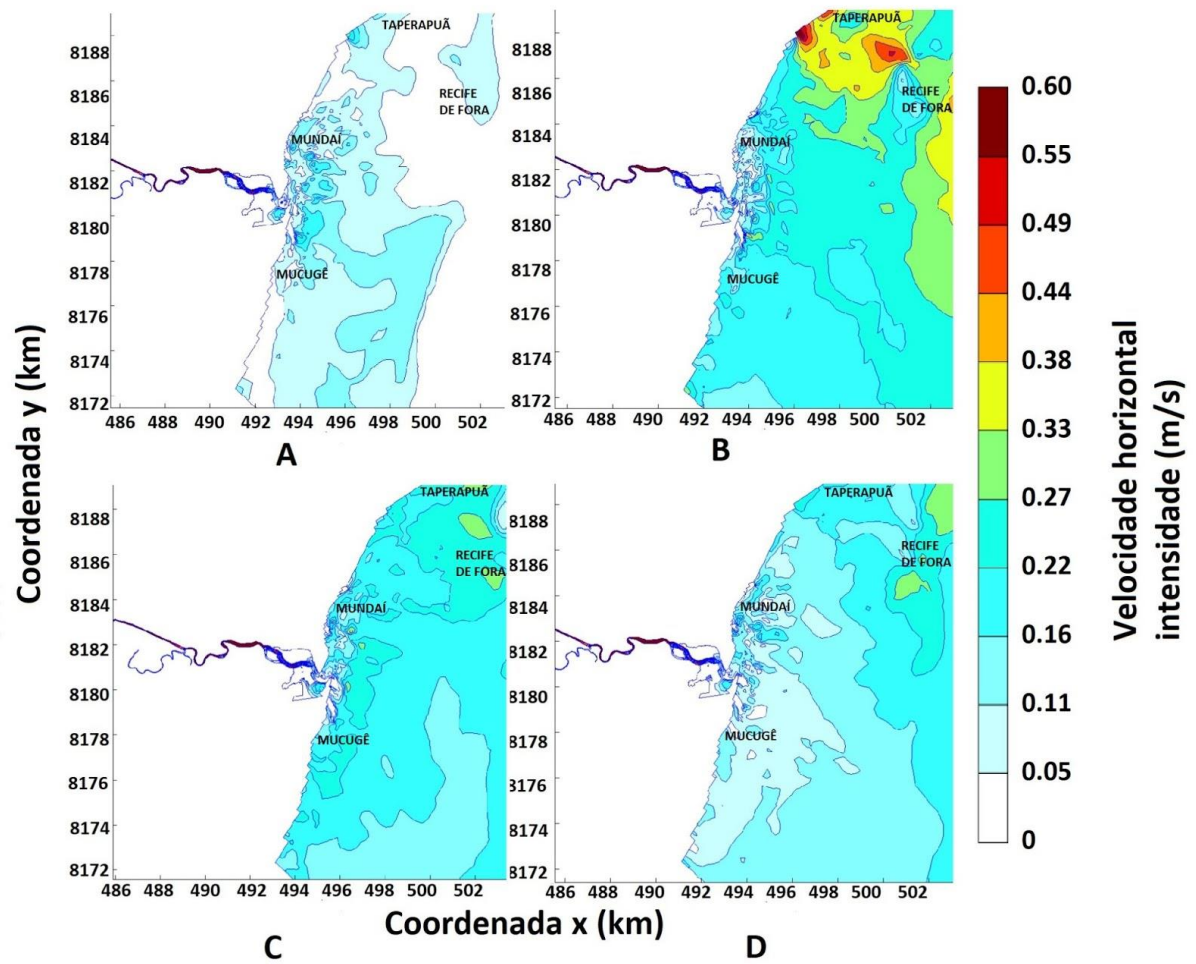


Figura 48 - Comportamento espacial da pluma com destaque para a região do estuário, durante condição de baixamar de sizígia, referente a intensidade da velocidade horizontal (m/s) para as situações: sem vento (A), vento Nordeste (B), vento Sul(C) e vento Sudeste (D).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho traz importantes contribuições à compreensão da importância de forçantes físicas como as marés, vazão fluvial e ventos para a hidrodinâmica da região do estuário do rio Buranhém e região costeira adjacente. Destaca-se ainda o caráter aplicado deste estudo a possíveis medidas de gestão ambiental dos ambientes estudados, uma vez que as praias são os principais atrativos turísticos e econômicos de Porto Seguro e, ao mesmo tempo, influenciadas pelos fenômenos que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Buranhém e do seu estuário.

A implementação de vazões e ventos (direção e intensidade) reais foi um incremento em relação aos resultados alcançados por Rocha (2019), o qual não considerou o efeito do vento no processo de modelagem e adotou discretização vertical com camadas sigma (Tabelas 07 e 08). A análise quantitativa dos resultados modelados, em relação aos observados, com a adoção de RMSE e Skill, variou na etapa de calibração de “muito bom” na velocidade longitudinal a “excelente”, para o nível da água e salinidade. Já na fase de validação, todos os resultados de Skill foram classificados como “excelentes”, de acordo com a Tabela 6. Esperava-se que, com a adoção de camadas Z neste trabalho, fosse finalmente possível reproduzir a estratificação vertical de sal no modelo, o que infelizmente ainda não foi possível. Apesar de inúmeras tentativas de testes com a discretização das camadas Z, alterações e testes com parâmetros do Delft3D, como “Ztop” e “Zbottom”, simulações com mais de 10 camadas apresentavam instabilidade e não eram concluídas na íntegra. Dessa forma, o uso das 10 camadas Z viabilizou que as simulações fossem concluídas com sucesso, mas, mesmo nesses casos, em geral os resultados modelados foram disponibilizados quase que ao longo de toda a simulação para as camadas 9 e 10.

Para os períodos em que havia dados de campo, a inclusão do vento observado em campo parece não ter sido relevante para possíveis melhorias dos resultados modelados. Com o modelo considerado calibrado e validado, seguiram-se simulações de condições idealizadas de vazão fluvial ($75 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a aproximadamente três vezes a vazão média mensal do rio Buranhém) e vento (10 m/s) de Nordeste, Sudeste e Sul. Para essas condições de vento, com duração na escala temporal de dias, a modelagem indica que essa forçante pode influenciar na hidrodinâmica estuarina, especialmente nas regiões de P1 e P2. A existência de um canal ao sul do beachrock na desembocadura do rio Buranhém, ligando o estuário ao mar,

exerce importante papel nas trocas de água entre estuário e zona costeira, sobretudo sob condições de vento Sul. Este resultado reforça a importância de uma representação fidedigna das características topobatimétricas para a modelagem adequada de um ambiente e compreensão das suas principais propriedades e fenômenos. Já na zona costeira adjacente, a influência do vento local fica evidente quando comparadas situações sem vento e com ventos de Nordeste, Sudeste e Sul, seja sobre a distribuição de salinidade, seja sobre os campos de velocidade.

O comportamento da pluma do rio Buranhém sobre seu estuário e zona costeira adjacente foi realizado, considerando-se os pontos de utilizados nas fases de calibração e validação (P1 a P3), mas também a partir da escolha de pontos na zona costeira que tenham importância para a conservação natural (P6, Recife de Fora) e para o monitoramento da balneabilidade das praias (P4, Mundaí; P6, Taperapuã e P7, Mucugê). Compreender sua dinâmica tem importantes implicações no transporte de organismos (como o plâncton), poluentes (esgotos) e sedimentos entre o continente e o oceano. Sem o efeito do vento, espera-se que as características geomorfológicas e topobatimétricas da região exerçam controle sobre o destino da pluma do Buranhém, com predominância de deslocamento ao norte, especialmente pelo controle hidráulico exercido pelo beachrock na desembocadura durante a maior parte do ciclo de marés. Apenas sob condições de marés altas, especialmente de sizígia, é que essa estrutura natural fica parcialmente submersa. Sob condições de vento Nordeste, espera-se que a pluma atinja regiões litorâneas ao sul da desembocadura do rio Buranhém, conhecida como Orla Sul, como a praia do Mucugê. Já sob condições de ventos Sul e Sudeste, a pluma tende a se deslocar para norte, sem contudo atingir diretamente o Recife de Fora nas condições simuladas. Nessas condições, em que a topobatimetria parece ter função relevante, a pluma deslocou-se muito próximo à linha de costa, ao longo da região chamada de Orla Norte de Porto Seguro, onde se localizam praias como a do Mundaí e de Taperapuã.

Ao se analisar as componentes longitudinal e transversal de velocidade na área de estudo, foram modeladas velocidades de até 0,6m/s. O efeito idealizado do vento e vazão, em conjunto com a simulação das marés a partir de 6 constituintes, resultou em correntes no estuário fortemente dependentes da topobatimetria local. Já no ambiente costeiro adjacente, as correntes foram menos intensas - como era de se esperar, além de uma evidente modulação de correntes de maré, atuando transversalmente à costa.

Com isso, confirma-se que, sob eventos extremos de vazão e vento, a pluma do rio Buranhém pode afetar a hidrodinâmica estuarina e costeira, inclusive em trechos da linha de costa onde estão situados importantes atrativos turísticos do município.

Para trabalhos futuros, sugerem-se as seguintes ações: reprodução da estratificação vertical de sal, com eventual refinamento da malha numérica e das propriedades topobatimétricas; parametrização mais detalhada das condições de atrito em áreas como de manguezais; inclusão do efeito remoto do vento; incorporação de possíveis efeitos das ondas de gravidade sobre a dinâmica da região, assim como a implementação dos módulos de qualidade da água e morfodinâmica.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, D. P. **Alterações em comunidades recifais costeiras afetadas por impactos naturais e antrópicos**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas - Zoologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (2019). **Outorgas ANA**. Disponível em: <<http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=fa5b341124dc43778daa2a085d817217>> Acesso em: 01 maio.2019
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (2016). **Hidroweb: Séries Históricas**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf> />. Acesso em: 02 maio.2019
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA (2018). **Abastecimento Urbano de Água**. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=13>>. Acesso em: 15 fevereiro de 2020
- ALLEN, J. I.; Somerfield, P. J.; Gilbert, F. J. (2007) Quantifying uncertainty in high resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models. **Journal of Marine Systems**, v. 64, n. 1-4, p. 3–14. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.02.010>>.
- ANDUTTA, F. P. **O Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (Bahia):** Observações, simulações, tempo de residência e processos difusivo e advectivo. Tese (Doutorado em Oceanografia). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2011.
- ANDUTTA, F. P. et al. An assessment of transport timescales and return coefficient in adjacent tropical estuaries. **Continental Shelf Research**, v. 124, p. 49–62, 2016.
- ARANTES, R. C. M. **Geoprocessamento aplicado à modelagem ambiental em recifes de coral**. Tese (Doutorado em Geociências - Geologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- AZEVEDO, D. G. **Estudos da fragmentação da paisagem na definição de áreas prioritárias para a recuperação ambiental da bacia hidrográfica do rio Buranhém**, 2014. p. 29 -30. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente), 2014.
- BNDO. **Análise estatística e harmônica de 32 dias de observação da maré na estação maregráfica de Porto Seguro**. 1999. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/dados_de_mare/40154_-_porto_seguro_f41_padrao_v1-08.pdf>. Acesso em: 25 maio 2019.
- CAPO, S., BRENON, I., SOTTOLICHIO, A., CASTAING, P., GOULVEN, P. L. Tidal sediment transport versus freshwater flood events in the Konkouré Estuary, Republic of Guinea. **Journal of African Earth Sciences**, Oxford, v. 55, n. 1-2, p. 52-57, 2009.

CHANT, R.J. **Interactions between Estuaries and Coasts: River Plumes – Their Formation, Transport, and Dispersal**. In: Wolanski E and McLusky DS (eds.) *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Vol 2, pp. 213–235. Waltham: Academic Press, 2011.

CHAO, S. Y. **Wind-driven motion of estuarine plumes**. *J Phys Oceanogr*, 18(8): 1144–1166, 1988.

CHEN, S. N.; SANFORD, L. P. **Axial wind effects on stratification and longitudinal salt transport in an idealized, partially mixed estuary**. *Journal of Physical Oceanography*, 39(8): 1905–1920, 2009.

DELTARES. 3D/2D modelling suite for integral water solution, 710 p., 2014. Disponível em https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf

DUARTE, A. A. L. S. **Influência da hidrodinâmica em sistemas estuarinos sujeitos a eutrofização**. 2010. p. 14 - 53. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, 2005.

GEYER, W. R.; HILL, P. S.; KINEKE, G. C. **The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows**. *Continental Shelf Research*, 24(7–8): 927–949, 2004.

GOOGLE EARTH (2019). Imagens da região de Porto Seguro.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), **Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil**, 2010. Disponível em: <<http://www.atlasmar.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 27 maio 2019.

ISOBE, A. **Ballooning of river-plume bulge and its stabilization by tidal currents**. *Journal of Physical Oceanography*, 35(12): 2337–2351, 2005.

KAKOULAKI, G.; MACDONALD, D.; HORNER-DEVINE, A. R. **The role of wind in the near field and midfield of a river plume**. *Geophysical Research Letters*, Washington, v. 41, p. 5132–5138, 2014

HETLAND, R. D. **Relating river plume structure to vertical mixing**. *Journal of Physical Oceanography*, 35(9): 1667–1688, 2005.

LIMA, M. M. T. **Gestão portuária com subsídios de modelagem computacional para projetos de dragagem**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MACCREADY, P.M. **Toward a unified theory of tidally-averaged estuarine salinity structure**. *Estuaries* 27, 561–570, 2004.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), **Zona Costeira e Marinha**, 2019. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-aquatica/zona-costeira-e-marinha.html>>. Acesso em: 27 maio 2019.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

NASH, J.D., MOUM, J.N. **River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean**. *Nature* 437, 400–403. doi: 10.1038/nature03936, 2005.

NETO, S. P. G. C. **Uma análise da dicotomia entre urbanização e meio ambiente no município de Porto Seguro/BA**. *Revista Geografares*, n°11, p.60-86, junho, 2012.

NUNES, A. L. **Determinação das marés meteorológicas na região da baía do Espírito Santo e sua influência na drenagem de águas continentais**. 2007. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

OLIVEIRA, H.; FERNANDES, E.; JR MOLLER, O.; RODRIGUEZ, F. G. **Relationships between Wind Effect, Hydrodynamics and Water Level in the World's Largest Coastal Lagoonal System**. *Water* 2019, 11, 2209; doi:10.3390/w11112209;

PEREIRA, R. S. **Processos que regem a qualidade da água da Lagoa dos Patos, segundo o modelo Delft3D**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica - Hidroquímica). Universidade Federal do Rio Grande, 2003.

REDE DE METEOROLOGIA DO COMANDO DA AERONÁUTICA - REDEMET. **Consulta de mensagens automáticas**. 2019. Disponível em: <<http://www.redemet.aer.mil.br/>>. Acesso em: 2 maio de 2019.

ROCHA, M. **Intrusão salina no estuário do rio Buranhém (Sul da Bahia) através de modelagem numérica**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Ambientais). Universidade Federal do Sul da Bahia, Instituto Federal de Educação da Bahia, 2019.

SANTOS, L. **Modelagem numérica da dinâmica do sistema estuarino Caravelas-Peruípe, BA**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2010.

SEIBT, A. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do córrego botafogo – Goiânia – Go**. 2013. 48 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), 2013.

SEILER, L.; FIGUEIRA, R. C. L.; SCHETTINI, C. A. F.; SIEGLE, E. **Three-dimensional hydrodynamic modeling of the Santos-São Vicente-Bertioga estuarine system, Brazil**. Elsevier B.V. All rights reserved. *Regional Studies in Marine Science* 37 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101348>

SIEGLE, E.; COUCEIRO, M. A. A.; SOUZA, S. H. M.; FIGUEIRA, R. C. L.; SCHETTINI, C. A. F. **Shoreline Retraction and the Opening of a New Inlet: Implications on Estuarine Processes**. *Estuaries and Coasts* (2019) 42:2004–2019. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00635-w>

SILVA, A. C. R. de S.; BERNARDES, M. E. C.; ASSIREU, A. T.; SIEGLE, E.; SOUSA, P. H. G. O.; BROWN, D. **Hydrodynamics of a tropical estuary: Buranhém River, Porto Seguro, Brazil**. *RBRH*, v. 23, n. 0. (2018) <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0318170141>>.

SILVA, A. C. R. S. **Hidrodinâmica do estuário do rio Buranhém, Porto Seguro – Bahia**, 2016. p. 15 - 22. Dissertação (Mestrado em Meio ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Itajubá, 2016.

SILVA, A. F. **Características hidrográficas do estuário da Beira, Moçambique**. 2011. 4 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, G. M. F.; ZANCHI, F. B.; SILVA, J. B. L.; BERNARDES, M. E. C. (no prelo). **Disponibilidade Hídrica de uma Bacia Hidrográfica no Sul da Bahia**. Revista Brasileira de Geografia Física.

WILLIAMS, J. J.; ESTEVES, L. S. (2017) **Guidance on Setup, Calibration, and Validation of Hydrodynamic, Wave, and Sediment Models for Shelf Seas and Estuaries**. Advances in Civil Engineering. Article ID 5251902, p. 25. <<http://dx.doi.org/10.1155/2017/5251902>>

WILLMOTT, C. J. et al. (1985) **Statistics for the evaluation and comparison of models**. Journal of Geophysical Research: Oceans, v. 90, n. C5, p. 8995–9005. <<http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>>.

WARNER, J. C., GEYER, W. R., LERCZAK, J. A., 2005. **Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment**. Journal of Geophysical Research, 110 p., C05001, doi:10.1029/2004JC002691.