Francisco Thiago Franca Parente

Hidrodinâmica da Plataforma Continental da bacia Sergipe-Alagoas

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico
da Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Ciências, área de Oceanografia Física.

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Dottori

São Paulo

2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**Hidrodinâmica da Plataforma Continental da bacia
Sergipe-Alagoas**

Francisco Thiago Franca Parente

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de
Oceanografia Física.

Julgada em ____ / ____ / ____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

“A humildade é a chave que abre todas as portas.”

São Francisco de Assis

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xxiv
1 Introdução	1
1.1 Região de estudo	1
1.2 Estudos prévios da região	3
1.3 Considerações Teóricas	6
1.4 Objetivos	9
2 Material e Métodos	10
2.1 Conjunto de Dados	10
2.1.1 ATALAIA	10
2.1.2 PCM-9	11
2.1.3 PGA-7	12

2.1.4	Dados hidrográficos	12
2.2	Tratamento inicial dos dados	14
2.3	Funções Ortogonais Empíricas (EOF)	14
2.4	Análise espectral	15
2.5	Análise harmônica	16
2.6	Coeficiente de Correlação	18
2.7	Modelo Numérico	18
2.7.1	Descrição	18
2.7.2	Domínio	20
2.7.3	Condições Iniciais e de Contorno	22
2.7.4	Forçantes	22
2.7.5	Simulações	24
3	Resultados e Discussão	25
3.1	Dados observados	25
3.1.1	Hidrografia	25
3.1.2	Correntometria	31
3.1.2.1	Análise EOF	38
3.1.2.2	Análise espectral	45
3.1.2.3	Análise harmônica	53
3.1.3	Vento	57
3.1.3.1	Análise espectral	59
3.1.4	Coeficiente de Correlação	62
3.2	Modelo numérico	63

3.2.1	Validação	64
3.2.2	Simulações com maré (M)	70
3.2.3	Simulações com vento (V)	75
3.2.4	Simulações com descarga fluvial (R)	82
3.2.5	Simulações com maré e vento (MV)	91
3.2.6	Simulações com maré e descarga fluvial (MR)	94
3.2.7	Simulações com vento e descarga fluvial (VR)	97
3.2.8	Simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR)	104
4	Conclusões	108
	Referências Bibliográficas	111

Agradecimentos

Início os agradecimentos com um muito obrigado à todos os membros da minha família, em especial ao meu pai Letácio, à minha mãe Regina, às minhas irmãs Erica e Evelyn e, até mesmo, à minha cadelinha Lua pelas suas recepções calorosas ao me ver voltar pra casa. Sou grato a vocês pelas orações constantes, conversas, conselhos e pelo carinho de sempre. Este período longe de casa foi muito penoso e não teria prosseguido sem o apoio de cada um de vocês.

Ao meu orientador, Professor Marcelo Dottori, agradeço por ter me recebido de braços abertos e por ter sido um grande exemplo de profissional. Professor, muito obrigado pelos ensinamentos que você (“senhor não, por favor”) me passou e por me incentivar a prosseguir no ramo da pesquisa científica. Apesar da agenda super lotada, você se mostrou presente e participativo. Sou grato por toda a energia que você direcionou para que o meu trabalho fosse bem sucedido. Agradeço também, a Fabiana por ter sido tão prestativa e atenciosa.

Agradeço aos professores das disciplinas que cursei pelos conhecimentos que me passaram. Professor Belmiro, pela serenidade e organização ao compartilhar sua experiência na área de oceanografia. Professor Ilson, pelo exemplo de disciplina e dedicação à pesquisa científica. Professor Joseph, por ter esclarecido todas as minhas dúvidas quanto à modelagem numérica - uma das minhas principais ferramentas de trabalho - de uma forma simples e clara. Aos Professores Paulo Polito e Olga, por me mostrarem na prática o que, até então, só havia visto em equações e ilustrações.

Vale ressaltar, que este trabalho foi realizado graças ao subsídio fornecido pela CAPES e ao apoio da PETROBRAS, empresa que coletou e disponibilizou grande parte dos dados que foram avaliados e que financiou parte da pesquisa. Estes dados foram

coletados no âmbito do Projeto de Caracterização Regional da bacia Sergipe-Alagoas realizado em convênio com o Departamento de Oceanografia Física da Universidade de São Paulo.

Gostaria de agradecer aos meus fiéis companheiros(as) de café e bate-papo pós almoço, Ana Paula, Letícia, Daniel, Eder, Nilsson e Fátima, pelos momentos de descontração que tornaram os meus dias mais leves dentro do Instituto e pelos lanches mais burgueses que já tive. Em especial, agradeço à Ana Paula e à Letícia por todo o carinho e pelos inúmeros conselhos que me deram.

Aos meus amigos de turma, agradeço pelo suporte que me auxiliou na finalização deste mestrado. Cabeção, PedroXINHO, Rafinha, Leandro e Pipizinho, foi ótimo estudar com vocês! Sentirei saudades de cada noite não dormida, das madrugadas de resolução de provas e exercícios, das risadas e das cervejas pré,durante e pós disciplinas. Meu amigo Comandante, você se tornou parte integrante desta turma. Um grande presente que tivemos nesse período! Obrigado pelo exemplo de humildade e companheirismo e por não deixar o Leandro medir a pressão atmosférica no laboratório.

Agradeço a todos os membros do LHiCo pelo apoio na pesquisa e por tornar o laboratório um ambiente mais descontraído. Danilo, Paulinha, Zero, Leitão, Carine e demais, muito obrigado por tudo. Espero poder trabalhar com vocês novamente! Obrigado também, aos membros do LADO, Pinguim, Portuga, Iuryzim e Patola, pelo suporte durante a minha pesquisa e pelas melhores piadas do DOF.

Muito obrigado à minha amiga Patrícia e toda sua família, Ana Cláudia, Clayton e Victor, por terem me recebido tão bem nas minhas idas ao Rio de Janeiro ao longo desses dois anos. Espero poder retribuir todo carinho, atenção e apoio que vocês me passaram neste período. Às minhas amigas Larinha e Ninoca agradeço por também me receberem no RJ e por serem ótimas companhias.

Quero agradecer aos meus grandes amigos da República pelos melhores momentos que vivenciei em São Paulo. Esdras (Doc), Marileide, Marcel, Gugu, Gizelda, Tiagão, Lu, Veri, Dassa, Eri, Vick, Léo e demais, vocês se tornaram uma grande família para mim! Levarei ótimas lembranças de todos vocês.

Agradeço aos meus amigos Lucas Sabino, Mateus, Ramalho, Dorian e Txai por me proporcionarem momentos de descontração e muita gratidão nas minhas idas à Fortaleza. Mesmo longe, vocês foram essenciais para que eu prosseguisse com as atividades no mestrado, através de mensagens e ligações.

Por fim, quero agradecer a Deus por estar sempre comigo. Gratidão enorme por tudo que ele me proporcionou e por nunca deixar minha fé se abalar.

Resumo

Este trabalho é parte integrante do Projeto de Caracterização Regional da baía Sergipe-Alagoas, realizado em convênio entre a Petrobras e o Laboratório de Hidrodinâmica Costeira do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, que visou caracterizar a circulação da baía Sergipe-Alagoas em escala regional. Foram coletados dados meteo-oceanográficos no período entre 2012 e 2015. Foram analisados dados de três fundeios correntográficos, duas estações meteorológicas e vinte estações hidrográficas. Esta análise incluiu: análise por Funções Empíricas Ortogonais, análise espectral, análise harmônica e correlação. Ainda, foram realizadas simulações numéricas, onde se considerou um oceano homogêneo, que contemplaram o vento, a maré e o aporte fluvial como forçantes do domínio. Os resultados mostraram uma plataforma continental praticamente homogênea, onde há um forte ciclo sazonal para as correntes e para o vento, com menores intensidades durante o verão e o outono e maiores intensidades durante o inverno e a primavera. Quanto à hidrodinâmica, determinou-se que o modo barotrópico é dominante, seguido pelos 1º e 2º modos baroclínicos, nesta ordem. Quanto às forçantes, constatou-se que a maré é a menos significativa para a circulação residual da região, onde a componente semidiurna M2 se destaca como mais energética. Ainda, detectou-se o predomínio do vento sobre a circulação da PCSEAL durante o inverno e a primavera. Nas demais estações, supõe-se uma competição entre as descargas fluviais e a tensão de cisalhamento do vento sobre a circulação da PCSEAL.

Palavras-chave: circulação costeira, modelagem numérica, baía Sergipe-Alagoas.

Abstract

This work is part of the project “*Caracterização Regional da bacia de Sergipe-Alagoas*” supported by PETROBRAS in association with the Coastal Hydrodynamic Laboratory (LHiCo) of the University of Sao Paulo. This project aimed to characterize the Sergipe-Alagoas basin circulation on a regional scale. Meteo and ocean datas were collected from 2012 to 2015, including three current meter moorings, two meteorological stations and twenty hidrographic stations. The analysis includes Empirical Ortogonal Functions, spectral, harmonic and correlations analysis. The Numerical simulations are also developed, employing a homogenous ocean with wind, tides and river discharges forcings. The results show a homogeneous continetal shelf with a significant seasonal cycle for the currents and winds, with minimum values in the summer and fall, and maximum values in the winter and spring. It is show from the Empirical Ortogonal Function analysis, that the barotropic mode is dominant over the Sergipe-Alagoas shelf circulation, followed by the first and second baroclinic modes, in this order. About the forcings, the wind stress drives the shelf circulation in winter and spring. The other seasons has a supposed dispute between river discharges and wind stress. The tide is dominated by the component M2 and it is the least significant for the residual circulation over the Sergipe-Alagoas shelf.

Keywords: coastal circulation, numerical modeling, Sergipe-Alagoas’s bay.

Lista de Figuras

- 1.1 Área de estudo com as isóbatas de 50, 1000, 2000 e 4000 metros, onde se destacam os Cânions São Francisco e Japarutuba. 2
- 1.2 Gráfico de migração meridional da Zona de Convergência Intertropical, representada pelas isolinhas de valor zero, o que representa um valor nulo para a componente meridional da tensão de cisalhamento do vento. Nobre e Shukla (1996) avaliaram a migração para três condições: (i) climatologia (linha sólida); (ii) períodos onde a porção Norte do Atlântico Tropical está com a temperatura da superfície do mar mais fria do que a média do Atlântico Tropical e a porção Sul mais quente (linha tracejada); (iii) períodos onde o padrão da temperatura da superfície do mar é inverso ao anterior (linha pontilhada). Fonte: (NOBRE; SHUKLA, 1996). 5
- 2.1 Localização dos fundeios Atalaia (estrela), PGA-7 (x) e PCM-9 (+) e das estações hidrográficas (triângulos) realizadas sobre a PCSEAL. Vale ressaltar que as 10 estações hidrográficas dispostas (triângulos) foram realizadas em ambos os cruzeiros realizados (MARSEAL01 e MARSEAL02), o que totaliza 20 estações hidrográficas. 13
- 2.2 Pontos molhados da grade e batimetria utilizada no modelo sECOM para a PCSEAL. Os três pontos pretos indicam os três pontos de descarga fluvial considerados nas simulações que contemplaram esta forçante. 21
- 3.1 Perfis de temperatura potencial (esquerda) e salinidade (direita) nas 10 estações sobre a PCSEAL para a Campanha MARSEAL01. 26

3.2	Seção longitudinal de temperatura para a Campanha MARSEAL01. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de temperatura potencial ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem. . .	27
3.3	Seção longitudinal de salinidade para a Campanha MARSEAL01. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de salinidade ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem.	28
3.4	Perfis de temperatura potencial (esquerda) e salinidade (direita) nas 10 estações sobre a PCSEAL para a Campanha MARSEAL02.	29
3.5	Seção longitudinal de temperatura potencial para a Campanha MARSEAL02. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de temperatura ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem. . .	29
3.6	Seção longitudinal de salinidade para a Campanha MARSEAL02. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de salinidade ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem.	30
3.7	Diagramas TS para as Campanhas MARSEAL01 (esquerda) e MARSEAL02 (direita), onde os pontos pretos representam os dados coletados nas estações e as linhas pontilhadas representam a densidade potencial (σ^0).	31
3.8	Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C1 (16/10/2013 a 17/12/2013) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.	31

3.9	Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C2 (18/12/2013 a 04/02/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.	32
3.10	Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C3 (04/02/2014 a 19/03/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.	32
3.11	Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C6 (13/08/2014 a 13/10/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.	32
3.12	Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C7 (13/10/2014 a 12/12/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.	33
3.13	Rosa de distribuição das correntes para o fundeio PGA-7 durante o período de 19/04/2014 a 17/06/2015	36
3.14	Rosa de distribuição das correntes para o fundeio PCM-9 durante o período de 19/03/2012 a 17/06/2015.	37
3.15	Média mensal de corrente para o fundeio PCM-9 e os respectivos desvios-padrões de cada mês (sombreado).	38
3.16	Porcentagem da variância explicada por cada um dos modos estatísticos calculados pela EOF (linha contínua preta) e o limite de significância estatística (linha pontilhada vermelha) calculado pelas simulações de Monte Carlo, onde os modos acima deste possuem intervalo de confiança acima de 95%.	40
3.17	Estruturas verticais dos 3 primeiros modos estatísticos, onde os gráfico superiores são referentes à componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam à componente paralela à linha de costa (v). Da esquerda para a direita as diversas campanhas do fundeio ATALAIA	42

3.18	Componente Principal da 1ª EOF (modo Barotrópico) para todas as Campanhas do fundeio ATALAIA. Os gráficos da esquerda representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os da direita representam a componente paralela à linha de costa (v). De cima para baixo, tem-se os gráficos referentes às Campanhas C1, C2, C3, C6 e C7.	43
3.19	Componente Principal da 2ª EOF (1º modo Baroclínico) para todas as Campanhas do fundeio ATALAIA. Os gráficos da esquerda representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os da direita representam a componente paralela à linha de costa (v). De cima para baixo, tem-se os gráficos referentes às Campanhas C1, C2, C3, C6 e C7.	44
3.20	Componente Principal da 3ª EOF (2º modo Baroclínico) para todas as Campanhas. Os gráficos da esquerda representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os da direita representam a componente paralela à linha de costa (v). De cima para baixo, tem-se os gráficos referentes às Campanhas C1, C2, C3, C6 e C7.	45
3.21	Espectros que compõem o sinal da 1ª EOF (modo Barotrópico) para todas as Campanhas. Os painéis superiores representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam a componente paralela à linha de costa (v).	47
3.22	Espectros que compõem o sinal da 2ª EOF (1º modo Baroclínico) para todas as Campanhas. Os painéis superiores representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam a componente paralela à linha de costa (v).	48
3.23	Espectros que compõem o sinal da 3ª EOF (2º modo Baroclínico) para todas as Campanhas. Os painéis superiores representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam a componente paralela à linha de costa (v).	49
3.24	Espectros das correntes paralela (superior) e perpendicular (inferior) à costa para o fundeio PGA-7.	51

3.25	Espectros das correntes paralela (superior) e perpendicular (inferior) à costa para o fundeio PCM-9.	52
3.26	Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C1 (16/10/2013 a 17/12/2013). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).	53
3.27	Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C2 (18/12/2013 a 04/02/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).	53
3.28	Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C3 (04/02/2014 a 19/03/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).	54
3.29	Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C6 (13/08/2014 a 13/10/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).	54
3.30	Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C7 (13/10/2014 a 12/12/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).	54
3.31	Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 no fundeio PGA-7 (19/04/2014 a 17/06/2015).	56

3.32	Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 no fundeio PCM-9 (19/03/2012 e 17/06/2015).	56
3.33	Rosa de distribuição dos ventos para a estação meteorológica da plataforma PCM-9. Note que, diferente das rosas apresentadas para as correntes, as direções representam a origem do vento.	57
3.34	Rosa de distribuição dos ventos para a estação meteorológica da plataforma PGA-7. Note que, diferente das rosas apresentadas para as correntes, as direções representam a origem do vento.	58
3.35	Média mensal de vento para o fundeio PCM-9 e os respectivos desvios-padrões de cada mês (sombreado).	59
3.36	Espectros para as componentes do vento perpendicular (acima) e paralela (abaixo) à linha de costa para a estação meteorológica da plataforma PGA-7.	60
3.37	Espectros para as componentes do vento perpendicular (acima) e paralela (abaixo) à linha de costa para a estação meteorológica da plataforma PCM-9.	61

- 3.38 No painel superior está exposta a série temporal da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) empregada na simulação numérica, para o ponto de grade próximo ao fundeio ATALAIA, produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. Em função da ausência de dados meteorológicos coletados no ponto do fundeio ATALAIA, não foi possível comparar esta série temporal com dados observacionais. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de março de 2014. Para este período, a partir do dia 20 não houve medição de corrente no fundeio ATALAIA, devido à problemas operacionais. 65
- 3.39 No painel superior estão expostas as séries temporais da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) para a estação meteorológica da plataforma PCM-9 (linha tracejada preta) e para o vento empregado na simulação numérica (linha sólida cinza), sendo este último referente ao ponto de grade próximo ao fundeio PCM-9. O vento empregado na simulação é produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de março de 2014. . . . 66

- 3.40 No painel superior estão expostas as séries temporais da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) para a estação meteorológica da plataforma PCM-9 (linha tracejada preta) e para o vento empregado na simulação numérica (linha sólida preta), sendo este último referente ao ponto de grade próximo ao fundeio PCM-9. O vento empregado na simulação é produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de julho de 2014. . . . 67
- 3.41 No painel superior está exposta a série temporal da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) empregada na simulação numérica, para o ponto de grade próximo ao fundeio ATALAIA, produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. Em função da ausência de dados meteorológicos coletados no ponto do fundeio ATALAIA, não foi possível comparar esta série temporal com dados observacionais. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de setembro de 2014. . 68

3.42	No painel superior estão expostas as séries temporais da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) para a estação meteorológica da plataforma PCM-9 (linha tracejada preta) e para o vento empregado na simulação numérica (linha sólida preta), sendo este último referente ao ponto de grade próximo ao fundeio PCM-9. O vento empregado na simulação é produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de setembro de 2014. .	69
3.43	Séries temporais para as diferenças entre os dados observacionais e os dados de saída do modelo numérico para componente da corrente paralela à linha de costa.	70
3.44	Média temporal (46 dias) da corrente integrada verticalmente para a simulação de Maré (M) referente ao mês de março de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade.	72
3.45	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa para a simulação de Maré (M) referente ao mês de março de 2014. No canto inferior direito de cada mapa está indicado o máximo de variância encontrado. Da esquerda para a direita, tem-se a variância na superfície, no meio da coluna d'água e no fundo, nesta ordem.	72
3.46	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa para a simulação com Maré (M) referente ao mês de março de 2014. No canto inferior direito de cada mapa está indicado o máximo de variância encontrado. Da esquerda para a direita, tem-se a variância na superfície, no meio da coluna d'água e no fundo, nesta ordem.	73

3.47	Seções transversais à linha de costa da componente da corrente residual paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com Maré (M) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas sólidas indicam uma corrente que flui deixando a costa à esquerda, enquanto que as linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	74
3.48	Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com vento (V) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).	76
3.49	Variâncias ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com vento (V) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	77
3.50	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para a simulação V referente aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	77
3.51	Variância ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$) da componente do vento perpendicular à linha de costa para as simulações com vento (V) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014 para a PCSEAL. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	78
3.52	Variância ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$) da componente do vento paralela à linha de costa para as simulações com vento (V) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014 para a PCSEAL. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	79

3.53	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento (V) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	80
3.54	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento (V) referente ao mês de julho de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	81
3.55	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento (V) referente ao mês de setembro de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	82
3.56	Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com descarga fluvial (R) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).	84
3.57	Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com descarga fluvial (R) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014 que não contemplaram a vazão do rio São Francisco. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}). Os mapas ficaram restritos à região próxima aos rios Sergipe e Vaza Barris para uma melhor visualização.	85
3.58	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com descarga fluvial (R) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	86

3.59	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com descarga fluvial (R) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	87
3.60	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com descarga fluvial (R) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	88
3.61	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com descarga fluvial (R) referente ao mês de julho de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	89
3.62	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com descarga fluvial (R) referente ao mês de setembro de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	90

3.63	Evolução temporal da pluma do rio São Francisco (linha de salinidade igual a 36,5), com o tempo inicial (01/03/2014) representado pela linha preta contínua e o tempo final (31/03/2014) pela linha preta pontilhada. Os vetores indicam a direção e intensidade da média temporal da corrente integrada verticalmente. As linhas cinzas contínuas representam as isóbatas de 50, 1000 e 2000 m	91
3.64	Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com maré e vento (MV) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).	93
3.65	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com maré e vento (MV) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	94
3.66	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com maré e vento (MV) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	94
3.67	Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com maré e descarga fluvial (MR) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).	95
3.68	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com maré e descarga fluvial (MR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	96
3.69	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com maré e descarga fluvial (MR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	96

3.70	Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com vento e descarga fluvial (VR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).	98
3.71	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com vento e descarga fluvial (VR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	99
3.72	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com vento e descarga fluvial (VR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	100
3.73	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento e descarga fluvial (VR) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	101
3.74	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento e descarga fluvial (VR) referente ao mês de julho de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	102

3.75	Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento e descarga fluvial (VR) referente ao mês de setembro de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.	103
3.76	Evolução temporal da pluma do rio São Francisco, com o tempo inicial representado pela linha preta contínua e o tempo final pela linha preta pontilhada. Os vetores indicam a direção e intensidade da média temporal da corrente integrada verticalmente. As linhas cinzas contínuas representam as isóbatas de 50, 1000 e 2000 m	104
3.77	Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).	105
3.78	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	106
3.79	Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.	106

Lista de Tabelas

2.1	Campanhas bem sucedidas e seus respectivos períodos para o fundeio Atalaia.	11
2.2	Período de coleta e localização dos dados meteo-oceanográficos disponibilizados pela PETROBRAS para análise neste trabalho.	12
2.3	Principais constituintes harmônicas diurnas e semidiurnas de maré (JOHNS, 1983)	17
2.4	Vazões médias mensais, referentes aos períodos escolhidos para o estudo numérico da circulação sobre a PCSEAL, fornecidas pelo INMET para os três rios considerados nas simulações.	23
2.5	Simulações numéricas realizadas com suas respectivas siglas, suas forçantes consideradas e seus campos de temperatura e salinidade. A estratificação mencionada é consequência, somente, da contribuição do aporte fluvial.	24
3.1	Estatística básica para a componente perpendicular à linha de costa de corrente na superfície, meio e fundo de todas as Campanhas do fundeio ATALAIA.	34
3.2	Estatística básica para a componente paralela à linha de costa de corrente na superfície, meio e fundo de todas as Campanhas do fundeio ATALAIA.	35
3.3	Modos estatísticos discretos (EOF) para a componente perpendicular à linha de costa e suas respectivas porcentagens em relação à variância do sinal.	39

3.4	Modos estatísticos discretos para a componente da corrente paralela à linha de costa e suas respectivas porcentagens em relação à variância do sinal para as campanhas do fundeio ATALAIA.	41
3.5	Correlação entre a componente da corrente paralela à linha de costa ($v_{corrente}$) e as componentes do vento paralela (v_{vento}) e perpendicular (u_{vento}) à linha de costa, para todas as Campanhas do fundeio ATALAIA e para a plataforma PCM-9.	63

Capítulo 1

Introdução

1.1 Região de estudo

A Bacia de Sergipe e Alagoas (SEAL) está situada na margem continental do nordeste do Brasil, aproximadamente entre 9° e $11^{\circ} 30'$ de latitude sul, onde ocupa o litoral dos estados que a nomeiam (Figura 1.1). A Plataforma Continental da SEAL (PCSEAL) se estende por cerca de 370 km, com uma orientação de aproximadamente 40° no sentido horário com relação ao norte geográfico. Define-se a PCSEAL como uma plataforma continental estreita, com largura de cerca de 18 km no extremo sul e de 42 km na extremidade norte. A maior parte da sua região não ultrapassa os 40 metros de profundidade, com topografia significativamente acidentada, onde se destaca a presença de dois cânions praticamente perpendiculares à linha costa, o de Japaratuba e o de São Francisco (SUMMERHAYES; FAINSTEIN; ELLIS, 1976).

Ao longo do talude da PCSEAL flui, com características de uma Corrente de Contorno Oeste (CCO), a Subcorrente Norte do Brasil (SNB) em direção ao equador, com seu núcleo em subsuperfície a uma profundidade de, aproximadamente, 140 metros (SILVEIRA; MIRANDA; BROWN, 1994). Segundo Loder, Boicourt e Simpson (1998), ao tratarmos de uma plataforma continental margeada por uma CCO, tem-se, basicamente, dois fatores principais que determinam a influência da CCO sobre os movimentos que ocorrem na plataforma continental, são eles: a largura da plataforma

continental e a sua proximidade com a CCO. Entretanto, não há observações, nesta região, capazes de validar a dinâmica proposta por Loder, Boicourt e Simpson (1998), devido ao caráter peculiar da SNB de fluir em subsuperfície.

Figura 1.1: Área de estudo com as isóbatas de 50, 1000, 2000 e 4000 metros, onde se destacam os Cânions São Francisco e Japarutuba.

Na porção do Atlântico Sudoeste Tropical, onde está inserida a PCSEAL, encontra-se, em geral, uma estrutura de massas de águas formada pelo empilhamento, da superfície até o fundo, das massas de água: Água Tropical, Água Central do Atlântico Sul, Água Intermediária Antártica, Água Circumpolar Superior, Água Profunda do Atlântico Norte, Água Circumpolar Inferior e Água de Fundo Antártica (MÉMERY et al., 2000; REID, 1989). Dentre estas, a Água Tropical se destaca pelos valores elevados de salinidade. Schott et al. (2005) realizaram 5 estações hidrográficas na latitude de 11°S, coincidente com a SEAL, e outras 9 estações na latitude de 5°S e verificaram que a água superficial mais salina apresentou uma diminuição da salinidade da latitude de 11°S para a de 5°S.

Ao se tratar da faixa mais rasa da PCSEAL, destaca-se a presença do Rio São Francisco, como principal bacia de drenagem. Este possui extensão de 2.700 km e uma área de aproximadamente 640.000 km². O Rio São Francisco deságua na divisa entre os estados de Sergipe e Alagoas. Sua vazão e, conseqüentemente, sua atuação sobre a PCSEAL sofreram reduções consideráveis nas últimas três décadas. Knoppers et al. (2006) associaram esta redução à construção de inúmeras barragens ao longo do curso do rio e observaram uma vazão média anual, no período pré-barragem (1938-1973), de aproximadamente $3010 \pm 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e de $1760 \pm 235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre 1995 a 2006.

Em virtude do grande potencial como reserva de hidrocarbonetos, a PCSEAL se encontra no contexto de ativa exploração de óleo e gás. De fato, esta região foi a primeira do Brasil a se realizar a exploração de petróleo no mar. Segundo o anuário estatístico realizado pela Agência Nacional do Petróleo, foram produzidos 849,6 milhões de m³ de gás natural e cerca de 3.089.000 barris de petróleo no ano de 2015.

Em contrassenso, apesar desta importância econômica, não há trabalhos na literatura atual que abordem a circulação oceânica sobre a PCSEAL. Com isto, torna-se imprescindível a elaboração de pesquisas que visem o conhecimento das condições hidrodinâmicas desta região.

Neste cenário, com o propósito de caracterizar em escala regional a SEAL, a Petrobras dispõe do Projeto de Caracterização Regional da bacia de Sergipe-Alagoas (PCR-SEAL). Neste projeto, foram coletados dados entre 2012 e 2015, onde se abrangeu o regime de ventos e correntes e a realização de estações hidrográficas. Tais dados foram disponibilizados para análise no Laboratório de Hidrodinâmica Costeira do Instituto Oceanográfico da USP (LhiCo-IOUSP), de forma a auxiliar o conhecimento das condições meteo-oceanográficas da PCSEAL.

1.2 Estudos prévios da região

Os poucos estudos publicados que abordam a PCSEAL tratam de aspectos distintos da região como, por exemplo, descrições geológicas (SUMMERHAYES; FAINSTEIN; ELLIS, 1976; MOHRIAK; BASSETTO; VIEIRA, 1998) e processos biológicos (KOUT-

SOUKOS; HART, 1990; ARAUJO, 2006; LIMA et al., 2011), porém não abordam aspectos hidrodinâmicos. Os poucos trabalhos sobre a circulação na SEAL focam na dinâmica do talude e oceano aberto, principalmente no que se refere à SNB (SILVEIRA; MIRANDA; BROWN, 1994; SOUTELINO et al., 2011; GOES et al., 2005). Dentre os poucos trabalhos que abordam a região da PCSEAL, Santos (2007) sugere uma maré semi-diurna na região com uma variação de 1,5 m durante os períodos de quadratura e 2,5 m durante os períodos de sizígia. Entretanto, este autor não trata das correntes geradas pela maré.

A lacuna no conhecimento sobre a dinâmica da PCSEAL não está restrita à falta de estudos que abordem as correntes de maré. Tem-se, também, ausência de estudos da resposta da circulação ao vento e à influência da SNB. Quanto à circulação atmosférica da região, Nobre e Shukla (1996) estudaram a dinâmica com foco na larga escala e concluíram que anomalias de temperatura da superfície do mar e o caráter assimétrico do estresse do vento, na região equatorial, representam o modo dominante para variabilidade interanual na região do Atlântico Tropical. Ainda, os autores avaliaram o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), região onde a componente meridional da tensão de cisalhamento do vento é nula, para a longitude de 30° W do Atlântico Tropical. Os autores constataram um forte ciclo sazonal da ZCIT, com o posicionamento desta mais ao sul (2° S) durante o primeiro semestre, mais especificamente entre os meses de Fevereiro e Abril, e uma migração para Norte a partir de Abril, onde no mês de agosto assume a posição mais ao Norte, próxima de 11° N (Figura 1.2). Uma vez que a PCSEAL está inserida na faixa tropical do Atlântico Sul, sabe-se que há uma influência significativa deste padrão sazonal de deslocamento da ZCIT sobre a circulação atmosférica desta região.

Figura 1.2: Gráfico de migração meridional da Zona de Convergência Intertropical, representada pelas isolinhas de valor zero, o que representa um valor nulo para a componente meridional da tensão de cisalhamento do vento. Nobre e Shukla (1996) avaliaram a migração para três condições: (i) climatologia (linha sólida); (ii) períodos onde a porção Norte do Atlântico Tropical está com a temperatura da superfície do mar mais fria do que a média do Atlântico Tropical e a porção Sul mais quente (linha tracejada); (iii) períodos onde o padrão da temperatura da superfície do mar é inverso ao anterior (linha pontilhada). Fonte: (NOBRE; SHUKLA, 1996).

Ainda em relação a circulação atmosférica, Costa e LYRA (2012) avaliaram dados de intensidade e direção do vento coletados em três regiões distintas (litoral, agreste e sertão) do estado de Alagoas. Os autores observaram que a velocidade do vento tende a aumentar à medida que se aproxima do verão, com pico máximo na primavera (setembro), e tende a diminuir à medida que se aproxima do inverno, com pico mínimo no outono (abril). Para o litoral, entre o período de 12/2007 a 11/2008, o autor observou uma direção média do vento, predominantemente, entre E e SE e uma velocidade média de $5,3 \pm 0,8 \text{ m.s}^{-1}$. Por fim, os autores encontraram uma média mensal máxima de $6,7 \text{ m.s}^{-1}$ para o mês de setembro e uma média mensal mínima de $3,9 \text{ m.s}^{-1}$ no mês de abril.

1.3 Considerações Teóricas

Nas décadas de 80 e 90, houve grandes avanços no conhecimento da dinâmica que ocorre sobre a plataforma continental. Estes avanços ocorreram em virtude de inúmeros estudos realizados para a porção norte dos oceanos, dentre estes, pode-se citar Csanady (1974), Gill e Schumann (1974), Csanady (1978), Kao (1981) e Clarke e Brink (1985). Ao abordar os movimentos sobre a plataforma continental, o trabalho realizado por Gill e Schumann (1974) é, provavelmente, um dos mais citados, onde os autores estudaram ondas de plataforma continental forçadas por uma forçante atmosférica de baixa frequência. Os autores consideraram um regime barotrópico sem atrito para uma plataforma continental inclinada e elaboraram um sistema de equações que, em posse das informações meteorológicas apropriadas, é capaz de prever mudanças na elevação da superfície do mar.

Csanady (1974) estudou a resposta barotrópica de uma plataforma continental inclinada à ação do vento e a um gradiente de pressão externo para diferentes modelos de plataforma continental. Em primeiro caso, o autor estudou os movimentos para uma condição sem o atrito de fundo, onde observou que a ação de um vento paralelo à linha de costa gera correntes ao longo da costa mais significativas se comparadas ao caso da ação do vento perpendicular à linha de costa. Com o vento perpendicular à linha de costa, a força de Coriolis é a única força capaz de acelerar os movimentos ao longo da costa. Porém, como o continente impede de forma significativa os movimentos perpendiculares à linha de costa, a força de Coriolis não se torna relevante. Já para o vento paralelo, o autor observou uma solução semelhante à solução encontrada por Charney (1955), o *“coastal jet”*, somada a um segundo termo, porém menos significativo, que o autor denominou como *“shelf jet”*. Este autor, também observou que, para a região da plataforma continental, uma aproximação sem os termos de atrito de fundo não fornece uma situação realística. Ao considerar o atrito de fundo, o autor concluiu que próximo à costa predomina o balanço entre o estresse do vento e os termos de atrito, enquanto que longe da costa este balanço ocorre entre o estresse do vento e a deriva de Ekman. Outra importante conclusão encontrada para os estudos de dinâmica da plataforma continental foi a definição da condição de contorno $\eta = 0$ para

a borda externa da plataforma continental, sendo η a elevação da superfície do mar. Esta configuração se mostrou razoável para um modelo friccional de plataforma continental típica, posto que se verificou que a ação de um gradiente de pressão externo, imposto por uma elevação do nível do mar na região fora da plataforma continental, não contribui significativamente para os movimentos sobre o plataforma continental.

Com o auxílio de um modelo mais robusto, ao se considerar a influência das ondas superficiais sobre o atrito de fundo, Clarke e Brink (1985) estudaram a resposta da plataforma continental à ação de um vento sinusoidal com período de poucos dias a poucas semanas. Os principais resultados encontrados por esses autores foram: (i) o critério para que a resposta da plataforma continental a ação do vento sinusoidal seja considerada puramente barotrópica, que está relacionado com frequência de Brunt-Vaisala e o parâmetro de Coriolis; (ii) e que a influência das ondas superficiais sobre o atrito pode afetar significativamente os fluxos de baixa frequência e larga escala. Os autores realizaram comparações do modelo utilizado com os dados coletados pelo *Coastal Ocean Dynamics Experiments* na região norte da plataforma continental da Califórnia e constataram, em ambos, a polarização do campo de velocidade na direção paralela à linha de costa e uma alta correlação deste com flutuações do campo de ventos ao longo da costa.

Csanady (1978) estudou a resposta da plataforma continental a intrusão de um fluxo de água doce proveniente da costa, ao propor um modelo com o desacoplamento da equação da difusão da equação do momento e tratar a estratificação de salinidade como uma forçante externa. Ainda, o autor considerou uma plataforma homogênea ($\rho_0 = \text{constante}$, onde ρ_0 é a densidade) sobre a ação de um fluxo de água doce que gera uma variação na densidade igual a ρ' , onde $\rho' \ll \rho_0$. O autor considerou estas idealizações adequadas para as condições de inverno na plataforma continental leste da América do norte, onde a ação da maré e a presença de tempestades intensificam os processos de mistura. Assim, a influência do aporte fluvial ficou, de certa forma, restrita à uma contribuição na elevação da superfície do mar na região de influência deste. Desta forma, ao final do estudo, o modelo se reduziu ao modelo de Ekman, com um gradiente de pressão associado à costa, devido à contribuição da fonte externa de água doce. Em resposta a este gradiente, é gerado um fluxo geostrófico paralelo à costa

que flui para sul (norte) na superfície e para a direção oposta no fundo, ao se considerar o hemisfério norte (hemisfério sul).

Em posse de um modelo mais complexo, onde se utilizou a equação de difusão acoplada a equação de Navier-Stokes, Kao (1981) visou elucidar a importância do transporte perpendicular à linha de costa, causado por uma frente de baixa salinidade, para as características da circulação na plataforma continental. Como principais resultados, o autor encontrou que na direção perpendicular à linha de costa ocorre o balanço geostrófico entre o gradiente de pressão, causado pela variação de densidade perpendicular à linha de costa, e a força de Coriolis, devido às correntes paralelas à linha de costa. Já na direção paralela à linha de costa, mais fatores entram em jogo para o equilíbrio da corrente, são estes: a força de Coriolis, em função da circulação perpendicular à linha de costa, o atrito com o fundo e as forças inerciais, devido aos termos não lineares de advecção.

Análogo ao encontrado por Csanady (1978), Kao (1981) observou que, ao considerar a circulação gerada pelo aporte fluvial sobre a plataforma continental leste da América do norte, tem-se a corrente em superfície paralela à linha de costa com um fluxo em direção ao equador, com um pico na região onde os gradientes horizontais de densidade são mais intensos. Neste artigo, uma das principais colaborações para o conhecimento da dinâmica de plataforma continental foi considerar uma dinâmica das correntes perpendiculares à linha de costa como linear e das correntes paralelas à linha de costa é não linear.

Neste contexto, é crucial esclarecer as principais características que distinguem a hidrodinâmica sobre a plataforma continental dos movimentos que ocorrem no oceano profundo. Pode-se citar três aspectos fundamentais da plataforma continental: a presença da costa como uma barreira intransponível, pequenas profundidades e pequenos volumes. A presença da costa é causa da divergência unilateral no sentido perpendicular à linha de costa, o que gera maiores elevações, comparadas às encontradas em regiões oceânicas. Com isto, os processos de convergência e divergência não dependem mais do rotacional da tensão de cisalhamento do vento para ocorrerem, como acontece no oceano profundo.

Quanto as baixas profundidades, estas são reponsáveis pela maior interação dos movimentos sobre a plataforma continental com sua topografia, o que torna o efeito do atrito mais significativo, como demonstrado por Csanady (1974), se comparado com o oceano profundo. Desta forma, o cisalhamento vertical é mais relevante para os processos dinâmicos que ocorrem sobre a plataforma continental do que no oceano profundo. Ao mesmo tempo que, o pequeno volume característico da plataforma continental é causa da acentuação dos processos de mistura nesta região.

1.4 Objetivos

A hipótese científica deste trabalho é que o vento sinótico é o maior gerador de movimento na dinâmica na PCSEAL. Desta forma, a fim de comprovar a hipótese defendida, os objetivos almejados são:

- Caracterizar a dinâmica na PCSEAL em termos de suas principais frequências através da análise dos dados coletados durante o PCR-SEAL;
- Hierarquizar a ação das forçantes, através de análises estatísticas dos dados in situ;
- Estudar as respostas hidrodinâmicas da PCSEAL à ação do vento, da maré e do aporte fluvial por intermédio de modelagem numérica.

Capítulo 2

Material e Métodos

2.1 Conjunto de Dados

O conjunto de dados utilizados neste trabalho inclui 3 pontos de medição de correntes, 2 pontos de medição de vento e 20 pontos de coleta de dados hidrográficos. Estes dados foram coletados e disponibilizados no âmbito do Projeto de Caracterização Regional da bacia de Sergipe-Alagoas, realizado pela PETROBRAS em convênio com o Departamento de Oceanografia Física da Universidade de São Paulo. As medições dos ventos e das correntes foram realizadas em 3 estações distintas na PCSEAL, nomeadas como ATALAIA, PGA-7 e PCM-9. Porém, dentre estas, na estação ATALAIA não houve a medição de ventos. A seguir, tem-se a descrição de cada uma destas estações citadas e dos pontos de coleta de dados hidrográficos.

2.1.1 ATALAIA

Localizado nas coordenadas $11^{\circ}12'27''\text{S}$ e $037^{\circ}06'09''\text{W}$, o fundeio ATALAIA é composto por um perfilador acústico de correntes (ADCP) da Nortek, modelo AWAC. Este equipamento é capaz de mensurar a velocidade da corrente através do efeito Doppler, que consiste na determinação da velocidade das partículas em suspensão, transportadas pela corrente, por meio da emissão de pulsos sonoros que são refletidos por estas partículas. A diferença entre a frequência do pulso sonoro emitido pelo ADCP

e a recebida possibilita a determinação da velocidade da corrente. Com isto, o ADCP propicia a medição das correntes em diferentes níveis na coluna d'água.

O ADCP do fundeio ATALAIA foi instalado em uma profundidade de 24 m, com seus transdutores acústicos, responsáveis pela emissão dos pulsos sonoros, orientados verticalmente para cima. As correntes foram aferidas em 18 células distintas, com espaçamento de 1 metro entre estas. As profundidades da primeira e da última célula de medição são 22 m (fundo) e 5 m (superfície), respectivamente. Foram realizadas 9 campanhas entre os dias 16/10/2013 e 06/03/2015. Entretanto, devido à problemas operacionais, 4 campanhas foram descartadas destas séries. A descrição das campanhas deste fundeio que foram utilizadas neste trabalho é encontrada na Tabela 2.1.

Campanha	Início	Fim	Total em dias
Campanha 01 (C1)	16/10/2013 18:00	17/12/2013 16:30	61,94
Campanha 02 (C2)	18/12/2013 18:00	04/02/2014 13:30	47,81
Campanha 03 (C3)	04/02/2014 15:00	19/03/2014 03:00	42.50
Campanha 06 (C6)	13/08/2014 14:00	13/10/2014 12:00	60.92
Campanha 07 (C7)	13/10/2014 16:00	12/12/2014 12:00	59.83

Tabela 2.1: Campanhas bem sucedidas e seus respectivos períodos para o fundeio Atalaia.

2.1.2 PCM-9

A estação PCM-9, localizada nas coordenadas 10°59'12"S e 036°56'53"W, consiste em um correntógrafo, modelo 3D Wave da *Falmouth Scientific Inc.* (FSI), fundeado à 10 m de profundidade, e uma estação meteorológica *Young*, capaz de medir a intensidade e a direção do vento, instalada à 10 m de altura. A profundidade local na região da estação PCM-9 é de 23 m. Diferente do ADCP, este correntógrafo é capaz de realizar à medição de corrente somente no nível onde está fundeado. O período de aquisição de dados desta estação foi de pouco mais de 3 anos, entre 19/03/2012 e 17/06/2015. A série correntométrica compreende todo este período citado, enquanto que a série temporal de intensidade e direção do vento compreende um período menor, entre os dias

09/03/2012 e 31/12/2014.

2.1.3 PGA-7

Localizada nas coordenadas $11^{\circ}12'07,9''\text{S}$ e $037^{\circ}03'27,4''\text{W}$, em uma região com profundidade de 25m, a estação PGA-7 possui configuração semelhante à estação PCM-9, instrumentada com um correntógrafo 3D *Wave* da FSI e uma estação meteorológica *Young* instalada à 10m de altura. O correntógrafo registrou dados durante o período de 19/04/2014 a 17/06/2015, onde esteve fundeado à 10 m de profundidade no início da aquisição dos dados e, a partir de 22/04/2015, mudou para a profundidade de 8 m. Ainda em relação ao correntógrafo, entre os períodos de 08/05/2014 e 12/07/2014 e 14/12/2014 e 22/04/2015, há uma lacuna significativa de dados devido à problemas operacionais. Já os dados meteorológicos compreenderam o período de 07/05/2014 a 08/04/2015. A Tabela 2.2 fornece uma descrição resumida das estações de coleta citadas.

	Estação	Início	Fim	Latitude	Longitude
Corrente	Atalaia	16/10/2013	06/03/2015	$11^{\circ}12'27''\text{S}$	$037^{\circ}06'09''\text{W}$
	PCM-9	19/03/2012	17/06/2015	$10^{\circ}59'12''\text{S}$	$036^{\circ}56'53''\text{W}$
	PGA-7	19/04/2014	17/06/2015	$11^{\circ}12'07,9''\text{S}$	$037^{\circ}03'27,4''\text{W}$
Vento	PCM-9	09/03/2012	31/12/2014	$10^{\circ}59'12''\text{S}$	$036^{\circ}56'53''\text{W}$
	PGA-7	19/04/2014	17/06/2015	$11^{\circ}12'07,9''\text{S}$	$037^{\circ}03'27,4''\text{W}$

Tabela 2.2: Período de coleta e localização dos dados meteo-oceanográficos disponibilizados pela PETROBRAS para análise neste trabalho.

2.1.4 Dados hidrográficos

Os dados de hidrografia foram coletados durante duas campanhas oceanográficas, a bordo do R/V *Seaward Johnson*, no ano de 2014, a primeira em maio, entre os dias 10 e 21 (MARSEAL01), e a segunda em novembro, entre os dias 14 e 25 (MARSEAL02). Nestas campanhas, foram coletados perfis de temperatura e salinidade com um CTD

da *Seabird*, modelo SBE 9, com frequência amostral de 15 Hz, acoplado a uma Rosette. Durante o cruzeiro MARSEAL01 foram realizadas 89 estações hidrográficas enquanto que durante o MARSEAL02, 87 estações. Porém, neste trabalho só foram consideradas as estações realizadas sobre a PCSEAL, que totalizaram 10 estações em cada cruzeiro. A localização destas estações foi a mesma para ambos os cruzeiros realizados.

Por fim, tem-se as posições e a natureza dos pontos de dados observacionais utilizados neste trabalho dispostas na Figura 2.1. As estações hidrográficas presentes na Figura 2.1 são referentes as 10 estações realizadas sobre a PCSEAL em ambas as campanhas MARSEAL01 e MARSEAL02.

Figura 2.1: Localização dos fundeios Atalaia (estrela), PGA-7 (x) e PCM-9 (+) e das estações hidrográficas (triângulos) realizadas sobre a PCSEAL. Vale ressaltar que as 10 estações hidrográficas dispostas (triângulos) foram realizadas em ambos os cruzeiros realizados (MARSEAL01 e MARSEAL02), o que totaliza 20 estações hidrográficas.

2.2 Tratamento inicial dos dados

O conjunto de dados de correntometria e velocidade do vento utilizado neste trabalho foi previamente processado pela Petrobras, onde houve a remoção de dados espúrios e a correção de orientação pela declinação magnética para a orientação das componentes de velocidade em relação ao norte verdadeiro. Em seguida, foi realizado um controle de qualidade dos dados, a fim de verificar a presença de dados espúrios. Verificada a confiabilidade dos dados, foram rotacionadas as componentes zonal e meridional do conjunto de dados para aquisição das componentes paralela e perpendicular à costa, onde se considerou um ângulo de 40° no sentido horário em relação ao norte verdadeiro.

Esta rotação das componentes é adequada para se tratar correntes sobre a plataforma continental, pois leva em consideração o fato da linha de costa agir como uma barreira intransponível para as correntes oceânicas. Em sequência a este tratamento inicial, foram realizadas as análises dos dados que envolveram a análise de componente principal ou análise por Funções Ortogonais Empíricas (EOF), a análise espectral, a análise harmônica e a correlação.

2.3 Funções Ortogonais Empíricas (EOF)

A análise de componente principal é uma técnica estatística comumente utilizada para análise multivariada, onde se envolve uma combinação linear de modos ortogonais (EMERY; THOMSON, 1997). Para a oceanografia, este método é conhecido como análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF). O primeiro estudo de dinâmica de fluidos geofísicos que utilizou a análise EOF foi realizado por Lorenz (1956), onde o autor utilizou o método para previsões meteorológicas estatísticas. A análise de EOF é um método eficiente para reduzir um banco de dados extenso, o qual fornece uma descrição estatística compacta da variabilidade espacial e temporal do conjunto de dados em termos de funções ortogonais ou modos estatísticos.

Para esclarecer como este método funciona, considera-se uma variável escalar

discreta $\psi(S_m, t)$, coletada em M pontos amostrais, onde $S_m = (x_m, y_m)$ para S_m pertencente ao intervalo $1 \leq m \leq M$. Então, considera-se N campos espaciais no tempo $t = t_k (1 \leq k \leq N)$ compostos pela variável escalar $\psi(S_m, t)$. Enfim, o método de EOF consiste em escrever a série temporal $\psi(S_m, t)$, para cada ponto do domínio S_m , como a soma de M funções espaciais ortogonais $\phi_k(S_m) = \phi_{km}$, de tal modo que

$$\psi(S_m, t) = \psi_m(t) = \sum_{k=1}^M a_k(t) \phi_{km}, \quad (2.1)$$

onde $a_k(t)$ é a amplitude do k -ésimo modo ortogonal no momento $t = t_n (1 \leq n \leq N)$. A Equação 2.1 diz que a variação temporal da variável escalar $\psi(S_m, t)$, para cada posição S_m , resulta da combinação linear de M funções espaciais, ϕ_k , das quais as amplitudes são ponderadas por M coeficientes, $a_k(t)$ para o intervalo $1 \leq k \leq M$. Os coeficientes $a_k(t)$ informam como os modos espaciais ϕ_{km} variam no tempo. Portanto, pode-se observar que o número de funções ortogonais será igual ao número de pontos de coleta dos dados (EMERY; THOMSON, 1997).

Usualmente, a maior parcela da variabilidade dos dados está contida nas primeiras funções ortogonais, cujos padrões podem ser relacionados com possíveis mecanismos dinâmicos. Estes modos podem ser utilizados para reconstruir o sinal original dos dados, de forma a se eliminar as escalas de variabilidade irrelevantes e, consequentemente, menos energéticas para a contribuição da variância dos dados.

2.4 Análise espectral

A análise espectral é usualmente utilizada para se particionar a variabilidade de um sinal em função da frequência (EMERY; THOMSON, 1997). Neste trabalho, utilizou-se o método não paramétrico de periodogramas modificados desenvolvido por Welch (1967) para se calcular as componentes da transformada de Fourier. No método de periodograma, ao invés de se calcular a função de autocorrelação, como nos métodos convencionais de análise espectral, os dados são diretamente transformados

para se obter as componentes de Fourier, descritas por:

$$S_k = \Delta t \sum_{n=1}^N S_n e^{-i2\pi f_k n \Delta t}; f_k = \frac{k}{N\Delta t}, k = 0, \dots, N, \quad (2.2)$$

onde $T = N\Delta t$ é a duração da série temporal, f_k são as frequências discretizadas, S_n são as transformadas de Fourier e S_k é a série temporal. Da Equação 2.2, tem-se que $f_k = k f_1$ e $f_1 = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{1}{T}$ caracterizam a frequência fundamental e a largura da banda espectral (Δf) da série temporal.

Desta forma, esta análise irá fornecer o espectro de energia do sinal estudado em função de N frequências igualmente espaçadas. Isto possibilita verificar quais frequências são mais significativas para o sinal original.

2.5 Análise harmônica

Na análise harmônica se assume que os termos de forçantes astronômicas podem ser adequadamente representados por um número finito de termos harmônicos com diferentes velocidades angulares σ_n . Segundo Cartwright (1977), as velocidades angulares podem ser representadas por $\sigma_n = a\omega_1 + b\omega_2 + c\omega_3 + d\omega_4 + e\omega_5 + f\omega_6$, onde os termos a, b, c, d, e e f são coeficientes inteiros e ω_n são as velocidades angulares definidas astronomicamente como, por exemplo:

$$\frac{2\pi}{\omega_1} = \text{dia lunar médio}$$

$$\frac{2\pi}{\omega_2} = \text{mês sideral}$$

$$\frac{2\pi}{\omega_3} = \text{ano tropical}$$

$$\frac{2\pi}{\omega_4} = 8,85 \text{ anos, variação no perigeu lunar}$$

$$\frac{2\pi}{\omega_5} = 18,61 \text{ anos, variação no nodo lunar}$$

$$\frac{2\pi}{\omega_6} = 21.000 \text{ anos, variação no perigeu solar (periélio)}$$

A análise harmônica se assemelha à análise espectral, uma vez que ambas avaliam o espectro que compõe o sinal original da função estudada. Porém, a principal diferença entre estes métodos é que na análise espectral se obtém a amplitude de N frequências igualmente espaçadas em uma série temporal de N passos de tempo, enquanto que na análise harmônica o usuário determina quais frequências deseja estudar e realiza o método dos mínimos quadrados para resolver as constituintes de interesse. O método dos mínimos quadrados é capaz de estimar a amplitude e a fase de frequências específicas através da diminuição da soma dos quadrados das diferenças entre a série original dos dados e uma série de interesse determinada. Em prática, a energia da maré está contida em um número limitado de constituintes harmônicas, onde as componentes diurnas e semi-diurnas costumam ser as mais significativas no espectro. A Tabela 2.3 apresenta as principais componentes diurnas e semidiurnas de maré.

Espécie	Período	Velocidade Angular	Fonte
Diurna			
O_1	$\omega_1 - \omega_2$	28,82 hrs	diurna lunar
P_1	$\omega_0 - \omega_3$	24,06 hrs	diurna solar
K_1	$\omega_0 - \omega_3$	23,94 hrs	diurna lunisolar
Semidiurna			
N_2	$2\omega_1 - \omega_2 + \omega_4$	12,66 hrs	elíptica lunar
M_2	$2\omega_1$	12,42 hrs	principal lunar
S_2	$2\omega_0$	12,00 hrs	principal solar
K_2	$2(\omega_0 + \omega_3)$	11,97 hr	semidiurna lunisolar

Tabela 2.3: Principais constituintes harmônicas diurnas e semidiurnas de maré (JOHNS, 1983)

Segundo Johns (1983), na maior parte das regiões do globo, os constituintes semidiurnos M_2 e S_2 , dentre os demais harmônicos, são os de maior amplitude sobre a plataforma continental. No entanto, a medida que a maré incide em regiões costeiras, termos não lineares são gerados em função de outros processos, como o atrito com o fundo e efeitos advectivos. Neste contexto, através da análise harmônica dos dados,

foram mensuradas as amplitudes dos principais harmônicos de maré que atuam na PCSEAL. Quanto à direção das correntes geradas por estes forçantes, foram confeccionadas elipses de maré para esta avaliação.

2.6 Coeficiente de Correlação

Ao se considerar dois processos estacionários (não se altera estatisticamente com tempo) $x_i (x_1, x_2, \dots, x_N)$ e $y_i (y_1, y_2, \dots, y_N)$, contidos no domínio temporal $t_i (t_1, t_2, t_3, \dots, t_N)$, pode-se calcular a covariância entre estes através da função de correlação:

$$r_{xy}(\tau) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} \frac{(x_{i+k} - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (2.3)$$

onde σ_x e σ_y são os desvios padrões das séries x e y , respectivamente, e $\tau = \tau_k = k\Delta t$ ($k = 0, \dots, M$) é o *lag* para cada k incremento de tempo, com $M \ll N$.

A Equação (2.3) mostra que r_{xy} é um número adimensional que varia entre -1 e $+1$, onde $+1$ significa uma correlação máxima e em fase e -1 , uma correlação máxima com 180 graus fora de fase. O valor 0 indica que não há correlação entre as variáveis. Em posse de r_{xy} , foi calculado o coeficiente de determinação $r = r_{xy}^2$, que nos fornece a razão entre a variância total da série e a variância explicada pela regressão linear utilizada para a correlação. Por exemplo, o valor $C_{xy} = 0,95$ significa que uma regressão linear de y em x explica $C_{xy}^2 = 90,25\%$ da variância total da amostra. Este método foi utilizado para estudar a covariabilidade entre as séries temporais de vento e de corrente.

2.7 Modelo Numérico

2.7.1 Descrição

O modelo hidrodinâmico utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Blumberg e Mellor (1980) e Blumberg e Mellor (1987). Trata-se de um modelo hidrodinâmico

3D de superfície livre que utiliza uma grade C de Arakawa em conjunto com o sistema de coordenadas σ na vertical, para discretizar o sistema de equações primitivas. O conjunto acoplado de equações resolvido pelo modelo envolve conservação de massa, momento, calor e sal, em função dos termos de velocidade $U_i = (U, V, W)$, temperatura (T) e salinidade (S) (BLUMBERG; KHAN; JOHN, 1999). O sistema de equações é dado por:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(U, V) + \frac{\partial}{\partial x_i}[U_i(U, V)] + f(-V, U) = -\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}[K_M \frac{\partial}{\partial z}(U, V)] + (F_U, F_V), \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i T) = \frac{\partial}{\partial z}(K_H \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i S) = \frac{\partial}{\partial z}(K_H \frac{\partial S}{\partial z}) + F_S, \quad (2.7)$$

Este modelo também considera o balanço hidrostático, dado por:

$$\frac{P}{\rho_0} = g(\eta - z) + \int_z^\eta g \frac{\rho' - \rho_0}{\rho_0} dz', \quad (2.8)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho', \quad (2.9)$$

onde $\eta(x, y, t)$ é o nível do mar, P é a pressão, f é o parâmetro de Coriolis, ρ_0 é a densidade de referência, ρ é a densidade local. A densidade local é mensurada em função da temperatura potencial T e a salinidade S , de acordo com Fofonoff (1962). Os coeficientes verticais de mistura K_M e K_H são determinados pelo fechamento turbulento formulado por Mellor e Yamada (1982) e modificado por Galperin et al. (1988) e Blumberg, Galperin e O'Connor (1992).

Os processos de mistura de pequena escala não são diretamente resolvidos pelo modelo e são representados pelos termos F_U , F_V , F_T e F_S . Estes são termos parametrizados de difusão horizontal baseados na formulação realizada por Smagorinsky (1963). Nesta parametrização, tem-se dois coeficientes, A_M para F_U e F_V , e A_H para F_T e F_S . Ainda, tem-se um parâmetro ajustável C_D , que representa o coeficiente de atrito com o fundo e é obtido através da parametrização:

$$C_D = \left[\frac{1}{k} \ln \frac{(H + z_b)}{z_0} \right]^{-2}, \quad (2.10)$$

onde $H(x, y)$ é a topografia de fundo, z_b é o ponto do grid próximo ao fundo e k é a constante de von Karman. A constante de von Karman é uma constante adimensional que descreve um perfil logarítmico de velocidade para um fluxo turbulento próximo ao contorno com condição de não escorregamento (velocidade zero no contorno). O parâmetro z_0 depende da rugosidade de fundo local onde, na falta desta informação, utiliza-se o valor de 1 cm, como sugerido por Weatherly e Martin (1978).

As Equações 2.4 - 2.7 são transformadas para o sistema de coordenadas ortogonais curvilíneo no plano horizontal e seguem o sistema de coordenadas σ no eixo vertical.

2.7.2 Domínio

O domínio do modelo é composto por uma grade regular rotacionada 40° no sentido horário, em relação ao norte verdadeiro, para uma orientação desta praticamente paralela à linha de costa (Figura 2.2). Esta grade possui 50 pontos na direção perpendicular e 150 pontos na direção paralela às isóbatas, o que resultou em uma resolução horizontal de 2 km. Na vertical, a grade possui 30 níveis sigmas, o que gerou uma resolução de, aproximadamente, 67 m na parte mais profunda da grade e uma na ordem de 10 cm na porção mais rasa. Este domínio, portanto, incluiu toda a PCSEAL, o talude e parte do oceano profundo, onde atingiu profundidades superiores a 2000 metros. Porém, uma vez que o objetivo deste trabalho é avaliar os movimentos sobre a PCSEAL, considerou-se que as profundidades acima de 2000 m são iguais a

este valor, sendo esta a profundidade máxima do domínio. A área coberta pela grade compreendeu as latitudes de 9,06°S a 12,17°S.

A batimetria da grade foi obtida por digitalização das cartas náuticas 1000,1002, 1003, 100101, 100102 da Marinha do Brasil. O motivo do domínio do modelo ter se estendido até o oceano profundo foi evitar a influência do contorno, região que frequentemente apresenta irregularidades em estudos numéricos, nos movimentos sobre a PCSEAL. A Figura 2.2 mostra o domínio do estudo numérico com a batimetria utilizada e os pontos de descarga fluvial considerados nas simulações que consideraram esta forçante.

Figura 2.2: Pontos molhados da grade e batimetria utilizada no modelo sECOM para a PCSEAL. Os três pontos pretos indicam os três pontos de descarga fluvial considerados nas simulações que contemplaram esta forçante.

2.7.3 Condições Iniciais e de Contorno

Para o campo termohalino, foi considerado um oceano homogêneo, com 37 de salinidade e temperatura de 27°C. Quanto ao campo de velocidade, o modelo assumiu como condição inicial o repouso, onde as velocidades são iguais a zero para toda a coluna d'água. Em função da condição de repouso no instante inicial, foram realizados dois procedimentos para aquisição de dados mais adequados: (1) a forçante meteorológica foi adicionada gradualmente e só passou a assumir o valor real após 2 dias de simulação, para evitar possíveis instabilidades numéricas devido à ação abrupta da forçante no tempo inicial; (2) todas as simulações tiveram 15 dias iniciais que não foram avaliados, período suficiente para que o modelo entrasse em equilíbrio. Portanto, cada simulação teve 15 dias adicionais ao período de interesse. Vale ressaltar que nestes 15 dias de aquecimento do modelo estão inclusos os 2 dias citados anteriormente.

Os contornos oceânicos foram considerados abertos e assumiram a condição de contorno radiativa elaborada por Reid e Bodine (1968). Nestes contornos foi imposta uma forçante harmônica (maré) com os principais harmônicos diurnos e semidiurnos (M2, S2, N2, O1, K1 e P1). Para aquisição das amplitudes e fases destes harmônicos, foi utilizado o modelo global de maré TPXO 7.2 (EGBERT; BENNETT; FOREMAN, 1994). Ainda, nos contornos oceânicos, foi imposto o campo de salinidade e temperatura igual ao do interior do domínio, ou seja, constante e com 37 de salinidade e 27°C de temperatura. Para o contorno fechado, na linha de costa, foi considerada a condição de livre escorregamentos, com as velocidades perpendiculares ao contorno nulas.

2.7.4 Forçantes

As forçantes utilizadas para as simulações realizadas foram a maré, o vento e o aporte fluvial. Para a forçante meteorológica foram empregados dados de reanálise fornecidos pelo NCEP *Climate Forecast System Version 2* (CFSv2) (SAHA et al., 2014). Os dados fornecidos pelo CFSv2 possuem resolução espacial de 0,205° x 0,204° e resolução temporal de 6 horas. Para as simulações, manteve-se a resolução temporal deste banco de dados e se realizou uma interpolação espacial para que este se ajustasse à grade

utilizada nas simulações. Os 15 dias citados na Seção anterior, utilizados para aquecer o modelo, também foram alimentados com o mesmo banco de dados.

Como mencionado na seção anterior, a forçante astronômica foi forçada nos contornos abertos com as amplitudes e fases das principais forçantes diurnas e semi-diurnas. Para tal, também foi necessária uma interpolação espacial dos dados fornecidos pelo modelo global de maré TPXO 7.2, com resolução espacial de $0,25^\circ$, para os pontos dos contornos.

Para o aporte fluvial foram adicionados três pontos de vazão de água doce, com temperatura de 27°C , a mesma considerada para o domínio em geral, e salinidade de 0. Portanto, as simulações que contemplaram as descargas fluviais se diferenciaram em relação ao campo de salinidade das demais simulações, apresentando alguma estratificação. Porém, é importante esclarecer que esta estratificação é consequência, somente, da influência das descargas dos rios considerados. Os três pontos de descarte foram dispostos, respectivamente, em frente ao Rio São Francisco, ao Rio Vaza Barris e ao Rio Sergipe (Figura 2.2). Utilizou-se valores de vazão média mensal fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Tais valores estão dispostos na Tabela 2.4. A vazão dos rios foram dispostas nos vinte primeiros níveis sigmas, onde se assumiu, da superfície para o fundo, as seguinte porcentagens da vazão total: 10,0%, 10,0%, 10,0%, 9,0%, 8,0%, 7,1%, 6,3%, 5,6%, 5,0%, 4,5%, 4,0%, 3,6%, 3,2%, 3,0%, 2,7%, 2,2%, 1,8%, 1,6%, 1,4% e 1,0%.

	Vazão média ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) para 2014		
	Março	Julho	Setembro
Rio São Francisco	1249.5	1217.2	1226.9
Rio Vaza Barris	3.8	16.2	4.2
Rio Sergipe	1.3	2.8	1.5

Tabela 2.4: Vazões médias mensais, referentes aos períodos escolhidos para o estudo numérico da circulação sobre a PCSEAL, fornecidas pelo INMET para os três rios considerados nas simulações.

2.7.5 Simulações

As simulações realizadas tiveram como objetivo principal o estudo da ação isolada de cada forçante e a ação conjunta destes. Foi objetivado, também, uma melhor descrição espacial da dinâmica sobre a PCSEAL do que a fornecida pelos dados observacionais. Foram escolhidos os meses de março, julho e setembro de 2014 para a realização das simulações. Para cada um destes meses, realizaram-se 7 simulações que envolviam à ação isolada e conjunta das diferentes forçantes consideradas (Tabela 2.5). Portanto, foram avaliadas 21 simulações no total.

A escolha destes meses se deu em função de: (1) março estar no período onde se observa ventos menos intensos na região; (2) julho apresentar valores mais elevados de média mensal de vazão fluvial segundo os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); (3) setembro apresentar ventos mais intensos segundo Costa e LYRA (2012). Quanto ao ano, a escolha foi feita em função dos dados observacionais disponíveis para validação do modelo e análise dos processos.

Na Tabela 2.5 estão dispostas as condições de forçantes consideradas para cada simulação realizada para todos os períodos citados, o que totalizou as 21 simulações. Para a validação do modelo foi utilizado o método elaborado por Willmott (1981), onde se avalia a confiabilidade dos resultados gerados pelo modelo numérico.

Simulação	Forçantes			Campo TS
	Maré	Vento	Aporte Fluvial	
Maré (M)	✓			Homogêneo
Vento (V)		✓		Homogêneo
Rios (R)			✓	Estratificado
Maré + Vento (MV)	✓	✓		Homogêneo
Maré + Rios (MR)	✓		✓	Estratificado
Vento + Rios (VR)		✓	✓	Estratificado
Maré + Vento + Rios (MVR)	✓	✓	✓	Estratificado

Tabela 2.5: Simulações numéricas realizadas com suas respectivas siglas, suas forçantes consideradas e seus campos de temperatura e salinidade. A estratificação mencionada é consequência, somente, da contribuição do aporte fluvial.

Capítulo 3

Resultados e Discussão

3.1 Dados observados

3.1.1 Hidrografia

Na Campanha MARSEAL01, os perfis de temperatura potencial apresentaram valores praticamente homogêneos na coluna d'água, com temperaturas muito próximas a 27,5°C (Figura 3.1). Porém, observou-se dois perfis que se destacam deste padrão. O primeiro apresenta temperaturas potenciais na superfície próximas a 26,5°C e, no fundo, temperaturas potenciais inferiores a 25,5°C. Este perfil foi coletado próximo a entrada do cânion de Japaratuba, e indica que esta feição pode gerar fluxos verticais significativos, capazes de lançar águas de regiões mais profundas na plataforma. Não há, entretanto, uma assinatura desta feição nos perfis de salinidade. O outro perfil com destaque, apesar de mais raso, apresenta temperaturas potenciais mais elevadas tanto na superfície, próxima a 28,4°C quanto no fundo, próximas a 27,9°C. Este perfil está localizado no ponto mais ao norte do domínio e mostra o aquecimento das águas da plataforma à medida que se caminha para o norte, neste período. Os valores máximo e mínimo observados para a temperatura potencial foram de 28,42 e 25,38, respectivamente.

Para a salinidade, a estrutura vertical mostra os menores valores dos perfis

logo abaixo da superfície (Figura 3.1). Há uma variação razoável de salinidade que pode chegar a 2 unidades em uma coluna d'água de 35 metros. O máximo valor de salinidade encontrado foi de 37,28 e mínimo de 35,43. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram um perfil longitudinal dos campos de temperatura potencial e salinidade, onde fica nítido o sinal de baixa temperatura citado e as regiões de mínimo de salinidade na superfície.

Figura 3.1: Perfis de temperatura potencial (esquerda) e salinidade (direita) nas 10 estações sobre a PCSEAL para a Campanha MARSEAL01.

Figura 3.2: Seção longitudinal de temperatura para a Campanha MARSEAL01. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de temperatura potencial ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem.

Figura 3.3: Seção longitudinal de salinidade para a Campanha MARSEAL01. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de salinidade ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem.

A Campanha MARSEAL02 mostrou valores de temperatura potencial mais baixos do que os observados na Campanha MARSEAL01, variando entre 24,51°C e 26,62°C (Figura 3.4). Os menores valores observados também estão no fundo próximo ao cânion de Japarutuba e ao norte do rio São Francisco (Figura 3.5), embora não tão evidentes quanto os observados na Campanha MARSEAL01. Para a salinidade, abaixo dos 5 metros, há uma baixa variação, com valores pouco superiores a 37 (Figura 3.4). Entretanto, na porção mais rasa da coluna d'água, acima de 5 m, são observados valores entre 29 e 31 (Figura 3.6), que evidenciam a influência significativa de alguma fonte de água doce na região. Os valores máximo e mínimo encontrados para a salinidade foram de 37,23 e 28,93.

Figura 3.4: Perfis de temperatura potencial (esquerda) e salinidade (direita) nas 10 estações sobre a PCSEAL para a Campanha MARSEAL02.

Figura 3.5: Seção longitudinal de temperatura potencial para a Campanha MARSEAL02. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de temperatura ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem.

Figura 3.6: Seção longitudinal de salinidade para a Campanha MARSEAL02. Esta seção foi obtida por interpolação dos perfis de salinidade ao longo da PCSEAL. Para critério de localização das estações realizadas, têm-se os triângulos coloridos na parte superior do gráfico que são referentes aos triângulos de cores análogas dispostos no mapa localizado no canto inferior direito da imagem.

Referente às massas d'águas presente na PCSEAL, ao avaliar os diagramas TS (Figura 3.7) das duas Campanhas hidrográficas, observa-se a presença exclusiva da Água Tropical sobre a PCSEAL, de acordo com os valores de densidade citados por Mémery et al. (2000). Segundo este autor, considera-se Água Tropical quando se observa valores de densidade potencial (σ^0) menores do que $25,8 \text{ Kg.m}^{-3}$.

Figura 3.7: Diagramas TS para as Campanhas MARSEAL01 (esquerda) e MARSEAL02 (direita), onde os pontos pretos representam os dados coletados nas estações e as linhas pontilhadas representam a densidade potencial (σ^0).

3.1.2 Correntometria

As correntes observadas no fundeio ATALAIA decrescem da superfície para o fundo, com as correntes em superfície e em meia-água orientadas, em geral, na direção paralela à costa, com fluxo, preferencialmente, entre sul e sudoeste, deixando a costa à direita. As Figuras 3.8 a 3.12, mostram esta distribuição. Quanto ao fundo, as Campanhas C1 e C7 mostraram um fluxo bem orientado que segue o fluxo da superfície. Porém, nas Campanhas C2, C3 e C6 não foi possível estabelecer um padrão.

Figura 3.8: Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C1 (16/10/2013 a 17/12/2013) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.

Figura 3.9: Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C2 (18/12/2013 a 04/02/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.

Figura 3.10: Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C3 (04/02/2014 a 19/03/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.

Figura 3.11: Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C6 (13/08/2014 a 13/10/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.

Figura 3.12: Rosa de distribuição das correntes durante a Campanha C7 (13/10/2014 a 12/12/2014) para a superfície (A), meio (B) e fundo (C). As profundidades para a superfície, meio e fundo são 5, 14 e 22 m, respectivamente.

As correntes mais intensas e com maior variabilidade foram observadas na componente paralela à linha de costa, com um máximo de $0,57 \text{ m.s}^{-1}$ na Campanha C7 e um mínimo de $-0,79 \text{ m.s}^{-1}$ na Campanha C1, ambos na superfície (Tabela 3.2). Ao se tratar da componente paralela à linha de costa, o sinal negativo (–) significa um fluxo para Sudoeste enquanto que o sinal positivo (+) significa um fluxo para Nordeste. Para a componente perpendicular à linha de costa, o sinal negativo (–) indica um fluxo em direção à costa e o positivo (+), ao largo.

Campanhas		Mínimo	Máximo	Média	Desv. Padrão
(m.s ⁻¹)					
C1		16 Out. - 17 Dez. 2013			
	Superfície	-0,12	0,38	0,10	0,08
	Meio	-0,18	0,26	0,02	0,07
	Fundo	-0,21	0,22	-0,02	0,06
C2		18 Dez. - 04 Fev. 2014			
	Superfície	-0,25	0,37	0,09	0,09
	Meio	-0,23	0,24	0,00	0,08
	Fundo	-0,26	0,17	-0,01	0,06
C3		04 Fev. - 19 Mar. 2014			
	Superfície	-0,17	0,35	0,07	0,08
	Meio	-0,21	0,25	-0,01	0,08
	Fundo	-0,20	0,18	-0,01	0,06
C6		13 Ago. - 13 Out. 2014			
	Superfície	-0,23	0,41	0,06	0,10
	Meio	-0,18	0,23	-0,01	0,07
	Fundo	-0,21	0,22	-0,01	0,06
C7		13 Out. - 12 Dez. 2014			
	Superfície	-0,19	0,32	0,08	0,08
	Meio	-0,24	0,22	-0,01	0,07
	Fundo	-0,22	0,18	-0,02	0,06

Tabela 3.1: Estatística básica para a componente perpendicular à linha de costa de corrente na superfície, meio e fundo de todas as Campanhas do fundeio ATALAIA.

Os valores observados para a componente perpendicular à linha de costa (Tabela 3.1), indicam que, nesta direção, os fluxos em direção ao largo são mais intensos. Se comparada à componente paralela à linha de costa, a componente perpendicular à linha de costa possui baixa variabilidade, cerca de 1 ordem de grandeza inferior. Para a componente paralela à linha de costa, componente mais significativa, observou-se correntes mais intensas no segundo semestre, entre os meses de Outubro e Dezembro (Tabela 3.2).

Campanhas		Mínimo	Máximo	Média	Desv. Padrão
		(m.s ⁻¹)			
C1		16 Out. - 17 Dez. 2013			
	Superfície	-0,79	-0,03	-0,38	0,12
	Meio	-0,57	0,03	-0,27	0,10
	Fundo	-0,44	0,14	-0,14	0,09
C2		18 Dez. - 04 Fev. 2014			
	Superfície	-0,51	0,25	-0,16	0,15
	Meio	-0,43	0,34	-0,03	0,15
	Fundo	-0,33	0,22	0,01	0,07
C3		04 Fev. - 19 Mar. 2014			
	Superfície	-0,55	0,33	-0,18	0,16
	Meio	-0,41	0,34	-0,04	0,15
	Fundo	-0,20	0,27	0,00	0,09
C6		13 Ago. - 13 Out. 2014			
	Superfície	-0,53	0,53	-0,06	0,20
	Meio	-0,33	0,55	0,01	0,17
	Fundo	-0,24	0,50	0,03	0,13
C7		13 Out. - 12 Dez. 2014			
	Superfície	-0,66	0,57	-0,29	0,20
	Meio	-0,57	0,54	-0,15	0,18
	Fundo	-0,51	0,43	-0,06	0,12

Tabela 3.2: Estatística básica para a componente paralela à linha de costa de corrente na superfície, meio e fundo de todas as Campanhas do fundeio ATALAIA.

Para o fundeio PGA-7, a série temporal de correntometria apresentou valores máximos de intensidade de $0,51 \text{ m.s}^{-1}$, com média para todo o período analisado de $0,16 \text{ m.s}^{-1}$ e desvio padrão de $0,07 \text{ m.s}^{-1}$. As correntes observadas neste fundeio são, predominantemente, paralelas à linha de costa com fluxo preferencialmente para SSW. Observou-se, também, correntes na direção oposta, no quadrante NE, porém menos frequentes e com menores intensidades do que as mencionadas anteriormente. As correntes perpendiculares são menos intensas e menos frequentes se comparadas com as correntes paralelas. A Figura 3.13 mostra a distribuição destas correntes.

Figura 3.13: Rosa de distribuição das correntes para o fundeio PGA-7 durante o período de 19/04/2014 a 17/06/2015

As correntes observadas no fundeio PCM-9 apresentaram valor médio de $0,20 \text{ m.s}^{-1}$, com desvio padrão de $0,12 \text{ m.s}^{-1}$. Este valor médio é superior ao obtido no fundeio PGA-7. Entretanto, por se tratar de períodos amostrais distintos e, também, levando-se em consideração os desvios padrão das duas séries, não se pode afirmar que as correntes nesta região sejam mais intensas do que as observadas na região do fundeio PGA-7. O valor máximo de intensidade também é superior ao observado no fundeio PGA-7, com $0,82 \text{ m.s}^{-1}$.

A direção preferencial das correntes também é paralela à linha de costa, com sentido preferencial para SSW. A frequência de correntes no sentido oposto ao predominante e a intensidade destas são significativamente menores. Correntes na direção perpendicular são escassas e suas intensidades são, de forma significativa, inferiores às observadas na direção paralela à costa. A Figura 3.14 mostra a distribuição destas correntes.

Figura 3.14: Rosa de distribuição das correntes para o fundeio PCM-9 durante o período de 19/03/2012 a 17/06/2015.

A fim de avaliar o comportamento da circulação ao longo do ciclo de um ano, foi realizada a média mensal para a plataforma PCM-9, pois esta possui um conjunto de dados mais robusto. Observou-se uma tendência a atenuação das correntes entre o verão e outono e uma intensificação destas entre o inverno e a primavera (Figura 3.15).

Foram realizadas as médias mensais para os demais fundeios e os resultados são semelhantes aos observados na Figura 3.15. Porém, uma vez que o fundeio PCM-9 apresentou um número maior de amostras, comparado aos demais, foi decidido expor somente as médias mensais referentes a este fundeio.

Figura 3.15: Média mensal de corrente para o fundeio PCM-9 e os respectivos desvios-padrões de cada mês (sombreado).

3.1.2.1 Análise EOF

Com o intuito de comprimir o extenso banco de dados fornecidos pelo perfilador acústico do fundeio ATALAIA, foi realizada a análise de EOF. Para isto, fundamentou-se em Emery e Thomson (1997) para a realização dos passos matemáticos. Esta análise foi realizada somente para o fundeio ATALAIA, tendo em vista que foi o único fundeio que forneceu séries temporais de corrente para diferentes níveis na coluna d'água.

Em termos gerais, os resultados obtidos pelas Campanhas se conduziram de forma semelhante. Nas Tabelas 3.4 e 3.3, tem-se o percentual que cada modo estatístico representa para a variância do sinal de todas as Campanhas. Observa-se que a maior parcela da variância do sinal está contida nos três primeiros modos estatísticos para ambas as componentes de velocidade. Dentre estas, o primeiro modo é majoritário para a

componente da corrente paralela à linha de costa, com uma variabilidade mínima de 81.44%, para a Campanha C1, e uma variabilidade máxima de 93.31%, para a Campanha C6. Para a componente de corrente perpendicular à linha de costa, o primeiro modo também é dominante, porém com menor relevância em relação à componente paralela. Neste caso, a variabilidade mínima representada pelo primeiro modo é de 52.63% para a Campanha C7, e o máximo é de 60.34% para a Campanha C6.

Modo estatístico	C1	C2	C3	C6	C7
1	57.70	60.09	60.28	60.34	52.63
2	25.24	24.48	22.14	24.95	28.30
3	6.90	5.67	6.35	5.67	7.62
4	2.44	2.48	2.87	2.23	2.84
5	1.32	1.28	1.28	1.24	1.52
6	0.91	0.88	0.94	0.84	0.97
7	0.74	0.67	0.74	0.61	0.76
8	0.61	0.51	0.69	0.55	0.64
9	0.57	0.47	0.60	0.50	0.58
10	0.54	0.45	0.54	0.48	0.54
11	0.50	0.42	0.50	0.44	0.51
12	0.45	0.42	0.49	0.38	0.48
13	0.43	0.40	0.47	0.37	0.47
14	0.39	0.38	0.45	0.34	0.46
15	0.36	0.38	0.43	0.33	0.44
16	0.33	0.36	0.42	0.28	0.42
17	0.31	0.35	0.41	0.25	0.42
18	0.25	0.34	0.38	0.19	0.41

Tabela 3.3: Modos estatísticos discretos (EOF) para a componente perpendicular à linha de costa e suas respectivas porcentagens em relação à variância do sinal.

No entanto, torna-se vago avaliar a importância dos modos estatísticos fornecidos pela EOF somente com base na porcentagem das variâncias que cada um destes representa. É necessário validar estatisticamente os modos fornecidos pela EOF e determinar quais destes modos são significativos, uma vez que podem representar uma pequena parcela da variância do sinal e, ao mesmo tempo, ser estatisticamente significativo. Para isto, utilizou-se o método de Monte Carlo, usualmente empregado em

estudos probabilísticos que envolvem simulações estocásticas.

Figura 3.16: Porcentagem da variância explicada por cada um dos modos estatísticos calculados pela EOF (linha contínua preta) e o limite de significância estatística (linha pontilhada vermelha) calculado pelas simulações de Monte Carlo, onde os modos acima deste possuem intervalo de confiança acima de 95%.

Na Figura 3.16 se observa que, para a componente de corrente perpendicular à linha de costa, os três primeiros modos são estatisticamente importantes, com destaque para os dois primeiros. Porém, para a componente de corrente paralela à linha de costa, somente o primeiro modo se apresentou significativo, com exceção das Campanhas C1 e C3. Portanto, as análises ficaram restritas aos 3 primeiros modos estatísticos, uma vez que estes apresentaram significância estatística para a componente perpendicular à linha de costa.

É importante deixar claro que esta é uma análise estatística e não dinâmica. Porém, os modos estatísticos podem ser associados aos modos dinâmicos com base nas suas estruturas verticais. Neste contexto, estudou-se a estrutura vertical dos modos estatísticos (Figura 3.17) e se constatou que estes são análogos aos 3 primeiros modos dinâmicos: Barotrópico (1ª EOF), 1º Baroclínico (2ª EOF) e 2º Baroclínico (3ª EOF).

Os motivos que justificam esta analogia são: (1) o primeiro modo estatístico apresentou um baixo cisalhamento vertical e um mesmo sentido da corrente para toda a coluna d'água, principal característica do modo Barotrópico; (2) o 2º modo estatístico apresentou um cisalhamento vertical significativo e um perfil vertical de velocidade com uma única inversão de sentido, padrão que caracteriza o 1º modo Baroclínico; (3) o 3º modo estatístico também apresentou forte cisalhamento vertical, porém com duas inversões no sentido da corrente ao longo da coluna d'água, aspecto particular do 2º modo Baroclínico.

Modo estatístico	C1	C2	C3	C6	C7
1	81.44	89.30	88.72	93.31	91.60
2	10.04	5.41	5.80	3.78	4.73
3	3.28	2.01	2.08	1.12	1.50
4	1.33	0.81	0.94	0.46	0.57
5	0.67	0.44	0.45	0.22	0.30
6	0.45	0.28	0.31	0.15	0.19
7	0.35	0.22	0.22	0.12	0.14
8	0.31	0.20	0.18	0.11	0.12
9	0.27	0.17	0.17	0.09	0.11
10	0.26	0.16	0.15	0.09	0.10
11	0.24	0.14	0.14	0.09	0.09
12	0.24	0.14	0.13	0.08	0.09
13	0.21	0.13	0.13	0.07	0.08
14	0.20	0.13	0.12	0.07	0.08
15	0.19	0.12	0.12	0.06	0.08
16	0.18	0.12	0.12	0.06	0.08
17	0.18	0.11	0.11	0.05	0.07
18	0.16	0.11	0.11	0.05	0.07

Tabela 3.4: Modos estatísticos discretos para a componente da corrente paralela à linha de costa e suas respectivas porcentagens em relação à variância do sinal para as campanhas do fundeio ATALAIA.

Desta forma, pode-se determinar que o modo Barotrópico domina a dinâmica da região próxima ao fundeio ATALAIA. Ao analisar as componentes principais deste modo, isto é, as séries temporais associadas a este, observa-se que a componente pa-

ralela à linha de costa está fortemente associada a um sinal de baixa frequência. Já para componente perpendicular à linha de costa, observa-se um forte sinal de alta frequência (Figura 3.18).

Figura 3.17: Estruturas verticais dos 3 primeiros modos estatísticos, onde os gráfico superiores são referentes à componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam à componente paralela à linha de costa (v). Da esquerda para a direita as diversas campanhas do fundeio ATALAIA

Figura 3.18: Componente Principal da 1ª EOF (modo Barotrópico) para todas as Campanhas do fundeio ATALAIA. Os gráficos da esquerda representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os da direita representam a componente paralela à linha de costa (v). De cima para baixo, tem-se os gráficos referentes às Campanhas C1, C2, C3, C6 e C7.

Figura 3.19: Componente Principal da 2ª EOF (1º modo Baroclínico) para todas as Campanhas do fundo ATALAIA. Os gráficos da esquerda representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os da direita representam a componente paralela à linha de costa (v). De cima para baixo, tem-se os gráficos referentes às Campanhas C1, C2, C3, C6 e C7.

Para o 1º modo Baroclínico (2ª EOF) e o 2º modo Baroclínico (3ª EOF) (Figuras 3.19 e 3.20), observaram-se sinais semelhantes para ambas componentes da corrente, onde se tem um sinal de baixa frequência associado a um de alta frequência. Para avaliar as frequências que compõem cada modo estatístico, foi realizada a análise espectral.

Figura 3.20: Componente Principal da 3ª EOF (2º modo Baroclínico) para todas as Campanhas. Os gráficos da esquerda representam a componente perpendicular à linha costa (u) e os da direita representam a componente paralela à linha de costa (v). De cima para baixo, tem-se os gráficos referentes às Campanhas C1, C2, C3, C6 e C7.

3.1.2.2 Análise espectral

Antes de realizar a análise espectral, foram removidas as médias e as tendências das séries temporais avaliadas. Em seguida, as lacunas de dados foram preenchidas com zeros, num processo chamado de zero-padding (THOMSON; EMERY, 2014). Este processo permite uma melhor resolução dos espectros sem alterar a sua variância. A partir desta seção, o período inercial será frequentemente citado. Desta forma é conveniente informar que este equivale ao período de 2,56 dias, uma vez que, nas latitudes da PCSEAL, a frequência de Coriolis é cerca de $2,8 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$, correspondente a 0,39 ciclos por dia.

No fundeio ATALAIA foi observado que, para a 1ª EOF (modo Barotrópico), a componente paralela à linha de costa é dominada por um sinal subinercial, o que

comprova o observado anteriormente, com pico em $9,38 \times 10^{-2}$ ciclos por dia (período de 10,67 dias) (Figura 3.21). Este comportamento foi similar para todos os períodos deste fundeio, com exceção da Campanha C7 que apresentou seu máximo de energia na frequência de $4,69 \times 10^{-2}$ ciclos por dia (período de 21,33 dias). Porém, nota-se que estes pontos de máxima energia da Campanha C7 e das demais Campanhas estão significativamente próximos.

Ainda em relação à componente paralela à linha de costa, observou-se um fraco sinal na banda maregráfica semidiurna, com exceção da Campanha C1, onde este é cerca de metade do sinal subinercial. Nas outras Campanhas este sinal é uma ou duas ordens de grandeza menor que o pico na banda subinercial. Para a componente perpendicular à linha de costa, o modo barotrópico (1ª EOF) possui a variabilidade dominada pela banda maregráfica semidiurna em todos os períodos (Figura 3.21). Também foi observado um sinal na banda subinercial.

Para a 2ª EOF (1º modo Baroclínico), tanto a componente paralela quanto a perpendicular à linha de costa são dominadas pelo sinal subinercial (Figura 3.22). Há, entretanto, uma gama maior de bandas espectrais que não podem ser negligenciadas como, por exemplo, o sinal semi-diurno de maré na componente perpendicular à linha de costa e um espectro amplo entre a frequência inercial e a maré diurna, que tem frequência de 1 ciclo por dia.

Figura 3.21: Espectros que compõem o sinal da 1ª EOF (modo Barotrópico) para todas as Campanhas. Os painéis superiores representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam a componente paralela à linha de costa (v).

Figura 3.22: Espectros que compõem o sinal da 2ª EOF (1º modo Baroclínico) para todas as Campanhas. Os painéis superiores representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam a componente paralela à linha de costa (v).

Figura 3.23: Espectros que compõem o sinal da 3ª EOF (2º modo Baroclínico) para todas as Campanhas. Os painéis superiores representam a componente perpendicular à linha de costa (u) e os inferiores representam a componente paralela à linha de costa (v).

Dentre os espectros analisados para o fundeio ATALAIA, os do 2º modo Baroclínico (3ª EOF) apresentaram menores valores energéticos. Nestes, destaca-se a maior contribuição energética de sinais de baixa frequência (Figura 3.23) e um máximo de energia na banda equivalente ao pico de energia apresentado para a 2ª EOF (1º modo Baroclínico). Ainda, o sinal de maré semi-diurna ainda é verificado com forte contribuição para a componente perpendicular à linha de costa.

Avaliados estes espectros, pode-se definir a maré semidiurna como principal forçante para a geração de movimentos no sentido perpendicular à costa para o período referente aos dados coletados no fundeio ATALAIA. Isto fica evidenciado pelos picos na frequência próxima a 2 ciclos por dia para a componente perpendicular à linha de costa do modo Barotrópico (1ª EOF). Quanto a componente paralela à linha de costa, o regime de vento é um possível responsável pelo forte sinal na faixa sub-

nercial do espectro do modo Barotrópico (1ª EOF). A fim de verificar esta hipótese, foi estimada a correlação entre o vento e a componente principal do modo Barotrópico (1ª EOF), apresentada posteriormente.

No fundeio PGA-7, em termos das bandas espectrais mais importantes para gerar correntes, observou-se o domínio de uma faixa de frequência na banda subinercial sobre a variabilidade da componente paralela à linha de costa com pico em $5,86 \times 10^{-3}$ ciclos por dia (período aproximado de 6 meses). Para a componente perpendicular à linha de costa, obteve-se maior parte da energia, também, na banda subinercial com pico em $9,375 \times 10^{-2}$ ciclos por dia (período de 10,67 dias), porém houve um pico significativo, para esta componente, próximo a faixa de frequência semidiurna (Figura 3.24). Ao comparar os espectros das duas componentes de velocidade, é constatado que a componente paralela à linha de costa possui energia uma ordem de grandeza superior à componente perpendicular à linha de costa.

Já para o fundeio PCM-9, o pico no espectro foi observado em $2,93 \times 10^{-3}$ ciclos por dia, o que equivale a um período aproximado de 1 ano, tanto para a componente paralela quanto para a componente perpendicular à linha de costa (Figura 3.25). Este período pôde ser observado devido à maior extensão da série correntográfica deste fundeio. Para ambas as componentes de velocidade, foi notado um sinal na faixa de frequência próximo a semidiurna, porém este foi mais significativo para o sinal da componente perpendicular à linha de costa. Ainda, foi observada a mesma predominância energética da componente paralela à linha de costa, com uma ordem de grandeza superior à componente perpendicular à linha de costa.

Figura 3.24: Espectros das correntes paralela (superior) e perpendicular (inferior) à costa para o fundo PGA-7.

Figura 3.25: Espectros das correntes paralela (superior) e perpendicular (inferior) à costa para o fundeio PCM-9.

A análise dos espectros dos fundeios PCM-9 e PGA-7 confirmaram o observado pela análise do fundeio ATALAIA: um forte sinal de maré na faixa semi-diurna associado à componente perpendicular à linha de costa. A maior extensão temporal do banco de dados do fundeio PCM-9 permitiu observar que o sinal sazonal, com período próximo à um ano, é significativo para ambas as componentes de velocidade, sendo mais predominante para a componente paralela à linha de costa. Com isto, há fortes indícios de que o regime de ventos está associado ao forte sinal na faixa subinercial, posto que a PCSEAL está inserida em uma região influenciada pelo ciclo sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), como mencionado na Seção 1.2.

3.1.2.3 Análise harmônica

Verificada a relevância da maré para a circulação da PCSEAL através da análise espectral, realizou-se a análise harmônica das principais componentes diurnas (O1 e K1) e semidiurna (M2 e S2) de maré, onde se estimou as amplitudes e as fases associadas à estas. Antes de efetuar a análise harmônica, assim como realizado na análise espectral, removeu-se a média e a tendência das séries temporais e se efetuou o processo de zero-padding (THOMSON; EMERY, 2014). Para o fundeio ATALAIA, a análise foi realizada para 3 profundidades (5 m, 14 m e 22 m), onde foram avaliados os dados de corrente e não os dados das Componentes Principais dos modos fornecidos pela EOF. Os resultados para este fundeio são apresentados em termos das elipses de maré nas Figuras 3.26 a 3.30.

Figura 3.26: Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C1 (16/10/2013 a 17/12/2013). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).

Figura 3.27: Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C2 (18/12/2013 a 04/02/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).

Figura 3.28: Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C3 (04/02/2014 a 19/03/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).

Figura 3.29: Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C6 (13/08/2014 a 13/10/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).

Figura 3.30: Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 para o fundeio ATALAIA durante a Campanha C7 (13/10/2014 a 12/12/2014). Para cada componente de maré se tem as elipses em diferentes profundidades: 5 m (linha sólida preta), 14 m (linha pontilhada verde) e 22 m (linha pontilhada laranja).

A princípio, observa-se um domínio da componente M2 para as três profundidades, como já indicava a análise espectral. As elipses da componente M2 mostram, também, um alinhamento do semieixo maior com a linha de costa e uma excentricidade relativamente acentuada. As amplitudes do semieixo maior (menor) variam

de $7,6 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ($2,9 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$), na superfície, a $6,5 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ($2,2 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$), no fundo. A componente solar semi-diurna, S2, também tem o seu semieixo maior alinhado com a linha de costa, mas suas amplitudes são consideravelmente menores (Figuras 3.26 a 3.30), com máximo para o semieixo maior (menor) de $2,8 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ($1,1 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$) à 14 m.

Para as componentes diurnas de maré, a lunar O1 e a solar S1, são observadas velocidades de baixa intensidade se comparadas com as componentes semi-diurnas. A amplitude do semieixo maior (menor) para a componente O1 varia de $2 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ($7,5 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$), na superfície, a $1,50 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ($6,5 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$), no fundo. Para a componente K1, os valores para o semieixo maior (menor) variam de $2 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ($7,9 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$), na superfície, a $1,3 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ ($6,5 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$), no fundo. Nota-se, uma maior excentricidade destas elipses comparadas às componentes semi-diurnas, com a variabilidade associada à direção paralela à costa uma ordem de grandeza maior do que na direção perpendicular à costa.

Para os fundeios PGA-7 e PCM-9, os resultados se apresentaram de forma semelhante, com o predomínio da componente M2 (Figuras 3.31 e 3.32) e os semieixos maiores das elipses de maré orientados paralelamente à linha de costa. No fun-deio PCM-9 se observou uma maior excentricidade da componente M2, comparado ao fun-deio ATALAIA, com amplitude de $4,99 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ para o semieixo maior e $2,26 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ para o semieixo menor. No caso da componente S2, observou-se uma excentricidade menor, com amplitude igual a $2,40 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ para o semieixo maior e $6,23 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ para o semieixo menor.

A maior excentricidade da componente M2, comparado ao fun-deio ATALAIA, também foi observada no fun-deio PGA-7. Para esta componente, os valores encontrados para os semieixos maior e menor foram de $3,52 \times 10^{-2}$ e $1,43 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente. Semelhante ao PCM-9, a menor excentricidade da componente S2, em relação à observação feita no fun-deio ATALAIA, também foi encontrada. No fun-deio PGA-7, determinou-se uma amplitude de $1,43 \times 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ para o semieixo maior e $3,86 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ para o semieixo menor da componente S2.

Figura 3.31: Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 no fundeio PGA-7 (19/04/2014 a 17/06/2015).

As componentes diurnas apresentaram um fluxo mais intenso orientado paralelamente à linha de costa (Figuras 3.31 e 3.32). No fundeio PCM-9, a componente O1 se destacou por apresentar um semieixo maior com amplitude ($9,51 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$), cerca de três ordens de grandeza maior do que o semieixo menor ($1,30 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$) (Figura 3.31). Para esta mesma estação, a componente K1 apresentou o semieixo maior com $1,88 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ e o semi eixo menor com $5,50 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$.

No fundeio PGA-7, a elipse da componente O1 apresentou valores de $1,22 \times 10^{-2}$ e $1,40 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ para os semieixos maior e menor, respectivamente. Já a elipse da componente K1 apresentou o semieixo maior com amplitude de $7,58 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ e o semieixo menor com amplitude de $1,28 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$.

Figura 3.32: Elipses de maré das componentes, da esquerda para a direita, M2, S2, O1 e K1 no fundeio PCM-9 (19/03/2012 e 17/06/2015).

3.1.3 Vento

A série temporal de vento observado na região mostra um padrão com pequena variabilidade em sua intensidade e direção. Na estação meteorológica da plataforma PCM-9, observou-se uma intensidade máxima de $16,59 \text{ m.s}^{-1}$, uma média de $6,51 \text{ m.s}^{-1}$ e um desvio padrão de $2,08 \text{ m.s}^{-1}$. Ainda, foi diagnosticado um predomínio dos ventos entre as direções E-SE, com cerca de 67% dos registros nestas direções, e a presença de ventos mais intensos na direção SE (Figura 3.33).

Para a estação meteorológica da plataforma PGA-7, a intensidade máxima registrada foi de $14,87 \text{ m.s}^{-1}$, com média de $6,08 \text{ m.s}^{-1}$ e desvio padrão de $1,89 \text{ m.s}^{-1}$. Assim como na plataforma PCM-9, constatou-se uma predominância dos ventos entre as direções E e SE, com cerca de 59% dos registros. Embora menos frequentes, os eventos mais intensos ocorreram na direção SSE (Figura 3.34).

Figura 3.33: Rosa de distribuição dos ventos para a estação meteorológica da plataforma PCM-9. Note que, diferente das rosas apresentadas para as correntes, as direções representam a origem do vento.

Figura 3.34: Rosa de distribuição dos ventos para a estação meteorológica da plataforma PGA-7. Note que, diferente das rosas apresentadas para as correntes, as direções representam a origem do vento.

Assim como realizado para a série de corrente, foi efetuada a média mensal para o banco de dados de vento mais extenso, no caso o da estação meteorológica da plataforma PCM-9. Observou-se um ciclo semelhante ao constatado na série de média mensal para corrente do mesmo ponto, com uma atenuação da intensidade do vento entre o verão e o outono e uma intensificação entre o inverno e a primavera (Figura 3.35).

Figura 3.35: Média mensal de vento para o fundeio PCM-9 e os respectivos desvios-padrões de cada mês (sombreado).

Este ciclo sazonal já era esperado, por se tratar de uma região sobre a influência dos ventos alísios, os quais possuem um forte ciclo sazonal associado às estações do ano. A semelhança citada entre o comportamento das séries de médias mensais do vento e da corrente reforça a possibilidade desta relação entre o ciclo sazonal da forçante atmosférica com as correntes sobre a PCSEAL. Para comprovar esta hipótese, foi realizada a análise espectral das séries temporais de vento e comparadas aos resultados obtidos com os dos espectros apresentados na Seção 3.1.2.2.

3.1.3.1 Análise espectral

Ao avaliar o espectro das séries temporais de vento, observou-se um forte sinal com frequência em cerca de 1 ciclo por dia para a componente de vento perpendicular à costa em ambas as estações de medição. Este pico evidencia o processo chamado

de brisa marítima / terrestre, causada pelo aquecimento / resfriamento desigual da superfície do mar e da terra. Para a plataforma PGA-7, apesar do forte sinal próximo a frequência de 1 ciclo por dia para a componente perpendicular à linha de costa, a amplitude máxima do espectro desta componente foi encontrada na frequência de $1,17 \times 10^{-2}$ ciclos por dia (período de aproximadamente 3 meses).

Figura 3.36: Espectros para as componentes do vento perpendicular (acima) e paralela (abaixo) à linha de costa para a estação meteorológica da plataforma PGA-7.

Figura 3.37: Espectros para as componentes do vento perpendicular (acima) e paralela (abaixo) à linha de costa para a estação meteorológica da plataforma PCM-9.

O espectro da componente de vento paralela à linha de costa, para a estação meteorológica da plataforma PCM-9, apresentou um máximo de energia na mesma frequência que apresentou pico para o espectro de correntes da mesma estação ($2,93 \times 10^{-3}$ ciclos por dia ou período aproximado de um ano). Isto corrobora com a hipótese mencionada na Seção 3.1.2.2, de que o máximo de energia na banda subinercial apresentado pelo espectro de corrente está associado à forçante meteorológica. Porém, para certificar esta hipótese, é necessário estimar a correlação entre estas forçantes. Ainda para a componente paralela à linha de costa, foi observado, na plataforma PGA-7, um máximo de energia no espectro para banda subinercial, com frequência de $3,52 \times 10^{-3}$ ciclos por dia (período de 9 meses e meio). Estas diferenças entre as frequência onde se observaram os máximos de energia para as estações PGA-7 e PCM-9 podem estar

associadas ao fato destes bancos de dados possuírem extensões temporais diferentes.

3.1.4 Coeficiente de Correlação

Com foco na banda subinercial do espectro, a mais energética para a componente de corrente paralela à linha de costa em todas as estações analisadas, foram estimados os coeficientes de correlação com atraso (c) entre esta e as componentes do vento paralela e perpendicular à linha de costa para os fundeios ATALAIA e PCM-9. Em virtude do número reduzido de dados da estação PGA-7, esta análise não foi realizada para este banco de dados.

Posto a ausência de dados meteorológicos no fundeio ATALAIA, utilizou-se uma série temporal de velocidade do vento obtida na base CFSV2/NCEP (SAHA et al., 2014) do ponto mais próximo a esta estação ($11,14^\circ$ S e $37,02^\circ$ W). Vale ressaltar que, para este fundeio, foi utilizada a componente principal do modo Barotrópico (1ª EOF) para estimar a correlação com o vento, dado que o modo barotrópico (1ª EOF) é dominante para a circulação da PCSEAL, como já discutido na Seção 3.1.2.1. Para esta estação foram obtidos baixos valores de correlação entre a componente do vento perpendicular à linha de costa e a componente da corrente paralela à linha de costa, assim como o seu nível de confiança, com exceção da Campanha C6, que apresentou uma correlação negativa significativa ($c=-0,54$). Já para a correlação entre as componentes do vento e da corrente paralelas à linha de costa, obteve-se resultados com intervalo de confiança (IC) acima de 95% para as Campanhas C1 ($c=0,58$), C6 ($c=0,76$) e C7 ($c=0,65$). Para as demais Campanhas, os resultados apresentaram um IC abaixo de 95% de confiança. (Tabela 3.5).

$u_{vento} \times v_{corrente}$	ATALAIA					PCM-9
	C1	C2	C3	C6	C7	
Correlação	-0.355	0.256	0.157	-0.538	0.062	0.07
Lag (h)	-22	-11	48	-8.5	-37	-12
$v_{vento} \times v_{corrente}$	C1	C2	C3	C6	C7	
	C1	C2	C3	C6	C7	
Correlação	0.580	-0.221	-0.206	0.764	0.653	0.48
Lag (h)	-6	48	15.5	-13.5	-22	-3

Tabela 3.5: Correlação entre a componente da corrente paralela à linha de costa ($v_{corrente}$) e as componentes do vento paralela (v_{vento}) e perpendicular (u_{vento}) à linha de costa, para todas as Campanhas do fundeio ATALAIA e para a plataforma PCM-9.

Para o PCM-9 se obteve resultado semelhante ao fundeio ATALAIA, com um baixo valor de correlação ($c=0.07$) entre a componente da corrente paralela à linha de costa e a componente do vento perpendicular à linha de costa, enquanto que para as componentes do vento e da corrente paralelas à linha de costa se obteve uma correlação de 0.48, que representa um IC acima de 95% (Tabela 3.5).

Portanto, tem-se que o nível de correlação entre as componentes do vento e da corrente paralelas à linha de costa segue o padrão sazonal da intensidade do vento citado na Seção 3.1.3. Há uma alta correlação durante o inverno e a primavera, período de ventos mais intensos, e uma baixa correlação, com baixa confiabilidade, durante o verão e o outono.

3.2 Modelo numérico

A princípio foi realizada a validação do modelo numérico através da comparação entre os dados observados nos fundeios ATALAIA e PCM-9 com os dados de saída do modelo das simulações que contemplaram a ação conjunta das forçantes maré, vento e aporte fluvial (MVR). Para comparação dos dados simulados com os observados foram utilizados os dois pontos de grade mais próximos às posições dos fundeios ATALAIA e PCM-9. Como mencionado na Seção 2.7.5, foram analisados os meses de março, ju-

lho e setembro de 2014, onde foi seguido o método descrito por Willmott (1981) para avaliar a confiabilidade dos dados modelados. Em função da ausência de dados de elevação do nível do mar, foram comparados os dados das componentes de corrente perpendicular e paralela à linha de costa.

Após a validação, foram avaliadas as simulações que consideraram a ação isolada dos forçantes, com o intuito de diagnosticar as características dos movimentos gerados por cada um destes. Em seguida, investigou-se as simulações com as diferentes combinações das forçantes, visando estudar a interação entre estes. Nestas análises se avaliaram a média temporal da velocidade verticalmente integrada, a variância das componentes de corrente perpendicular e paralela à linha de costa, o campo vertical da média temporal da componente de corrente paralela à linha de costa em quatro transectos ao longo do domínio e a evolução das plumas dos rios considerados. Para a análise das seções transversais foram escolhidos os pontos de grade em frente aos rios considerados e um transecto ao norte do Rio São Francisco. Ao final, foi possível elencar os forçantes em ordem crescente de relevância para a geração de movimentos na região.

3.2.1 Validação

No mês de março o modelo não representou o campo de correntes de forma adequada (Figuras 3.38 e 3.39). Ao comparar os dados correntométricos simulados com os observados no fundeio PCM-9, obteve-se um skill de 0,38 para a componente perpendicular à linha de costa e de 0,42 para a componente paralela à linha de costa de corrente. Já a comparação dos dados simulados com os observados no fundeio ATALAIA apresentou valores de skill de 0,49 e 0,47 para as componentes perpendicular e paralela à linha de costa, respectivamente. Constatou-se que a discordância entre os dados simulados e observados para a componente de corrente paralela à linha de costa está, em maior parte, associada a uma corrente que flui em direção ao equador. Isto fica claro ao observar que há instantes em que o vento e a corrente apresentam sinais opostos.

Figura 3.38: No painel superior está exposta a série temporal da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) empregada na simulação numérica, para o ponto de grade próximo ao fundeio ATALAIA, produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. Em função da ausência de dados meteorológicos coletados no ponto do fundeio ATALAIA, não foi possível comparar esta série temporal com dados observacionais. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de março de 2014. Para este período, a partir do dia 20 não houve medição de corrente no fundeio ATALAIA, devido à problemas operacionais.

Figura 3.39: No painel superior estão expostas as séries temporais da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) para a estação meteorológica da plataforma PCM-9 (linha tracejada preta) e para o vento empregado na simulação numérica (linha sólida cinza), sendo este último referente ao ponto de grade próximo ao fundeio PCM-9. O vento empregado na simulação é produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de março de 2014.

No mês de julho, os dados simulados foram comparados somente com os observados no fundeio PCM-9, em virtude da ausência de dados no fundeio ATALAIA. Neste período, o modelo se comportou de forma mais adequada, comparado ao mês de março. Os valores dos skills encontrados para as componentes da corrente perpendicular e paralela à linha de costa foram 0,46 e 0,60. (Figura 3.40).

Figura 3.40: No painel superior estão expostas as séries temporais da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) para a estação meteorológica da plataforma PCM-9 (linha tracejada preta) e para o vento empregado na simulação numérica (linha sólida preta), sendo este último referente ao ponto de grade próximo ao fundeio PCM-9. O vento empregado na simulação é produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de julho de 2014.

Dentre os meses de simulação, o mês de setembro foi o que apresentou maior concordância entre os dados simulados e os observados, especialmente para a componente de corrente paralela à linha de costa. Ao realizar esta comparação com os dados do fundeio ATALAIA, foi encontrado um skill 0,72 para a componente da corrente paralela à linha de costa e um skill de 0,46 para a componente da corrente perpendicular à linha de costa. Já para o fundeio PCM-9 se obtiveram skills com valores de 0,79 e 0,63 para as componentes da correntes paralela e perpendicular à linha de costa, respectivamente.

Figura 3.41: No painel superior está exposta a série temporal da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) empregada na simulação numérica, para o ponto de grade próximo ao fundeio ATALAIA, produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. Em função da ausência de dados meteorológicos coletados no ponto do fundeio ATALAIA, não foi possível comparar esta série temporal com dados observacionais. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio ATALAIA (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de setembro de 2014.

Figura 3.42: No painel superior estão expostas as séries temporais da componente do vento paralela à linha de costa (V_{vento}) para a estação meteorológica da plataforma PCM-9 (linha tracejada preta) e para o vento empregado na simulação numérica (linha sólida preta), sendo este último referente ao ponto de grade próximo ao fundeio PCM-9. O vento empregado na simulação é produto da interpolação dos dados do CFSv2 fornecidos pelo NCEP. No painel do meio, têm-se as séries temporais da componente da corrente paralela à linha de costa ($V_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), assim como o skill encontrado pela comparação entres estas. No painel inferior estão expostas as séries temporais da componente de corrente perpendicular à linha de costa ($U_{corrente}$) para o fundeio PCM-9 (linha tracejada preta) e para os resultados fornecidos pela simulação numérica (linha contínua cinza), com o valor de skill encontrado entre estas séries. Os dados exibidos são referentes ao mês de setembro de 2014.

Em primeira análise, observa-se que os valores de skill seguiram o comportamento de ascensão da intensidade do vento, onde se obteve menores skills para o mês de março (ventos menos intensos) e maiores skills para o mês de setembro (ventos mais intensos). Desta forma, supõe-se um domínio da forçante meteorológica sobre a circulação da PCSEAL nos meses de ventos mais intensos. Do mesmo modo, constatou-se que há uma variabilidade nas correntes que não foi representada pelo modelo numérico e que está, em maior parte, associada à uma corrente que flui em direção ao equador. Este sinal fica mais evidente ao se avaliar a diferença entre as

componentes da corrente paralela à linha de costa dos dados observacionais e dos simulados, o que forneceu, em maior parte, uma diferença associada à uma corrente com sinal positivo (Figura 3.43).

Figura 3.43: Séries temporais para as diferenças entre os dados observacionais e os dados de saída do modelo numérico para componente da corrente paralela à linha de costa.

Neste contexto, pode-se citar dois possíveis responsáveis por esta corrente que flui em direção ao equador e que não foi resolvida pelo modelo numérico: (1) o aporte fluvial, uma vez que a teoria citada na Seção 1.3 aponta um fluxo na superfície que deixa a costa à esquerda para os movimentos gerados por este forçante na região da PCSEAL; (2) a influência da Subcorrente Norte do Brasil (SNB) que flui ao largo da PCSEAL, também, em direção ao equador. Posto que o modelo não considerou a variabilidade das vazões dos rios e a estratificação responsável pela geração da SNB, justifica-se o fato das simulações não terem representado este sinal citado.

3.2.2 Simulações com maré (M)

Como posto na Seção 2.7.3, foram considerados os principais harmônicos de maré diurnos (O1, K1 e P1) e semidiurnos (M2, S2, N2). Com isto, para estas simulações, a média temporal da corrente verticalmente integrada será mencionada como circulação

residual de maré. Vale ressaltar que as médias temporais dos meses de março, julho e setembro incluíram um total de 46 (15 dias de aquecimento do modelo + 31 dias analisados), 46 e 45 dias, respectivamente. Ainda, também pelo fato de terem sido consideradas somente as constituintes diurnas e semidiurnas, os resultados das três simulações foram os mesmos. Desta forma, explorou-se somente os resultados referentes ao mês de março, para evitar repetições.

Para o fluxo residual, observou-se correntes de baixa intensidade que não ultrapassam $0,4 \text{ cm.s}^{-1}$ em grande parte do domínio (Figura 3.44). Constatou-se, também, que o fluxo residual está restrito à região da plataforma continental e flui, preferencialmente, na direção Nordeste, paralelo à linha de costa. Ainda, observou-se máximos de corrente residual em alguns pontos próximos à linha de costa, com destaque para a região próxima a Maceió e próxima ao rio São Francisco. Apesar destas regiões estarem na porção mais ao norte da PCSEAL, as maiores intensidades foram observadas na porção mais ao sul. Nas regiões próximas aos cânions, também foram observadas correntes com intensidades mais significativas.

Ao avaliar a variância causada pela maré, observou-se que a componente da corrente paralela à linha de costa possui maior variabilidade, com um máximo de variância de $2,43 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ para a superfície e $0,61 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ no fundo (Figura 3.45). Observou-se que a maior variabilidade gerada pela maré está contida na superfície, com um decaimento em direção ao fundo. Para a componente perpendicular à linha de costa, observou-se um valor máximo de $0,82 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ na superfície e $0,07 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ no fundo (Figuras 3.45 e 3.46).

Figura 3.44: Média temporal (46 dias) da corrente integrada verticalmente para a simulação de Maré (M) referente ao mês de março de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade.

Esta maior variância da componente de corrente paralela à linha de costa constata o que já havia sido descrito na Seção 3.1.2.3, ao se observar o alinhamento do semieixo maior das elipses de maré com a linha de costa. Isto revela que a maré incide na PCSEAL com uma componente paralela à linha de costa mais significativa do que a perpendicular.

Figura 3.45: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa para a simulação de Maré (M) referente ao mês de março de 2014. No canto inferior direito de cada mapa está indicado o máximo de variância encontrado. Da esquerda para a direita, tem-se a variância na superfície, no meio da coluna d'água e no fundo, nesta ordem.

Figura 3.46: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa para a simulação com Maré (M) referente ao mês de março de 2014. No canto inferior direito de cada mapa está indicado o máximo de variância encontrado. Da esquerda para a direita, tem-se a variância na superfície, no meio da coluna d'água e no fundo, nesta ordem.

O sentido preferencial do fluxo residual em direção ao equador fica mais evidente ao observar as seções transversais da componente da corrente residual paralela à linha de costa (Figura 3.47). Nestes transectos, as correntes residuais mais intensas, cerca de $0,3 \text{ cm.s}^{-1}$, foram observadas na superfície, com uma única exceção para o do rio São Francisco, que apresentou um sinal de corrente residual máxima próximo à profundidade de 50 m (Figura 3.47). Esta assinatura aparenta estar associada à topografia acidentada na região do transecto.

Figura 3.47: Seções transversais à linha de costa da componente da corrente residual paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com Maré (M) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas sólidas indicam uma corrente que flui deixando a costa à esquerda, enquanto que as linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

De modo geral, os transectos (Figura 3.47) mostram um posicionamento das correntes residuais mais intensas na região próxima à costa, com um fluxo em direção ao equador. Apenas o transecto mais ao sul apresentou, na superfície, correntes residuais mais intensas distribuídas por praticamente toda a plataforma continental. Com excessão do sinal de máxima corrente residual à 50 m, citado no parágrafo anterior (transecto do rio São Francisco), as correntes residuais geradas pela maré diminuem à medida que se aproximam do fundo.

3.2.3 Simulações com vento (V)

Ao avaliar a média temporal da velocidade integrada na vertical, observou-se que o vento gera uma circulação que supera em 2 ordens de grandeza a média da circulação gerada pela maré (Figura 3.48). Dentre os períodos, setembro apresentou a maior máxima para o campo médio de corrente, com $22,6 \text{ cm.s}^{-1}$, ao passo que o mês de março apresentou a menor máxima, com $21,1 \text{ cm.s}^{-1}$. Constatou-se que nas regiões próximas aos cânions há uma certa descontinuidade no fluxo, com menores velocidades nas regiões dos cânions e velocidades mais elevadas nas faixas próximas a estes, sobre a PCSEAL, na direção SW. Ainda, verifica-se velocidades mais intensas nas regiões à barlavento dos cânions, uma provável consequência da convergência das correntes causada pelo elevado gradiente topográfico em virtude dos cânions.

Apesar das menores intensidades, o mês de março apresentou um escoamento médio mais uniforme, comparado aos demais, o que se deve a menor variação na direção do vento neste período. Isto fica claro ao avaliar os campos de variância (Figuras 3.49 e 3.50), onde se observa uma maior variância para o mês de setembro e menor para o mês de março.

Dentre as componente de corrente, a componente paralela à linha de costa apresentou maior variância em todos os períodos, com máximas de $0,57 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$, $1,82 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ e $6,24 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ para os respectivos meses de março, julho e setembro. Para a componente perpendicular à linha de costa, foram observados valores de variância máxima de $0,34 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$, $1,33 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ e $3,22 \text{ cm}^2.\text{s}^{-2}$ nos meses de março, julho e setembro, nesta ordem.

Os valores de variância da corrente no mês de março foram menores do que os observados nas simulação com maré (M). Isto indica que durante este período a maré é mais significativa para a variabilidade do campo de correntes sobre a PCSEAL. Nos demais meses, o vento foi mais significativo para a variabilidade da circulação na PCSEAL, com destaque para setembro, pois observou-se valores de variância superiores aos observados nas simulações com maré (M) nestes períodos (Figuras 3.49 e 3.50).

Figura 3.48: Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com vento (V) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).

Figura 3.49: Variâncias ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com vento (V) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Figura 3.50: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para a simulação V referente aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Na Figura 3.48 se observa zonas com menores valores de velocidade média para a PCSEAL próximas as coordenadas 10° S e 36° W e $11,2^\circ \text{ S}$ e 37° W , para os meses de julho e setembro. Estas zonas serão mencionadas como zonas de “sombra”. Ao compararmos o campo de velocidade média com o campo de variância da componente paralela à linha de costa destes períodos (Figura 3.49), observa-se valores mais significativos de variância nas regiões de sombra. Portanto, é importante esclarecer que os baixos valores de velocidade média encontrados nessas regiões não indicam ocorrência de fracas correntes. Estes baixos valores foram encontrados devido ao surgimento de correntes com sentidos opostos mais intensas, o que diminui o valor da média mensal.

Com o intuito de avaliar a causa dessas zonas de sombra, elaborou-se mapas

de variância do campo de vento utilizado nas simulações. Nas Figuras 3.51 e 3.52 é possível observar que não se constata uma justaposição das zonas de máxima variância do vento com as áreas de sombra de corrente. Porém, observa-se que nos meses de julho e setembro há uma maior variância da componente do vento paralela à linha de costa, a mais significativa para a geração de correntes ao longo da costa, comparados ao mês de março. Desta forma, acredita-se que há um segundo termo que, somado à maior variabilidade do vento nos meses de julho e setembro, é responsável por estas zonas de sombra. Ao avaliar a Figura 3.48 é possível se atribuir este segundo termo à batimetria, visto que estas zonas ocorrem em regiões onde há uma mudança na largura da PCSEAL. Esta mudança causa uma constrição/expansão do fluxo e, consequentemente, um aumento da variabilidade da corrente em função do ajuste do fluxo à topografia.

Figura 3.51: Variância ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$) da componente do vento perpendicular à linha de costa para as simulações com vento (V) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014 para a PCSEAL. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Figura 3.52: Variância ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$) da componente do vento paralela à linha de costa para as simulações com vento (V) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014 para a PC-SEAL. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Foi observado, em todas as simulações, um fluxo médio significativamente polarizado no sentido paralelo à costa que flui deixando a costa à sua direita, no sentido contrário ao fluxo gerado pela maré residual (Figura 3.48).

Os campos de corrente média paralela à linha de costa para os transectos avaliados mostraram uma respostas puramente barotrópica da circulação sobre a PCSEAL à ação do vento, com maiores intensidades na superfície e uma diminuição desta em direção ao fundo (Figuras 3.53 a 3.55). A orientação da corrente média apresentou uma direção que segue a topografia, com uma maior inclinação destas no mês de julho. Com isto, foram observados menores valores de intensidade de corrente média próxima à linha de costa durante o mês de julho. Em todos os períodos se constatou que, em superfície, as correntes médias mais intensas se posicionaram próximas à quebra da plataforma continental, na maior parte dos transectos.

Figura 3.53: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento (V) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Figura 3.54: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento (V) referente ao mês de julho de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Figura 3.55: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento (V) referente ao mês de setembro de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

3.2.4 Simulações com descarga fluvial (R)

O campo médio de velocidade integrada verticalmente mostrou um domínio da influência da vazão proveniente do rio São Francisco, o que já era esperado devido à superioridade de cerca de 3 ordens de grandeza entre a vazão deste em relação aos rios Vaza Barris e Sergipe. Como disposto na Tabela 2.4, a vazão do rio São Francisco não sofreu mudanças significativas entre os períodos analisados, o que pode ser apontado como causa da semelhança entre os campos médios observados (Figura 3.56) em todos

os períodos simulados. Observam-se duas feições distintas que se destacam no campo médio de velocidade integrada: um fluxo paralelo à costa causado pelo gradiente de densidade, ao norte do rio São Francisco, que segue para NE, e outro fluxo na direção contrária, entre o rio São Francisco e o cânion de Japaratuba, causado pela inércia da vazão do rio São Francisco.

As correntes baroclínicas geradas pela influência do aporte fluvial apresentaram a mesma ordem de grandeza das correntes geradas pela tensão de cisalhamento do vento (10 cm.s^{-1}), porém com sentidos opostos. Isto sugere que existe uma competitividade significativa entre essas forçantes, ao mesmo tempo que o fluxo residual de maré, apesar de apresentar fracas correntes, parece agir de forma construtiva sobre o fluxo de fluabilidade.

Devido ao fato do sinal do rio São Francisco ter “mascarado” os sinais dos rios Sergipe e Vaza Barris, foram realizadas 3 simulações que contemplaram somente as vazões destes últimos dois rios, sendo uma para cada período avaliado, com o intuito de determinar a influência destes sobre a circulação da PCSEAL. Estas foram simulações adicionais que não estão inclusas nas 21 mencionadas anteriormente.

Figura 3.56: Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com descarga fluvial (R) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).

Figura 3.57: Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com descarga fluvial (R) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014 que não contemplaram a vazão do rio São Francisco. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}). Os mapas ficaram restritos à região próxima aos rios Sergipe e Vaza Barris para uma melhor visualização.

Constatou-se que estes afluentes são responsáveis por gerar uma corrente média na ordem de 1 cm.s^{-1} , uma ordem de grandeza inferior à corrente média gerada pela vazão do rio São Francisco, que flui em direção ao equador (Figura 3.57). Dentre as simulações, o mês de março apresentou uma corrente média menos intensa, com máximo de $1,48 \text{ cm.s}^{-1}$, o que era esperado devido à menor vazão média neste período. Já no mês de julho, apesar de apresentar maior vazão média dentre as simulações, as correntes médias observadas foram inferiores às apresentadas no mês de setembro. Isto está relacionado, provavelmente, às maiores vazões nos meses anteriores, no caso o mês de junho e agosto, visto que as simulações tinham 15 dias iniciais que foram alimentados com dados reais, como já mencionado. Isto foi confirmado ao verificar que para o rio Vaza Barris a vazão média do mês de agosto foi de $16,20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e do mês de junho foi de $6,01 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ no ano de 2014. Para o rio Sergipe, não havia dados disponíveis no mês de junho e o mês de agosto apresentou uma vazão média de $2,63 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Dentre as simulações com a ação isolada das forçantes, as simulações com descarga fluvial (R) apresentaram os menores valores de variância (Figuras 3.58 e 3.59), com um máximo na superfície de 0,58 e 0,39 ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) para as componentes paralela e perpendicular à costa, respectivamente. Isto já era esperado, uma vez que foi considerado uma vazão média mensal, ou seja, uma descarga constante no tempo durante cada mês de simulação.

Figura 3.58: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com descarga fluvial (R) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Figura 3.59: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com descarga fluvial (R) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Nos transectos avaliados, os campos de corrente paralela à linha de costa mostraram resultados coerentes com os encontrados por Csanady (1978) e Kao (1981), ao estudarem a circulação causada pela intrusão de água doce sobre a plataforma continental (Figuras 3.60 a 3.62). Nota-se um fluxo com elevado cisalhamento vertical de velocidade nas radiais próximas às localizações dos rios São Francisco e Sergipe, onde na superfície se observa um fluxo em direção ao equador e, no fundo, um fluxo na direção oposta. Na radial ao norte do rio São Francisco, o fluxo segue em direção ao equador em toda a coluna d'água, com máximo de velocidade na superfície na porção média da plataforma continental. Já na radial em frente ao rio Vaza Barris, observa-se um fluxo que deixa a costa à direita em toda a coluna d'água, o que está, provavelmente, relacionado ao forte fluxo causado pela inércia da vazão do rio São Francisco, e não à influência do fluxo de flutuabilidade causado pelo vazão do rio Vaza Barris.

Figura 3.60: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com descarga fluvial (R) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Figura 3.61: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com descarga fluvial (R) referente ao mês de julho de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Figura 3.62: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com descarga fluvial (R) referente ao mês de setembro de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Observou-se, também, que a pluma do rio São Francisco chega à região do oceano profundo, uma vez que esta cruza a quebra da PCSEAL, representada pela isóbata de 50 m (Figura 3.63). O limite considerado para esta pluma foi à linha de salinidade igual à 36,5. Parte da pluma segue para SW, transportada pela inércia da vazão do rio, e alcança o cânion Japarutupa, enquanto a outra parcela, mais significativa, flui para NE próxima à linha de costa. Na Figura 3.63, tem-se a evolução temporal da pluma e o campo médio de velocidade integrada verticalmente para o mês de março. Os demais

meses tiveram um padrão de dispersão da pluma significativamente semelhante ao mês de março e, por este motivo, não foram dispostos.

Figura 3.63: Evolução temporal da pluma do rio São Francisco (linha de salinidade igual a 36,5), com o tempo inicial (01/03/2014) representado pela linha preta contínua e o tempo final (31/03/2014) pela linha preta pontilhada. Os vetores indicam a direção e intensidade da média temporal da corrente integrada verticalmente. As linhas cinzas contínuas representam as isóbatas de 50, 1000 e 2000 m

3.2.5 Simulações com maré e vento (MV)

O campo médio de velocidade integrada verticalmente apresentou resultados similares aos obtidos pelas simulações com vento (V), porém a interferência do fluxo residual de maré sobre os movimentos gerados pelo cisalhamento do vento é indicada pelos máximos de corrente observados (Figura 3.64). Como mencionado na Seção

anterior, detectou-se uma interferência destrutiva entre os fluxos gerados por estes forçantes, uma vez que as máximas de correntes diminuíram 1,20, 0,60 e 1,10 cm.s^{-1} em relação as simulações com vento (V), nos meses de março, julho e setembro, respectivamente.

A estrutura vertical da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa apresentou resultados significativamente semelhantes aos encontrados nas simulações com vento (V). Por este motivo os perfis verticais destas simulações não foram mostrados. Isto evidencia a predominância da tensão de cisalhamento do vento sobre a maré na geração de movimentos paralelos à costa na PCSEAL.

No mês de março foi observado que a maior parcela da variabilidade está associada ao fluxo residual causado pela maré, uma vez que a variância, neste período, aumentou cerca de 3 vezes o valor encontrado para a componente perpendicular à linha de costa e 4 vezes para a componente paralela à linha de costa em relação à simulação com vento para o mesmo período. Nos demais meses, os valores de variância encontrados foram próximos aos encontrados para a simulação V, o que indica o predomínio da tensão de cisalhamento do vento na variabilidade das correntes durante estes períodos (Figuras 3.65 e 3.66).

Figura 3.64: Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com maré e vento (MV) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).

Figura 3.65: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com maré e vento (MV) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Figura 3.66: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com maré e vento (MV) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

3.2.6 Simulações com maré e descarga fluvial (MR)

Os resultados observados nestas simulações foram significativamente semelhantes aos observados nas simulações com descarga fluvial (R), com pequenas mudanças nas intensidades das correntes observadas. A máxima para o campo médio temporal de velocidade integrada verticalmente diminuiu em todos os períodos, com máximas de 11,60, 11,20 e 11,10 m.s^{-1} para os meses de março, julho e setembro, nesta ordem (Figura 3.67).

Figura 3.67: Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com maré e descarga fluvial (MR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).

Os campos de variância observados (Figuras 3.68 e 3.69) apresentaram maior semelhança com os observados nas simulações com maré (M) (Figuras 3.45 e 3.46) do que com os das simulações com descarga fluvial (R) (Figuras 3.58 e 3.59). Como já mencionado, isto se deve ao fato de não ter sido considerada a variabilidade da descarga fluvial, posto que foi considerada uma média mensal para a vazão dos rios (vazão constante).

Figura 3.68: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com maré e descarga fluvial (MR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Figura 3.69: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com maré e descarga fluvial (MR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Os transectos avaliados apresentaram uma circulação média com estrutura análoga aos resultados obtidos nas simulações com descarga fluvial (R), com ape-

nas uma redução na intensidade da componente da corrente média paralela à linha de costa em cerca de 2 cm.s^{-1} . Assim, estes resultados não foram mostrados. Esta redução nega a hipótese citada na Seção 3.2.4, de uma possível ação construtiva da maré e do aporte fluvial na geração de correntes na região. Isto deve ocorrer devido ao aumento do processo de mistura causado pela ação da maré, que acarreta na mudança do ajuste geostrófico baroclínico em relação às simulações com descarga fluvial (R) e, consequentemente, na atenuação das correntes. Ou seja, a intensificação do processo de mistura causada pela maré ocasiona uma diminuição dos gradientes salinos oriundos da descarga fluvial e, assim, uma atenuação das correntes baroclínicas causadas pela influência dos rios.

3.2.7 Simulações com vento e descarga fluvial (VR)

Os padrões de circulação apresentados pela média de velocidade integrada verticalmente, nos três períodos, mostraram comportamentos similares aos observados nas simulações com vento (V), o que indica um predomínio do vento sobre a circulação em relação aos movimentos gerados pela influência do aporte fluvial. Nos pontos de grade próximos ao rio São Francisco, a vazão deste rio e o transporte de deriva do vento se somaram e, como consequência, verificou-se maiores valores para a corrente média máxima nos meses de março e setembro, em comparação às simulações com vento (V) (Figura 3.70).

Figura 3.70: Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com vento e descarga fluvial (VR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).

O campos de variância apresentaram resultados superiores aos obtidos pelas simulações com vento (V), onde a região da foz do rio São Francisco se destaca nos três períodos como de maior variância (Figuras 3.71 e 3.72). Porém, vale destacar que esta maior variância se deve à variabilidade do vento utilizado e à presença de correntes mais intensas nessa região devido à ação contrutiva da tensão de cisalhamento do vento e da descarga do rio. Ou seja, esta alta variância não está associada à variabilidade da descarga fluvial, uma vez que foi considerado uma vazão mensal média. No mês de setembro, além da foz do rio São Francisco, as regiões de sombra citadas na Seção 3.2.3 também se destacam com variância elevada.

Figura 3.71: Variância ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com vento e descarga fluvial (VR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Figura 3.72: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com vento e descarga fluvial (VR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Ao avaliar a média temporal para a componente da corrente paralela à linha de costa para os transectos considerados, fica evidente o domínio do vento sobre a circulação, pois se observa um padrão barotrópico para a circulação, onde o fluxo médio ocorre em apenas uma única direção na coluna d'água, deixando à costa a sua direita (Figuras 3.73 a 3.75). As correntes mais intensas são observadas na superfície e há uma diminuição destas à medida que se aproxima do fundo. No mês de março, apesar da presença de ventos menos intensos, verificou-se valores mais intensos para a média temporal da componente paralela à linha de costa. Atribui-se esta observação à menor ocorrência da inversão do vento na direção paralela à linha de costa durante essa época.

Figura 3.73: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento e descarga fluvial (VR) referente ao mês de março de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Observou-se que o sinal de baixa salinidade oriundo da vazão do rio São Francisco não é mais verificado no transecto mais ao norte do domínio (Figuras 3.73 a 3.75), como nas simulações com descarga fluvial (R) e com maré e descarga fluvial (MR). Em frente ao rio Vaza Barris se observou um forte sinal de baixa salinidade. Porém, observando a Figura 3.76, constata-se que este sinal é oriundo do aporte do rio São Francisco que foi transportado para SW pela ação do vento. Em todos os períodos, a pluma do

rio São Francisco fluiu para SW, margeando a linha de costa.

Figura 3.74: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento e descarga fluvial (VR) referente ao mês de julho de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Figura 3.75: Seções Transversais à linha de costa da média temporal da componente da corrente paralela à linha de costa (cm.s^{-1}) para a simulação com vento e descarga fluvial (VR) referente ao mês de setembro de 2014. As linhas pretas tracejadas indicam uma corrente que flui deixando à costa à direita e as linhas pretas sólidas indicam uma corrente no sentido contrário. A escala de cores representa o campo de salinidade, com os menores valores de salinidade na cor azul e os maiores na cor vermelha. No canto inferior esquerdo de cada painel está marcado em vermelho, no mapa, o transecto ilustrado.

Ao comparar a evolução da pluma do rio São Francisco para os diferentes períodos, tem-se que no mês de julho a pluma percorreu uma distância menor. Em todos os períodos, observa-se que a pluma do rio São Francisco não cruzou a isóbata de 50 m, como observado nas simulações com descarga fluvial (R) e com maré e descarga fluvial (MR).

Figura 3.76: Evolução temporal da pluma do rio São Francisco, com o tempo inicial representado pela linha preta contínua e o tempo final pela linha preta pontilhada. Os vetores indicam a direção e intensidade da média temporal da corrente integrada verticalmente. As linhas cinzas contínuas representam as isóbatas de 50, 1000 e 2000 m

3.2.8 Simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR)

Os campos médios de velocidade integrada verticalmente apresentaram resultados semelhantes aos obtidos pelas simulações com vento e descarga fluvial (VF), o que demonstra a fraca influência da maré no fluxo residual sobre a PCSEAL (Figura 3.77). A corrente média apresentou uma polarização paralela à linha de costa com um fluxo que deixa à costa à direita. Assim como observado nas demais simulações que consideraram a ação do vento, constatou-se zonas de sombra no campo de corrente média nos meses de julho e setembro. Na Seção 3.2.3 se vinculou a presença dessas zonas de sombra ao efeito da batimetria na circulação e à maior variabilidade do vento nestes períodos.

A média temporal da componente de corrente paralela à linha de costa, nos transectos avaliados, foi semelhante ao observado na simulações com vento e descarga fluvial (VF). Desta forma, não foram apresentados para evitar repetição. Isto reforça a definição da fraca influência da maré na geração de correntes residuais paralelas à linha de costa. Em geral, o que se observa é um comportamento barotrópico da média temporal da circulação, com correntes mais intensas na superfície e menos intensas próximo ao fundo que fluem deixando a costa à direita.

Figura 3.77: Médias temporais das correntes integradas verticalmente para as simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR) referentes ao meses de março, julho e setembro de 2014. Os vetores indicam a direção da corrente e a escala de cores indica a intensidade (cm.s^{-1}).

Figura 3.78: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente paralela à linha de costa na superfície para as simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Figura 3.79: Variância ($\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$) da componente da corrente perpendicular à linha de costa na superfície para as simulações com maré, vento e descarga fluvial (MVR) referentes aos meses de março, julho e setembro de 2014. No canto inferior direito de cada mapa estão indicados o mês da simulação e o máximo de variância encontrado.

Em todos os períodos foram encontrados valores máximos de variância na região em frente à foz do rio São Francisco, apesar de não ter sido adicionado à variabilidade da vazão fluvial nas simulações. Setembro apresentou valores mais elevados de variância para ambas componentes da corrente. Neste mês, destaca-se os máximos de variância da componente da corrente paralela à linha de costa nas regiões de sombra já mencionadas.

Ao final da análise das diferentes simulações, constatou-se que no período de ventos menos intensos, entre o verão e o outono, a maré é responsável pela maior variabilidade das correntes sobre a PCSEAL, apesar de não ser significativa na geração

de correntes residuais, devido ao seu caráter cíclico. Nesta época, foi demonstrado que há uma significativa competição entre a ação dos ventos e o aporte fluvial sobre a circulação residual na PCSEAL. Ainda, acredita-se que há uma influência da SNB na dinâmica da PCSEAL associada à possíveis processos de mesoescala, como a presença de meandros. Porém, esta forçante não foi implementada nas simulações numéricas, o que impossibilitou seu estudo. À medida que se aproxima do segundo semestre (Inverno-Primavera), com a intensificação dos ventos, há uma maior contribuição deste forçante para a variabilidade da circulação da PCSEAL e um forte domínio deste na dinâmica da região.

Para avaliar a competição entre as forçantes durante os meses de ventos menos intensos, seria necessário adicionar, pelo menos, a variabilidade da vazão do rio São Francisco. Porém, não há uma fonte de dados confiável que forneça esta informação. Já para o estudo da influência da SNB sobre os movimentos na PCSEAL, torna-se necessário adicionar a estratificação responsável pelo surgimento desta feição no domínio do modelo. Portanto, ficam estas sugestões para futuros estudos numéricos a serem realizados na região.

Capítulo 4

Conclusões

O presente trabalho analisou dados de dois correntógrafos, um perfilador acústico, duas estações meteorológicas e vinte estações hidrográficas, coletados na Plataforma Continental da bacia Sergipe-Alagoas (PCSEAL) no âmbito do Projeto de Caracterização Regional da bacia de Sergipe-Alagoas, realizado em convênio entre a PETROBRAS e o Departamento de Oceanografia Física da Universidade de São Paulo. Complementar à análise de dados, foram realizadas simulações numéricas das condições hidrodinâmicas da PCSEAL para diferentes condições das forçantes vento, maré e aporte fluvial com o auxílio do modelo SÉCOM. Estes procedimentos visaram caracterizar a dinâmica na PCSEAL em termos de suas principais forçantes, hierarquizar a ação destas e estudar as respostas hidrodinâmicas da PCSEAL à ação isolada do vento, da maré e do aporte fluvial.

Os dados hidrográficos assinalaram uma homogeneidade da coluna d'água sobre a PCSEAL com alguns focos de baixa salinidade na superfície. As baixas profundidades (em média 40 m), a presença de ventos constantes (característica de regiões sobre a influência dos ventos alísios) e a proximidade da quebra da plataforma com à costa (plataforma continental estreita) são características da PCSEAL que fizeram com que já fosse esperado um perfil homogêneo do seu campo termohalino. Ainda, tendo o rio São Francisco como afluente, uma das principais bacias hidrográficas do Brasil e da América do Sul, era previsto se observar sinais de baixa salinidade oriundos da contribuição fluvial.

Como aguardado em uma plataforma com ação constante da tensão de cisalhamento do vento e com uma coluna d'água homogênea, verificou-se que o modo barotrópico domina a dinâmica da PCSEAL. Pela análise espectral foi possível observar que este modo está fortemente associado à maré na componente da corrente perpendicular à linha de costa e à banda subinercial do espectro na componente paralela. Ainda, como na maioria das regiões dos oceanos, a maré apresentou a componente semidiurna M2 como mais energética e uma forte polarização na direção paralela à linha de costa.

Por estar inserida em uma região sobre a influência da migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical, esperava-se também diagnosticar um forte ciclo sazonal para a forçante atmosférica. Isto foi constatado pela análise do espectro de energia do vento, onde se obteve uma maior contribuição na banda subinercial e um pico no período aproximado de um ano. Tendo como hipótese inicial o domínio da tensão de cisalhamento do vento sobre a circulação na PCSEAL, previa-se encontrar este forte ciclo sazonal associado, de forma similar, aos campos de corrente. Este ciclo foi confirmado, com correntes mais intensas durante o inverno e a primavera e menos intensas durante o verão e o outono. Porém, verificou-se que o vento não domina a circulação na PCSEAL durante todo o ano.

Foi observado, pelos coeficiente de correlação estimados entre o vento e a corrente e pelas simulações realizadas, que a tensão de cisalhamento do vento domina a dinâmica da PCSEAL somente durante os meses de ventos mais intensos (inverno e primavera). Nas demais estações, foi averiguado pelas simulações numéricas que há uma competição entre a circulação gerada pelo aporte fluvial e a ação do vento. Ainda, a pequena largura da PCSEAL combinada com a presença de dois grandes cânions e a existência de uma corrente de contorno oeste que flui ao largo da quebra da plataforma faz com que se acredite em uma suposta contribuição da circulação de larga escala, no caso a Subcorrente Norte do Brasil (SNB), que seja significativa nos meses de vento menos intensos. Porém, não se avaliou esta forçante nas simulações.

As simulações numéricas possibilitaram o estudo isolado de algumas forçantes sobre a PCSEAL. Nestas, constatou-se que a maré é menos significativa para a geração

de correntes residuais na região, sendo responsável por causar correntes residuais que fluem para NE com intensidade na ordem de $10^{-1} \text{ cm.s}^{-1}$. Dentre as forçantes, o vento foi mais sinigificativo na geração de correntes, com uma forte polarização destas no sentido paralelo à linha de costa, na direção SW, com intensidades na ordem de 10 cm.s^{-1} . Ainda, foi verificado que a vazão do rio São Francisco é capaz de gerar correntes, nas regiões sobre a influência da pluma, com a mesma ordem de grandeza das correntes geradas pelo vento e com um fluxo em direção ao equador.

Uma vez que as simulações para o período de ventos menos intensos não representaram adequadamente a circulação sobre a PCSEAL, supõe-se uma disputa significativa entre a tensão de cisalhamento do vento, o aporte fluvial e a influência da SNB neste período. Esta disputa não pôde ser representada pelo modelo devido ao fato de não terem sido consideradas as variabilidades associadas à vazão do rio São Francisco e à SNB.

Desta forma, como sugestão para o seguimento de estudos nesta região, tem-se: estudar a influência da SNB sobre a PCSEAL através de análise de dados, realizar simulações numéricas que contemplem a ação da SNB e a variabilidade das vazões dos rios da região.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, H. M. P. Distribution of paracalanidae species (copepoda, crustacea) in the continental shelf off sergipe and alagoas states, northeast brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, SciELO Brasil, v. 54, n. 4, p. 173–181, 2006.

BLUMBERG, A. F.; GALPERIN, B.; O'CONNOR, D. J. Modeling vertical structure of open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 118, n. 8, p. 1119–1134, 1992.

BLUMBERG, A. F.; KHAN, L. A.; JOHN, J. P. S. Three-dimensional hydrodynamic model of new york harbor region. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 1999.

BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. A coastal ocean numerical model. In: *Mathematical modelling of estuarine physics*. [S.l.]: Springer, 1980. p. 203–219.

BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-dimensional coastal ocean models*, Wiley Online Library, p. 1–16, 1987.

CARTWRIGHT, D. E. Oceanic tides. *Reports on Progress in Physics*, IOP Publishing, v. 40, n. 6, p. 665, 1977.

CHARNEY, J. Generation of oceanic currents by wind. *J. Marine Res.*, v. 14, p. 477–498, 1955.

CLARKE, A. J.; BRINK, K. The response of stratified, frictional flow of shelf and slope waters to fluctuating large-scale, low-frequency wind forcing. *Journal of Physical Oceanography*, v. 15, n. 4, p. 439–453, 1985.

- COSTA, G. B.; LYRA, R. Análise dos padrões de vento no estado de alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 27, n. 1, p. 31–38, 2012.
- CSANADY, G. Barotropic currents over the continental shelf. *Journal of Physical Oceanography*, v. 4, n. 3, p. 357–371, 1974.
- CSANADY, G. The arrested topographic wave. *Journal of Physical Oceanography*, v. 8, n. 1, p. 47–62, 1978.
- EGBERT, G. D.; BENNETT, A. F.; FOREMAN, M. G. Topex/poseidon tides estimated using a global inverse model. American Geophysical Union, 1994.
- EMERY, W.; THOMSON, R. Data analysis methods in physical oceanography. Pergamon, 1997.
- FOFONOFF, N. Dynamics of ocean currents. *The sea*, Physical Oceanography, v. 1, p. 323–395, 1962.
- GALPERIN, B. et al. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 45, n. 1, p. 55–62, 1988.
- GILL, A.; SCHUMANN, E. H. The generation of long shelf waves by the wind. *Journal of Physical Oceanography*, v. 4, n. 1, p. 83–90, 1974.
- GOES, M. et al. Retroreflections of the north brazil current during february 2002. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Elsevier, v. 52, n. 4, p. 647–667, 2005.
- JOHNS, B. *Physical oceanography of coastal and shelf seas*. [S.l.]: Elsevier, 1983.
- KAO, T. W. The dynamics of oceanic fronts. part ii: Shelf water structure due to freshwater discharge. *Journal of Physical Oceanography*, v. 11, n. 9, p. 1215–1223, 1981.
- KNOPPERS, B. et al. The são francisco estuary, brazil. In: *Estuaries*. [S.l.]: Springer, 2006. p. 51–70.
- KOUTSOUKOS, E. A.; HART, M. B. Cretaceous foraminiferal morphogroup distribution patterns, palaeocommunities and trophic structures: a case study from the sergipe basin, brazil. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, Cambridge Univ Press, v. 81, n. 03, p. 221–246, 1990.

- LIMA, M. L. F. et al. New records of ophiuroidea (echinodermata) from shallow waters off maceió, state of alagoas, brazil. *Marine Biodiversity Records*, Cambridge Univ Press, v. 4, p. e97, 2011.
- LODER, J. W.; BOICOURT, W. C.; SIMPSON, J. H. Western ocean boundary shelves coastal segment (w). *The Sea*, v. 11, p. 3–27, 1998.
- LORENZ, E. N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology, 1956.
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, v. 20, n. 4, p. 851–875, 1982.
- MÉMERY, L. et al. The water masses along the western boundary of the south and equatorial atlantic. *Progress in Oceanography*, Elsevier, v. 47, n. 1, p. 69–98, 2000.
- MOHRIAK, W. U.; BASSETTO, M.; VIEIRA, I. S. Crustal architecture and tectonic evolution of the sergipe-alagoas and jacuipe basins, offshore northeastern brazil. *Tectonophysics*, Elsevier, v. 288, n. 1, p. 199–220, 1998.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical atlantic and south america. *Journal of Climate*, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 1996.
- REID, J. L. On the total geostrophic circulation of the south atlantic ocean: flow patterns, tracers, and transports. *Progress in Oceanography*, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 149–244, 1989.
- REID, R. O.; BODINE, B. R. Numerical model for storm surges in galveston bay. *Journal of the Waterways and harbors Division*, ASCE, v. 94, n. 1, p. 33–58, 1968.
- SAHA, S. et al. The ncep climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014.
- SANTOS, E. *Aplicação de marcadores geoquímicos para a avaliação dos impactos das barragens nos sedimentos do estuário do Rio São Francisco (Al/Se)*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, 2007.

SCHOTT, F. A. et al. The shallow and deep western boundary circulation of the south atlantic at 5-11 s. *Journal of Physical Oceanography*, v. 35, n. 11, p. 2031–2053, 2005.

SILVEIRA, I. C. da; MIRANDA, L. B.; BROWN, W. S. On the origins of the north brazil current. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, Wiley Online Library, v. 99, n. C11, p. 22501–22512, 1994.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment*. *Monthly weather review*, v. 91, n. 3, p. 99–164, 1963.

SOUTELINO, R. et al. Is the brazil current eddy-dominated to the north of 20 s? *Geophysical research letters*, Wiley Online Library, v. 38, n. 3, 2011.

SUMMERHAYES, C. P.; FAINSTEIN, R.; ELLIS, J. P. Continental margin off sergipe and alagoas, northeastern brazil: a reconnaissance geophysical study of morphology and structure. *Marine Geology*, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 345–361, 1976.

THOMSON, R. E.; EMERY, W. J. *Data analysis methods in physical oceanography*. [S.l.]: Newnes, 2014.

WEATHERLY, G. L.; MARTIN, P. J. On the structure and dynamics of the oceanic bottom boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, v. 8, n. 4, p. 557–570, 1978.

WELCH, P. D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical geography*, Taylor & Francis, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.