

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área
Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e
Costeira Adjacente**

RELATÓRIO ANUAL:

Anexo 3 Marinho – Modelagem Numérica

RT-19D RRDM/NOV19

Coordenação Geral

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Novembro de 2019

COORDENAÇÕES

Anexo 1

Adalto Bianchini (FURG)

Anexo 3

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Fabian Sá (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memoriam*

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Leonardo Tavares Salgado (IPJB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

Anexo 4

Jacqueline Albino (UFES)

Subprojetos

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

Anexo 5

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

Anexo 6

Agnaldo Silva Martins (UFES)

Subprojetos

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

Anexo 7

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

Anexo 8

Heitor Evangelista (UERJ)

Coordenação Técnica (CTEC)

Alex Cardoso Bastos

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

Coordenação Escritório de Projetos

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Paulo Roberto Filgueiras

Valdemar Lacerda Junior

Walter Luiz Alda Junior

Coordenação Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

SUMÁRIO

1	METODOLOGIA	20
1.1	SENSORIAMENTO REMOTO	21
1.2	PERFILAGEM	23
1.3	FUNDEIOS	24
1.3.1	Parâmetros estatísticos	24
1.3.2	Análises harmônicas e previsão da maré	24
1.3.3	Análises espectrais	24
1.4	MODELAGEM NUMÉRICA	25
1.4.1	Modelo hidrodinâmico.....	25
1.4.2	Modelo biogeoquímico.....	27
1.4.3	Modelo de transporte de sedimento	30
2	RESULTADOS	32
2.1	SENSORIAMENTO REMOTO	44
2.1.1	Funções ortogonais empíricas (EOFs).....	44
2.1.2	Distribuição de recorrência de plumas de turbidez superficial	53
2.2	PERFILAGEM	58
2.2.1	Resultados Pré-Monitoramento	58
2.2.2	Resultados do PMBA.....	63
2.3	FUNDEIOS	86
2.3.1	Fundeio 1 (F1)	88
2.3.2	Fundeio 2 (F2)	91
2.3.3	Fundeio 3 (F3)	93
2.3.4	Fundeio 4 (F4)	95
2.3.5	Análise da variação temporal da temperatura de fundo nos fundeios	97
2.3.6	Ondas	99

2.3.7	Comparação dos períodos de variabilidade das correntes nos fundeios F1, F2, F3 e F4	113
2.3.8	Eventos de ressuspensão.....	121
2.4	MODELAGEM NUMÉRICA.....	145
2.4.1	Validação do modelo hidrodinâmico.....	145
2.4.2	Modelo biogeoquímico.....	164
2.4.3	Validação dos resultados produzidos pelo modelo de transporte de sedimentos.....	177
2.4.4	Resultados da simulação do transporte de sedimentos.....	179
2.5	SÍNTESE DOS PROCESSOS FÍSICOS COSTEIROS NA REGIÃO DO RIO DOCE.....	184
	REFERÊNCIAS.....	204
	APÊNDICE I.....	210
	APÊNDICE II.....	244

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa com a localização dos pontos amostrais da perfilagem de CTD (círculos verdes) e dos Fundeios (losango vermelho) desde o PARNAM dos Abrolhos até Guarapari. A estrela amarela se refere à estação de onde foi retirada a série temporal de ventos do modelo global *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. As delimitações em marrom referem-se às Unidades de Conservação e as linhas tracejadas em cinza às cotas batimétricas de 25, 50 e 200 m..... 20
- Figura 2: Área de estudo destacando as Grades 1 e 2. Os pontos coloridos (A, B e C) destacam estações virtuais que foram utilizadas para a análise da concentração de sedimentos em suspensão e das variáveis obtidas com o modelo biogeoquímico. Eles referem-se a pontos onde ocorreram coleta de dados *in situ* nas primeiras campanhas do pré-monitoramento. O quadrado vermelho na Grade 1 indica a localização da boia Vitória (PNBOIA) de onde foram extraídos dados de corrente usados na validação do modelo numérico de circulação. 26
- Figura 3: Esquema representativo das interações que ocorrem entre os diferentes compartimentos do modelo BioEBUS. As siglas P_s , P_L , Z_s , Z_L , D_s e D_L correspondem ao nanofitoplâncton, microfitoplâncton, microzooplâncton, mesozooplâncton, detritos pequenos e detritos grandes, respectivamente. As setas pretas representam os processos dependentes do nitrogênio. As setas vermelhas indicam os processos dependentes de oxigênio. As setas azuis indicam os processos relacionados à produção de N_2O . Para simplificar a representação das interações que ocorrem entre todas as variáveis, as setas que saem ou que entram nos retângulos cinzas agem em todas as variáveis incluídas nos retângulos. Por exemplo, as setas entre os nutrientes e o fitoplâncton (assimilação) é uma simplificação de 6 diferentes interações, sendo elas: de NO_3^- , NO_2^- e NH_4^+ para PS e PL 29
- Figura 4: Digrama esquemático mostrando a atuação de diferentes forçantes sobre uma partícula/elemento de água no modelo STRiPE. N: nutrientes; DOM: matéria orgânica dissolvida; AP: poluentes antropogênicos; SS: sólidos suspensos..... 31
- Figura 5: Médias mensais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) estimadas via sensoriamento remoto (Aqua/MODIS) para o período de outubro de 2018 a setembro de 2019. 34
- Figura 6: Médias mensais das componentes do balanço do fluxo de calor na interface oceano-atmosfera, válidas para a região de Abrolhos e estimadas a partir dos dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*. 35
- Figura 7: Rosas dos ventos mensais para o período entre outubro/2018 (A) a setembro/2019 (M). A série de dados de ventos foi retirada da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto $39,75^\circ O$ e $19,75^\circ S$ 36
- Figura 8: Rosas dos ventos para cada estação do ano no período de outubro/2018 a setembro/2019. A - Primavera; B – Verão; C – Outono; D – Inverno. A série de dados de ventos foi retirada da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto $39,75^\circ O$ e $19,75^\circ S$ 37

Figura 9: Passagens de frentes frias ao longo da costa sul e sudeste brasileira entre os meses de outubro/2018 a fevereiro/2019. Os números indicam a sequência das frentes frias que passaram na região ao longo do mês considerado.	38
Figura 10: Passagens de frentes frias ao longo da costa sul e sudeste brasileira entre os meses de março a julho/2019. Os números indicam a sequência das frentes que passaram na região ao longo do mês considerado.	39
Figura 11: Cartas de pressão ao nível do mar dos dias (A) 22, (B) 23, (C) 24, (D) 27 e (E) 28 de março/2019.....	40
Figura 12: Série da vazão do Rio Doce medida na estação da Ponte de Colatina – ES entre os meses de outubro/2018 e julho/2019. Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados <i>in situ</i> são destacadas em cinza.	42
Figura 13: Medianas mensais climatológicas das descargas de vazão (a) e sedimento em suspensão (b) do Rio Doce de 1990 a 2013 baseado nos dados da estação de Colatina – ES.....	43
Figura 14: Percentual dos dados originais ao longo de todo o período analisado. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.....	45
Figura 15: Percentual da variabilidade total dos dados explicada pelos cinco principais modos de variação da TSM.	46
Figura 16: Principal modo de variabilidade da TSM (responsável por 73,3% da variabilidade total dos dados). Nas quatro figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial e o percentual da variabilidade local explicada. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal da primeira componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto).....	47
Figura 17: Segundo modo de variabilidade da TSM (responsável por 5,1% da variabilidade total dos dados). Nas quatro figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial e o percentual da variabilidade local explicada pela segunda componente da EOF. A isolinha preta no campo espacial da EOF corresponde ao valor zero. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal da segunda componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto). As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.....	48
Figura 18: Percentual da variabilidade total dos dados explicada pelos cinco principais modos de variação da [chlor-a].	49

Figura 19: Principal modo de variabilidade da [chlor-a] elaborado com dados normalizados (responsável por 61,6% da variabilidade total dos dados). Nas quatro figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial e o percentual da variabilidade local explicada. A isolinha fina preta no campo espacial da EOF corresponde ao valor zero. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal da primeira componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto). As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros..... 50

Figura 20: Modo de variabilidade da [chlor-a] composto pela soma da segunda e da terceira EOF dessa variável (o somatório é responsável por 12,4% da variabilidade total dos dados). Nas seis figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial das EOFs 2 e 3 e o percentual da variabilidade local explicada pelo somatório dessas duas componentes. A isolinha fina preta nos campos espaciais das EOFs corresponde ao valor zero. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal do somatório da segunda e terceira componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto). As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. 51

Figura 21: Séries temporais normalizadas e alisadas por meio de média móvel com janela de 15 dias da vazão do Rio Doce e do somatório das EOFs 2 e 3 da [chlor-a]..... 52

Figura 22: Exemplificações dos processos de incremento na [chlor-a] (mg/m³) ao sul da foz do Rio Doce em momentos de vazão acima média. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. As áreas brancas representam nuvens. 53

Figura 23: Mapas de distribuição do n amostral dos dados de turbidez para os períodos de baixa e alta vazão do Rio Doce. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. 53

Figura 24: Mapas de distribuição do percentual de recorrência de plumas de alta turbidez. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros..... 55

Figura 25: Mapas de distribuição do percentual de recorrência de plumas de baixa turbidez. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros..... 57

Figura 26: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) (esquerda), Salinidade Prática (meio) e Fluorescência (URF) (direita) em um transecto paralelo à costa nos pontos próximos à foz do Rio Doce nos períodos entre novembro/2015 e dezembro/2017. As linhas cinzas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. O *subplot* e as áreas em branco indicam a ausência

de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa à esquerda, não em escala real.	60
Figura 27: Imagem da cor verdadeira (VIIRS/Suomi NPP) com as isotermas provenientes do sensor Terra/MODIS do dia 24 de abril de 2016. Os pontos verdes identificam as estações amostradas durante a campanha realizada pela UFES e o ICMBio a bordo do navio Soloncy Moura. As isóbatas representam 25 m, 50 m, 100 m e 1000 m de profundidade.	61
Figura 28: Imagem da cor verdadeira provenientes do sensor Aqua/MODIS do dia 07 de dezembro de 2016. Os pontos verdes identificam as estações amostradas durante a campanha realizada pela UFES a bordo do barco Abaeté. As isóbatas representam 25 m, 50 m e 200 m de profundidade.	62
Figura 29: Imagem da cor verdadeira (MODIS/Aqua) do dia 16 de fevereiro de 2016. As linhas coloridas representam as isotermas provenientes do sensor Aqua/MODIS Os pontos verdes identificam as estações amostradas durante a campanha realizada a bordo do navio oceanográfico Antares (Marinha do Brasil). As isóbatas representam 25 m, 50 m, 100 m e 1000 m de profundidade.	63
Figura 30: Seções de Temperatura potencial (°C) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.	64
Figura 31: Seções de Salinidade Prática nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.	65
Figura 32: Seções de Turbidez (NTU) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.	66
Figura 33: Seções de Fluorescência (mg/m ³) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.	67
Figura 34: Seções de Oxigênio Dissolvido (mg/l) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.	68
Figura 35: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) – esquerda – e Salinidade Prática – direita – na região da APA Costa das Algas e RVS Santa Cruz – ES nas campanhas Semestral 1 (outubro) e 2 (abril) e Trimestral 1 (janeiro) e 2 (julho) em um transecto perpendicular à costa conforme o mapa a esquerda. As linhas brancas referem-se às estações amostrais. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa.	72
Figura 36: Distribuição da Fluorescência (mg/m ³) – esquerda – Turbidez (NTU) – central – e Oxigênio Dissolvido (mg/l) – direita – na região da APA Costa das Algas e RVS Santa Cruz – ES nas campanhas	

Semestral 1 (outubro) e 2 (abril) e Trimestral 1 (janeiro) e 2 (julho) em um transecto perpendicular à costa conforme o mapa a direita. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. O *subplot* e áreas em branco indicam a ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa. 73

Figura 37: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) – esquerda – e Salinidade Prática – direita – em uma seção paralela à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. As áreas em branco se referem à ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa. A estação identificada pelo triângulo invertido nos *plots* superiores referem-se ao ponto SD 02 localizado em frente à foz do Rio Doce. 77

Figura 38: Distribuição da Fluorescência (mg/m³) – esquerda – Turbidez (NTU) – meio – e Oxigênio Dissolvido (mg/l) – direita – em uma seção paralela à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. Os *subplot* e áreas em branco indicam a ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa. A estação identificada pelo triângulo invertido nos *plots* superiores referem-se ao ponto SD 02 localizado em frente a foz do Rio Doce. 79

Figura 39: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) – esquerda – e Salinidade Prática – direita – em uma seção perpendicular à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. As áreas em branco se referem à ausência de dados. No mês de outubro a distância entre os pontos foi diferente devido ao ponto extra coletado fora do transecto central. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo os mapas. 81

Figura 40: Distribuição da Fluorescência (mg/m³) – esquerda – Turbidez (NTU) – meio – e Oxigênio Dissolvido (mg/l) – direita – em uma seção perpendicular à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. Os *subplot* e áreas em branco indicam a ausência de dados. No mês de outubro a distância entre os pontos foi diferente devido ao ponto extra coletado fora do transecto central. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo os mapas. 84

Figura 41: Distribuição da Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Turbidez (NTU) Fluorescência (mg/m³) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) na região de Abrolhos nas campanhas Semestral 1 (outubro) – esquerda – e Semestral 2 (abril) – direita. As linhas cinzas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. As áreas em branco indicam a ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa à esquerda. 86

Figura 42: Mapa com a localização dos Fundeios 1, 2, 3 e 4 (losangos vermelhos) ao longo da costa do Espírito Santo. A estrela amarela se refere à estação de onde foi retirada a série de ventos do modelo global *ECMWF*. As linhas em preto referem-se às Unidades de Conservação e as linhas tracejadas em cinza às cotas batimétricas de 25, 50 e 200 m. 87

Figura 43: Fundeio 1 – Distribuição temporal do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de novembro de 2018 a setembro de 2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas..... 89

Figura 44: Fundeio 1 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de novembro/2018 a março/2019 (verão - esquerda) e de abril a setembro/2019 (inverno - direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas..... 91

Figura 45: Fundeio 2 – Distribuição do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S e, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de dezembro/2018 a setembro/2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas..... 92

Figura 46: Fundeio 2 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de dezembro/2018 a março/2019 (esquerda) e de abril a setembro/2019 (direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. 93

Figura 47: Fundeio 3 – Distribuição do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S e, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de novembro/2018 a julho/2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas..... 94

Figura 48: Fundeio 3 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de novembro/2018 a março de 2019 (esquerda) e de abril a julho/2019 (direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. 95

Figura 49: Fundeio 4 – Distribuição do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S e, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de novembro/2018 a setembro/2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas..... 96

Figura 50: Fundeio 4 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de novembro/2018 a março/2019 (esquerda) e de abril a setembro/2019 (direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.	97
Figura 51: Distribuição temporal da temperatura junto ao fundo nos Fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de novembro/2018 a setembro/2019.	98
Figura 52: Distribuição de alturas significativas de ondas (Hs) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para todo o registro (novembro/2018 a setembro/2019). Em F2, o registro inicia-se em dezembro/2018. As cores representam as faixas de variação de valores de Hs.	100
Figura 53: Distribuição de período de pico de ondas (Tp) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para todo o registro (novembro/2018 a setembro/2019). Em F2, o registro inicia-se em dezembro/2018. As cores representam as faixas de variação de valores de Tp.	101
Figura 54: Distribuição de alturas significativas de ondas (Hs) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para verão (à esquerda) e inverno (à direita). As cores representam as faixas de variação de valores de Hs.	103
Figura 55: Distribuição de período de pico de ondas (Tp) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para verão (à esquerda) e inverno (à direita). As cores representam as faixas de variação de valores de Tp.	104
Figura 56: Evolução mensal da média de altura significativa de ondas nos fundeios F1 e F2, com os respectivos desvios-padrão.	106
Figura 57: Evolução mensal da média de altura significativa de ondas nos fundeios F3 e F4, com os respectivos desvios-padrão.	107
Figura 58: Evolução mensal da média do período de pico nos fundeios F1 e F2, com os respectivos desvios-padrão.	108
Figura 59: Evolução mensal da média do período de pico nos fundeios F3 e F4, com os respectivos desvios-padrão.	109
Figura 60: Evolução mensal da média da direção de pico nos fundeios F1 e F2, com os respectivos desvios-padrão.	110
Figura 61: Evolução mensal da média da direção de pico nos fundeios F3 e F4, com os respectivos desvios-padrão.	111
Figura 62: Ocorrência (em %) de faixas de Hs (superior), de Tp (central) e de Dp (inferior) para cada mês entre novembro/2018 e setembro/2019 em F1. As cores representam cada faixa de variação de Hs, de Tp e de Dp.	112

Figura 63: Ocorrência (em %) de limiares de Hs para cada mês entre novembro de 2018 e setembro de 2019 em F1. As cores representam cada limiar considerado.....	113
Figura 64: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeios F1.	116
Figura 65: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeios F2.	117
Figura 66: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeios F3.	118
Figura 67: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeios F4.	119
Figura 68: Espectro das componentes paralelas à costa das correntes na superfície e no fundo nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).....	120
Figura 69: Espectro das componentes perpendiculares à costa das correntes na superfície e no fundo nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).....	121
Figura 70: Série temporal da (a) vento da reanálise e previsão do <i>ECMWF</i> para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3, (c) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (vermelho) medidas no F4, (d) Altura significativa de onda medida no F3 (amarelo) e no F4 (vermelho) e, (e) turbidez no período de 03 a 20 de dezembro/2018.	123
Figura 71: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (preto) e turbidez medida na estação automática RDO-16 boia (ciano), (b) Temperatura, (c) Salinidade, (d) Massa específica e, (e) Turbidez medidas nos fundeios F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 03 a 20 de dezembro/2018.	125
Figura 72: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do <i>ECMWF</i> para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (verde) medidas no F2, (c) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3, (d) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (vermelho) medidas no F4, (e) Altura significativa de onda medida no F3 (amarelo) e no F4 (vermelho) e, (f) turbidez no período de 19 de março/2019 a 05 de abril/2019.	127
Figura 73: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (preto) e turbidez medida na estação automática RDO-16 boia (ciano), (b) Temperatura, (c) Salinidade, (d) Massa específica e, (e) Turbidez medidas nos fundeios F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 19 de março a 04 de abril/2019.....	129
Figura 74: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do <i>ECMWF</i> para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (verde) medidas no F2, (c) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3, (d) corrente superficial (preto) e	

corrente de fundo (vermelho) medidas no F4, (e) Altura significativa de onda medida no F2 (verde), F3 (amarelo) e no F4 (vermelho) e, (f) turbidez no período de 19 de março de 2019 a 05 de abril/2019.

..... 131

Figura 75: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (preto) e turbidez medida na estação automática RDO-16 boia (ciano), (b) Temperatura, (c) Salinidade, (d) Massa específica e, (e) Turbidez medidas nos fundeios F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 08 a 16 de abril/2019. 133

Figura 76: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do ECMWF para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3 (c) Altura significativa de onda medida no F3 e, (d) turbidez no período de 01 a 30 de julho/2019. 135

Figura 77: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do ECMWF para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3 (c) Altura significativa de onda medida no F3 e, (d) turbidez no período de 01 a 10 de setembro/2019..... 137

Figura 78: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75°O e 19,75°S, (b) Altura significativa bruto (azul) e baixa frequência (preto) e, (c) vazão do Rio Doce (preto) x Turbidez no fundo do fundeio F2 (verde) no período de 10 de fevereiro a 22 de maio/2019. 139

Figura 79: Distribuição temporal de turbidez na superfície (preto) e no fundo (amarelo) no fundeio F3, de 29 de março a 16 de abril/2019..... 141

Figura 80: Distribuição temporal de turbidez na superfície (preto) e no fundo (amarelo) no fundeio F4, de 29 de março a 16 de abril/2019..... 142

Figura 81: Série temporal da clorofila-a medida em superfície nos fundeios F1 (azul) e F3 (amarelo) no período de 21 de março a 31 de julho/2019. 144

Figura 82: Série temporal dos dados do PNBOIA na Boia Vitória e resultados da modelagem das componentes zonal e meridional da velocidade superficial entre novembro/2015 e junho/2016. 146

Figura 83: Espectro de energia das componentes zonal e meridional da velocidade superficial de corrente para os dados do PNBOIA na Boia Vitória e os resultados da modelagem numérica. 146

Figura 84: Campo médio sazonal da corrente superficial para o verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Observe que um campo médio com velocidades próximas de zero não implica, necessariamente, que as velocidades são nulas, mas que o campo dinâmico pode ser muito variável. 147

Figura 85: Campo médio sazonal da corrente de fundo para o verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Observe que um campo médio com velocidades próximas de zero não implica, necessariamente, que as velocidades são nulas, mas que o campo pode ser muito variável. 148

Figura 86: Temperatura média simulada para a camada sigma 40 (Superfície), considerando os períodos de verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	150
Figura 87: Campo térmico médio sazonal junto ao fundo para o verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	151
Figura 88: Porcentagem de ocorrência de águas com temperaturas inferiores a 24°C sobre a plataforma continental considerando os anos de 2015 e 2016. O nível sigma 40 representa a superfície e o nível sigma 1 o fundo.	153
Figura 89: Seções verticais médias de temperatura para o período de Verão e Inverno dos anos de 2015 e 2016, para uma seção transversal à costa localizada em frente à desembocadura do Rio Doce (A, B, C e D) e para uma seção transversal à costa localizada ao sul da desembocadura do Rio Doce, passando pela APA Costa das Algas (E, F, G e H).	154
Figura 90: Evolução temporal da temperatura junto ao fundo sobre as isóbatas de 25 m (painel superior) e 50 m (painel inferior) na região oceânica próxima à foz do Rio Doce.	156
Figura 91: Evolução temporal dos perfis verticais de temperatura a partir de 5 fundeios virtuais dispostos, aproximadamente, na direção perpendicular à plataforma continental próxima da Costa das Algas (ver mapa no canto superior esquerdo). A isolinha preta marca a isoterma de 24 °C.	158
Figura 92: Salinidade média simulada para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015 e 2016, para o nível sigma 40 (superfície) e nível sigma 1 (fundo). Os vetores representam a circulação média para os mesmos períodos nos respectivos níveis.	160
Figura 93: Percentual de ocorrência de água com salinidade inferior a 35 em superfície sobre a plataforma continental nos períodos chuvoso (novembro a março) e seco (abril a outubro).	161
Figura 94: Seções verticais médias sazonais de salinidade simulada para o verão e o inverno dos anos de 2015 e 2016 para uma seção transversal à costa localizada em frente à desembocadura do Rio Doce (A, B, C, D) e para uma seção transversal à costa localizada ao sul da desembocadura do Rio Doce, passando pela APA Costa das Algas (E, F, G e H).	162
Figura 95: Espectros de potência da componente <i>alongshore</i> da corrente simulada para o período de verão de 2016 na APA Costa das Algas (sul da foz) e SDN (norte da foz), próximo à isóbata de 25m. À esquerda para o campo superficial e à direita para o fundo.	163
Figura 96: Elipses de maré da constituinte harmônica M2 calculadas para os pontos selecionados dos fundeios virtuais sobre a plataforma continental e talude: à esquerda, elipses de maré superficiais; à direita, elipses de maré junto ao fundo.	164
Figura 97: Evolução temporal dos valores médios no domínio da simulação das concentrações de Nitrito, Nitrato, Amônio, fitoplâncton total, zooplâncton total, detritos (todos em mmol N/m ³) e oxigênio dissolvido (em mmol O/m ³) obtidos para o domínio do modelo entre os anos de 2015 e 2018.	165

Figura 98: Campos médios da concentração de nitrito (em mmol N/m ³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	167
Figura 99: Campos médios da concentração de nitrato (em mmol N/m ³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	168
Figura 100: Campos médios da concentração de amônio (em mmol N/m ³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	169
Figura 101: Campos médios da concentração de fitoplâncton total (em mmol N/m ³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	170
Figura 102: Campos médios da concentração de zooplâncton total (em mmol N/m ³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	171
Figura 103: Campos médios da concentração de clorofila-a (em mmol N/m ³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.	172
Figura 104: Campos médios da concentração de oxigênio dissolvido (em mmol O/m ³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.....	173
Figura 105: Perfis médios sazonais das concentrações de fitoplâncton total, zooplâncton total, detritos e clorofila-a para estações virtuais localizadas ao norte (A, B, C e D), em frente (E, F, G e H) e a sul a desembocadura do Rio Doce (I, J, K e L) para o ano de 2017. Optou-se por usar este ano porque ele é o único ano completo com variáveis estabilizadas.	175
Figura 106: Perfis médios sazonais das concentrações de nitrito (NO ₂ ⁻), nitrato (NO ₃ ⁻) e amônio (NH ₄ ⁺) para estações virtuais localizadas a norte (A, B, C e D), em frente (E, F, G e H) e a sul a desembocadura do Rio Doce (I, J, K e L) para o ano de 2017. Optou-se por usar este ano porque ele é o único ano completo com variáveis estabilizadas.	175
Figura 107: Perfis médios sazonais de temperatura (em °C) e oxigênio dissolvido (mmol O/m ³) para estações virtuais localizadas a norte (A e D, respectivamente), em frente (B e E) e a sul a desembocadura do Rio Doce (C e F) para o verão e inverno de 2017. Optou-se por usar o ano de 2017 porque é o único ano completo com variáveis estabilizadas.	176
Figura 108: Composição de dados da distribuição espacial da turbidez superficial (NTU) (parte superior) e da carga de sedimento em suspensão na superfície (parte inferior) para os diferentes cenários	

apresentados na Tabela 3.4. As cores mais intensas indicam maior quantidade de material em suspensão, representando um proxy da turbidez gerada pela pluma do Rio Doce. A isolinha vermelha nos mapas dos painéis inferiores delimita a concentração de $0,02\text{kg/m}^2$ 178

Figura 109: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce considerando-se o período pré, Jan/2015 a Out/2015, (A) e após, Nov2015 a Dez/2016, o rompimento da barragem (B). Em destaque nos dois painéis apresentados temos o mapa produzido por QUARESMA *et al.* (2015), mostrando o principal depósito de lama – *depocentro* - (com > 50%) e medidas de densidade úmida, no qual a linha azul representa o limite para os sedimentos compostos de mais de 25% de carbonato..... 180

Figura 110: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce (kg/m^2) para o período entre janeiro de 2017 e outubro de 2018..... 181

Figura 111: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce considerando o período úmido ou de alta vazão (A) e o período seco ou baixa vazão (B). As isolinhas azuis representam a distribuição espacial da probabilidade de ocorrência da pluma fluvial (definida como salinidades < 35) na região adjacente à foz para cada um dos períodos. A isolinha azul mais externa representa probabilidade de 10% de ocorrência. 182

Figura 112: Porcentagem de ocorrência de sedimento superficial [Concentrações > $0,01\text{ kg/m}^2$] para o período pré, Jan/2015 a Out/2015, (A) e após, Nov2015 a Dez/2016, o rompimento da barragem (B). 183

Figura 113: Porcentagem de ocorrência de sedimento superficial (Concentrações > $0,01\text{ kg/m}^2$) para o período entre janeiro de 2017 e outubro/2018..... 184

Figura 114: Densidade da frente térmica superficial mensal no período de janeiro de 2003 a agosto de 2019 obtida a partir imagens de TSM do sensor Modis/Aqua. 186

Figura 115: Distribuição espacial da profundidade de água doce (m) após 5 dias de simulação em cenários de ventos NE, E, SE e N. O polígono em vermelho representa a APA Costa das Algas. A linha preta contínua delimita a quebra de plataforma em 200 m. 190

Figura 116: Seções verticais da salinidade prática com sobreposição de isolinhas de velocidade meridional (esquerda), temperatura potencial com a sobreposição de vetores de velocidade zonal (centro) e frequência de Brunt-Väisälä (direita) para um transecto perpendicular à costa em $19,45^\circ\text{S}$ em condição de alta vazão após o 5º dia de simulação. 191

Figura 117: Evolução mensal da porcentagem de tempo em que as correntes superficiais paralelas a linha de costa permaneceu orientada para norte (vermelho) ou para sul (azul) nos fundeios F1, F2, F3 e F4. 193

- Figura 118: Evolução mensal da porcentagem de tempo em que as correntes de fundo paralelas a linha de costa permaneceu orientada para norte (vermelho) ou para sul (azul) nos fundeios F1, F2, F3 e F4. 193
- Figura 119: Evolução temporal da altura significativa de ondas (m) entre novembro de 2018 e setembro 2019. As cores representam as series temporais horárias de Hs nos fundeios F1, F2, F3 e F4. Alguns eventos extremos estão destacados na figura. As barras cinzas indicam o período de coleta *in situ* identificados por C1 a C12. 195
- Figura 120: Descarga diária medida na estação da ponte de Colatina e Turbidez na boia RD 016. Embora as maiores descargas estejam acompanhadas de maiores valores de turbidez, a proporcionalidade não é constante. Nos dados de turbidez não foram eliminados possíveis *spikes* por não termos referências para esse descarte. 197
- Figura 121: Distribuição temporal da turbidez medida na boia RD 016 e no fundo do fundeio F3 199
- Figura 122: Distribuição temporal da turbidez medida na boia RD 016 e no fundo do fundeio F3 para o mês de junho/2019. 201

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados e forçantes utilizados como condições iniciais e de contorno na modelagem hidrodinâmica.....	27
Tabela 2: Variáveis consideradas no modelo BioEBUS, unidades, valores iniciais utilizados nas simulações e escala de profundidade considerada no decaimento exponencial ao longo da profundidade (para o NO_3^- , NO_2^- e o NOD). Note que as unidades das variáveis biológicas e de detrito estão em termos de Nitrogênio.	30
Tabela 3: Condições de vazão do Rio Doce estabelecidas por Oliveira e Quaresma (2017) a partir de dados diários de vazão de 1990 a 2013 obtidos no site do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2019).	41
Tabela 4: Informações gerais sobre as campanhas realizadas na região marinha da foz do Rio Doce e adjacências entre 26 de novembro de 2015 a 11 de dezembro de 2017.....	59
Tabela 5: Orientação da costa em relação ao sistema cartesiano em cada fundeio.	88
Tabela 6: Cenários, datas, vazão e características de direção e intensidade do vento escolhidos para a validação do modelo de transporte de sedimentos.....	177

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estatísticas de altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção de pico (D_p) das ondas para cada um dos fundeios, para todo o período de observação, para os intervalos primavera-verão e outono-inverno. As colunas de valores máximos (*) apresentam os valores de H_s e T_p máximos e entre parênteses o maior valor individual de altura e período de onda ($H_{máx}$ e $T_{máx}$).	105
Quadro 2: Medidas estatísticas de corrente superficial e de fundo de cada fundeio para o período total amostrado e particionado-o para os períodos primavera-verão e outono-inverno.....	115

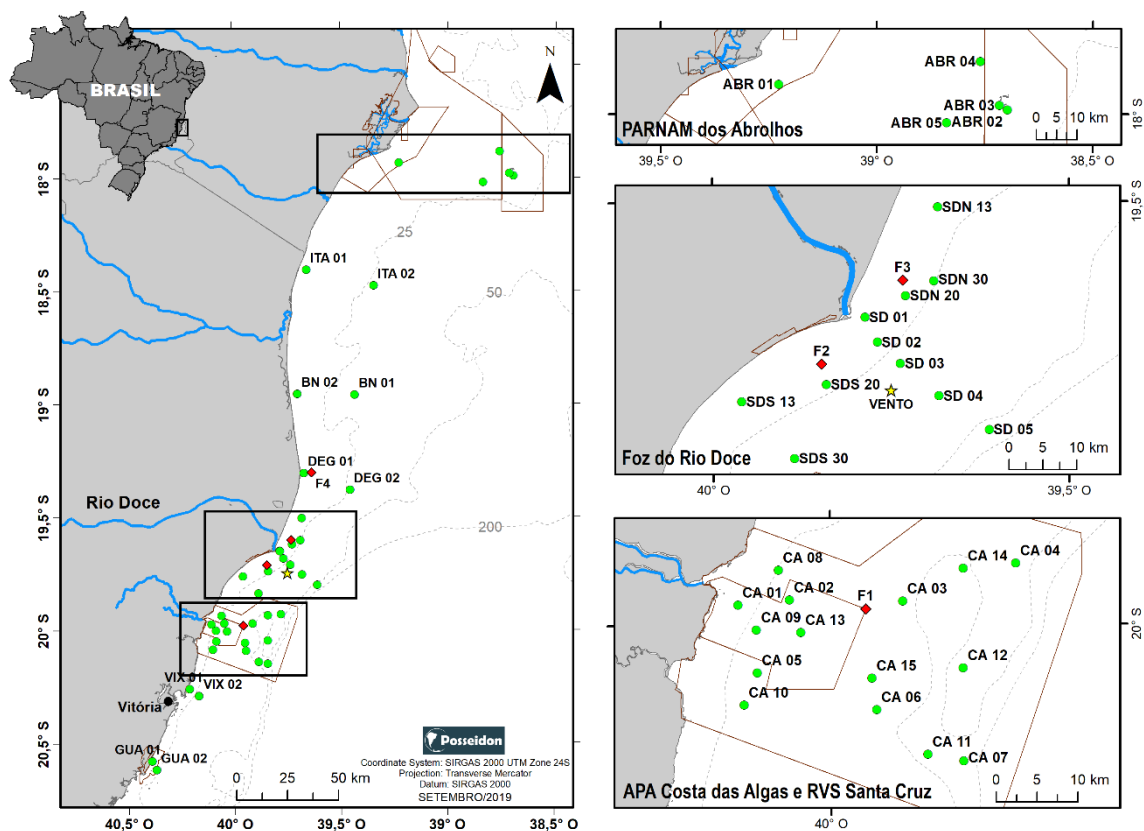
1 METODOLOGIA

Os pontos amostrais onde foram realizadas as perfilações de CTD foram distribuídos desde o Parque Nacional Marinho (PARNAM) dos Abrolhos até a região de Guarapari (Figura 1), nesses dois setores foram realizadas coletas de dados *in situ* semestrais. Na foz do Rio Doce a frequência de amostragem foi mensal e a resolução espacial foi maior. As campanhas trimestrais foram realizadas na porção conjunta da Área de Proteção Ambiental (APA) Costa das Algas e do Refúgio de Vida Silvestre (RVS) Santa Cruz, na Região Norte (pontos na região de Degredo, Barra Nova e Itaúnas) e no setor de Vitória.

Dos quatro fundeios dois estão distribuídos ao sul e dois ao norte da foz do Rio Doce, assim localizados: no limite entre a APA Costa das Algas e o RVS Santa Cruz (F1), imediatamente a sul (F2) e a norte (F3) da foz e no setor de Degredo (F4) (Figura 1).

As informações de vento utilizadas nas análises são resultados da reanálise (outubro/2018 a maio/2019) e da previsão (junho e julho/2019) do modelo global *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para o ponto localizado em 39,75 °O e 19,75 °S (Figura 1).

Figura 1: Mapa com a localização dos pontos amostrais da perfilação de CTD (círculos verdes) e dos Fundeios (losango vermelho) desde o PARNAM dos Abrolhos até Guarapari. A estrela amarela se refere à estação de onde foi retirada a série temporal de ventos do modelo global *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). As delimitações em marrom referem-se às Unidades de Conservação e as linhas tracejadas em cinza às cotas batimétricas de 25, 50 e 200 m.



1.1 SENSORIAMENTO REMOTO

Dados de concentração de clorofila-a ([chlor-a]) e de turbidez superficial foram derivados das medições da cor do oceano realizadas via sensoriamento remoto. Os dados de [chlor-a] são provenientes de uma análise mista das reflectâncias na banda do espectro correspondente ao vermelho, azul e verde e a profundidade da coluna d'água onde é inferido esse dado pode variar de pouco menos de um metro em oceanos costeiros com alta turbidez a até mais de 30 metros em oceanos profundos de baixa turbidez (GORDON & McCLUNEY, 1975; SOUZA, 2005). O cálculo da turbidez por meio de dados da cor do oceano obtidos por satélites, nesse caso utilizando a reflectância da luz vermelha e da radiação da banda do infravermelho próximo (esse último usado somente para valores de turbidez acima de 15 NTU) têm uma importante limitação sobre a profundidade máxima da informação obtida, já que a luz vermelha proveniente do sol é praticamente toda absorvida nos primeiros dois metros de coluna d'água (GORDON & McCLUNEY, 1975). A presença de sólidos ou dissolvidos na água altera essa penetração em alguns centímetros. Já o infravermelho próximo é nove vezes mais absorvido pela água, limitando a sua penetração a poucos centímetros (GORDON & McCLUNEY, 1975, SOUZA, 2005). Já a quantificação da temperatura da superfície do mar (TSM) resulta da radiação emitida nos primeiros milímetros da coluna d'água (SOUZA, 2005). A presença de nuvens sobre o oceano durante a obtenção dos dados pelo satélite é o principal limitante comum a todas as medidas realizadas com radiação refletida ou emitida impedindo, dessa forma, as suas quantificações.

Com o uso de EOF pode-se explicar a estrutura de covariância dos campos de dados através da construção de combinações lineares da variável original. Estas combinações lineares independentes são chamadas de componentes principais. Esse é um método de análise sobre uma única variável escalar (TSM e [chlor-a] foram analisados de forma independente um do outro) que retorna padrões espaciais de variabilidade, suas variações temporais e quanto cada padrão representa da variabilidade total dos dados. Assim, o produto do valor de um ponto do perfil espacial pelo valor de um instante do perfil temporal representa o valor de anomalia da variável de interesse referente àquele modo naquela região do espaço e do tempo (BJORNSSON & VENEGAS, 1997; EMERY & THOMSON, 2001; WILKS, 2006).

A turbidez superficial da água a uma distância mínima de 750 metros da costa foi derivada a partir de técnicas de processamento de dados de reflexão da luz (*Remote Sensing Reflectance* – R_{RS}) nos comprimentos de onda de 645 nm (banda da luz na cor vermelha do espectro visível) e 859 nm (banda do infravermelho próximo) em ambientes marinhos de alta e baixa turbidez de acordo com (DOGLIOTTI *et al.*, 2015; AURIN *et al.*, 2013). Esses processamentos consistiram na conversão de arquivos nível 1A de processamento em nível 2 e posteriormente em nível 3, (L1A > L1B > L2 > L3b > L3m) utilizando o software SeaDAS, disponibilizado pelo portal *OceanColor* da NASA.

Os dados de $R_{RS_{645}}$ e $R_{RS_{859}}$ foram processados de duas formas com aproximadamente 250 m de resolução espacial. Na primeira delas, para águas consideradas mais turvas, foram alteradas as bandas de detecção de aerossóis atmosféricos do infravermelho próximo para o infravermelho: 1240 e 2130

nm. Também se aplicou um filtro de remoção de 3 x 3 pixels ao redor de nuvens e da costa para se reduzir interferências do tipo *stray lights* e se aplicou médias em 3 x 3 pixels para a remoção de ruídos provenientes dessas bandas. Para detecção de nuvens foi considerado o limite do albedo de 0,018 no comprimento de onda de 2130 nm.

A segunda foi utilizada para águas consideradas menos turvas. O procedimento foi semelhante ao anterior, porém assumiu-se as bandas do infravermelho próximo para a detecção de aerossóis atmosféricos: 748 e 869 nm.

Os dois produtos de R_{RS645} e R_{RS859} (para águas mais e menos turvas) foram mesclados baseados no limiar de 0,01 1/sr de R_{RS645} processado para águas mais turvas, onde pixels com valores maiores ou iguais ao limiar nas matrizes de R_{RS645} e R_{RS859} processadas para águas mais turvas, se mantiveram e, caso contrário foram substituídos pelos pixels processados para águas menos turvas. Após isso se aplicou o modelo de estimativa de turbidez de acordo com a metodologia a seguir:

Turbidez usando a reflectância em 645 nm:

$$T_{645} = \frac{(228,1 \times R_{RS645})}{\left(1 - \left(\frac{R_{RS645}}{0,1641}\right)\right)}$$

Turbidez usando a reflectância em 859 nm:

$$T_{859} = \frac{(3078,9 \times R_{RS859})}{\left(1 - \left(\frac{R_{RS859}}{0,2112}\right)\right)}$$

T_{645} = Turbidez [NTU] baseada em 645 nm;

T_{859} = Turbidez [NTU] baseada em 859 nm;

R_{RS645} = Reflectância [1/sr] na banda dos 645 nm;

R_{RS859} = Reflectância [1/sr] na banda dos 859 nm.

Definição de um fator de peso:

Cada pixel teve um fator de peso entre 0 e 1. Pixels com R_{RS645} entre 0 e 0.05 1/sr tiveram fator de peso igual a 0. Pixels com R_{RS645} maior ou igual a 0.07 1/sr tiveram fator de peso igual a 1. Pixels com R_{RS645} com valores entre 0.05 e 0.07 1/sr tiveram fator de peso variando de forma linear entre 0 e 1:

$$Fp (0,05 \leq R_{RS645} \leq 0,07) = (50 \times R_{RS645}) - 2,5$$

Fp = fator de peso

R_{RS645} = Reflectância [1/sr] na banda dos 645 nm.

A partir desses três resultados - turbidez com base em 645 nm, turbidez com base em 859 nm e fator de peso – estimou-se a turbidez como:

$$T = ((1 - Fp) \times T_{645}) + (Fp \times T_{859})$$

T = Turbidez em NTU.

Finalmente, o percentual de uma recorrência de pluma de turbidez foi calculado para os períodos de alta e baixa vazão do Rio Doce da seguinte forma:

$$R = 100 \times \left(\frac{a}{b}\right)$$

R = Recorrência [%] da turbidez maior ou igual a um limiar pré-definido;

a = Número de vezes que a turbidez foi maior ou igual ao limiar pré-definido;

b = Total de dias de alta ou baixa vazão do Rio Doce. A alta ou baixa vazão foi definida de acordo com a metodologia de Oliveira & Quaresma (2017).

1.2 PERFILAGEM

Em campo, o CTD foi ligado, inserido na água e iniciado a descida do equipamento com a velocidade máxima de 1 m/s até 2 m antes do fundo por medidas de segurança do aparelho e confiabilidade dos dados. Em cada estação amostral foram obtidos dados termohalinos (temperatura e condutividade, posteriormente convertida em salinidade), pressão, fluorescência, turbidez e oxigênio dissolvido. Em laboratório, os dados hidrográficos obtidos por um CTD foram tratados com o auxílio do software Matlab® ou com o software disponibilizado pelo próprio fabricante do equipamento. Foram separados os perfis de descida e subida dos equipamentos para cada propriedade, a fim de avaliar e minimizar o impacto da mistura vertical promovida pela descida do equipamento. A primeira etapa do tratamento dos dados foi a filtragem usando um filtro de passa-baixa para eliminar as altas frequências (ruídos ou *spikes*) dos dados obtidos pelo equipamento. A segunda etapa de tratamento foi o alinhamento dos dados para a correção da diferença entre os tempos de resposta dos sensores de condutividade e oxigênio em relação à pressão. A terceira etapa foi a binagem, ou seja, foram obtidas médias verticais dos dados a cada 1 dbar de coluna de água. Além disso, os dados coletados passaram por um alisamento por janela móvel do tipo *Hanning* que consistiu na substituição dos valores de temperatura e salinidade por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. Por fim, foram estimadas outras propriedades oceanográficas a partir da temperatura, condutividade e pressão com o auxílio do pacote de rotinas GSW Oceanographic Toolbox desenvolvido por McDougall e Barker (2011). Após o pré-processamento, os dados foram analisados e interpolados de maneira a se obter seções verticais das propriedades. Foram criados mapas das diferentes propriedades de forma a observar a distribuição das propriedades horizontal e verticalmente de acordo com a distribuição espacial das coletas realizadas.

1.3 FUNDEIOS

Um total de quatro linhas de fundeio foram instalados em pontos específicos previamente determinados. Nelas foram obtidas medidas de ondas, correntes, dados termohalinos, fluorescência e turbidez. A linha de fundeio contemplou uma medição junto ao fundo e outra próxima a superfície. As linhas de fundeio tiveram basicamente uma boia na superfície conectada a uma poita por uma sequência de correntes e manilhas de aço. As medições de ondas e correntes foram realizadas por um equipamento perfilador acústico colocado próximo ao fundo numa estrutura de sustentação de aço inoxidável fixada à poita. O equipamento acústico foi programado conforme as instruções do manual de usuário utilizando o software fornecido pela empresa, e os dados foram submetidos às análises estatísticas, análises harmônicas e análises espectrais.

1.3.1 Parâmetros estatísticos

Nos dados de nível e de correntes foram realizadas análises estatísticas básicas, tais como, cálculos da média, desvio padrão e moda utilizando os pacotes de rotinas disponíveis no ambiente Matlab® (*Descriptive Statistics – Basic Statistics*).

1.3.2 Análises harmônicas e previsão da maré

Nesta etapa do trabalho foi utilizado o pacote de rotinas T-Tide, desenvolvido por Pawlowicz *et al.* (2002) em linguagem Matlab®. Nesta análise partiu-se do pressuposto que a onda de maré foi constituída pelo somatório de componentes representadas por ondas senoidais de amplitude e fase constantes, cujos registros *in situ* foram determinados a partir das oscilações do nível da água e da velocidade das correntes medidas. Este pacote de rotinas também foi utilizado para a investigação do comportamento das correntes de maré da região, uma vez que estas foram obtidas a partir da subtração entre os dados medidos *in situ* e os previstos com o programa *t_predic* do pacote T-Tide

1.3.3 Análises espectrais

A análise espectral, denominada especificamente de Transformada de Fourier, foi utilizada neste estudo para a investigação de fenômenos periódicos que resultaram da superposição de ondas senoidais que apresentaram períodos e amplitudes característicos (EMERY & THOMSON, 2001). Pela análise de Fourier uma série temporal foi desmembrada em componentes que apresentaram diferentes frequências, sendo as componentes mais significativas identificadas através de picos distintos nos espectros de energia.

Neste trabalho, a análise espectral foi utilizada para a identificação das oscilações presentes na área de estudo, sendo possível determinar quais as frequências mais energéticas que atuaram no sistema oceânico e a sua origem. Esses resultados serviram de base para as simulações hidrodinâmicas realizadas a partir da utilização da modelagem numérica.

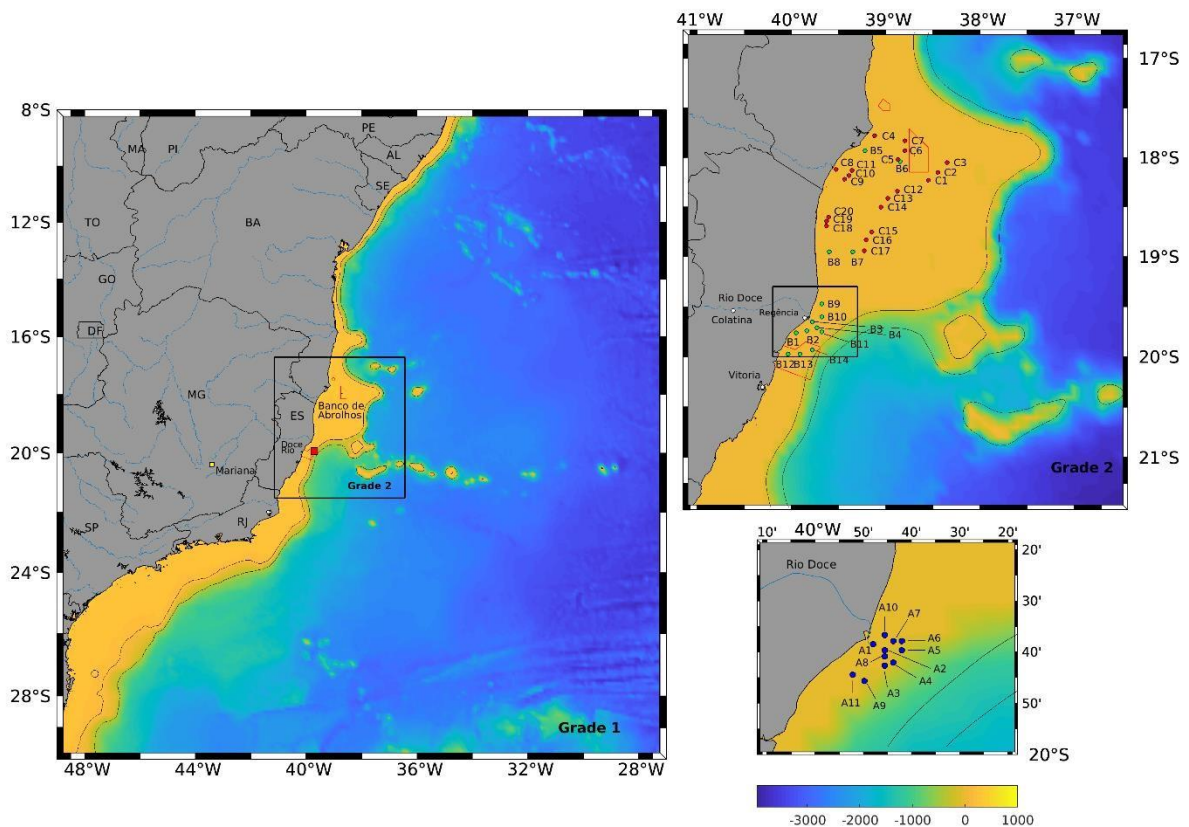
1.4 MODELAGEM NUMÉRICA

Nesta etapa do estudo numérico foram realizados experimentos de caráter realístico sobre a hidrodinâmica da região da plataforma continental do Espírito Santo e sul da Bahia (modelo ROMS), simulando-se campos de corrente e termohalinos. Além disso, realizou-se uma modelagem de transporte da carga sedimentar e de água doce aportada pelo Rio Doce na região oceânica adjacente a sua foz (modelo ROMS+STRiPE), visando o entendimento dos padrões de distribuição e deposição dos sedimentos sobre a plataforma continental e a dispersão de águas fluviais. Do mesmo modo, foi utilizado o modelo biogeoquímico para determinação dos campos de concentrações de nutrientes (nitrato e amônio), campos de distribuição de fitoplâncton e zooplâncton, e determinação dos campos de concentrações de clorofila-a e oxigênio dissolvido. O período de simulação numérica se estendeu de janeiro de 2015 até outubro de 2018.

1.4.1 Modelo hidrodinâmico

O modelo oceânico tridimensional ROMS (*Regional Ocean Modeling System*, <http://www.myroms.org>) foi implementado para a região de interesse apresentada na Figura 2. Este modelo foi utilizado tanto para evidenciar processos costeiros de submesoescala e mesoescala ao longo da plataforma continental do Espírito Santo e oceano adjacente, quanto para modelar o transporte de sedimentos, das variáveis geoquímicas e determinar a distribuição dos organismos planctônicos. Para tanto, duas grades (Grade 1 e Grade 2) com distintas resoluções espaciais foram utilizadas para simular a hidrodinâmica dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Na Grade 1, a resolução espacial implementada foi de $1/24^\circ$ (aproximadamente 4,6 km), cobrindo a região entre 49° e 27° W e entre 8° e 27° S. Aninhada a esta grade foi utilizada a técnica de *downscaling two-way* na Grade 2, agora com resolução espacial de $1/120^\circ$ (0,9 km), com foco sobre a plataforma do ES entre o Banco de Abrolhos e o sul do Estado do Espírito Santo (41° e $36,4^\circ$ W e $16,7^\circ$ e $21,5^\circ$ S) (Figura 2). Na Grade 2 foram incluídas 52 estações virtuais com saídas horárias de resultados, com as localizações determinadas de acordo com as primeiras campanhas oceanográficas realizadas após o rompimento da barragem. Nessas estações foram obtidos resultados termohalinos (campos de temperatura e salinidade) e de velocidade do modelo hidrodinâmico, bem como as concentrações de sedimentos superficial e de fundo com o modelo de sedimentos, e as concentrações de nutrientes, fitoplâncton, zooplâncton, clorofila-a e oxigênio dissolvido com o modelo biogeoquímico.

Figura 2: Área de estudo destacando as Grades 1 e 2. Os pontos coloridos (A, B e C) destacam estações virtuais que foram utilizadas para a análise da concentração de sedimentos em suspensão e das variáveis obtidas com o modelo biogeoquímico. Eles referem-se a pontos onde ocorreram coleta de dados *in situ* nas primeiras campanhas do pré-monitoramento. O quadrado vermelho na Grade 1 indica a localização da boia Vitória (PNBOIA) de onde foram extraídos dados de corrente usados na validação do modelo numérico de circulação.



A elevação da superfície foi parametrizada pela condição limite de Chapman (modo explícito) (CHAPMAN, 1985), enquanto que as parametrizações *radiation/nudging* e Flather (2D *momentum*) (FLATHER, 1976) foram utilizadas para as componentes baroclínica e barotrópica, respectivamente. O modo *radiation* utilizado foi resolvido por Orlanski (1976) e Raymond e Kuo (1984) e reproduziu do fluxo de entrada e saída ao longo do contorno, bem como em diferentes profundidades da mesma localização horizontal. Neste trabalho foi usada uma escala de tempo de um dia para ambos. Um relaxamento para os traçadores climatológicos de temperatura e salinidade (T-S) foi aplicado em 5 dias no interior do domínio. A difusão horizontal harmônica ($10 \text{ m}^2/\text{s}$) foi utilizada para *momentum* e os traçadores (temperatura e salinidade). Os traçadores foram misturados ao longo das superfícies geopotenciais e o *momentum* foi misturado ao longo dos níveis sigma. Uma camada de esponja para difusividade de 30 pontos de grade foi incluída nos limites abertos da Grade 1 e 2, enquanto o coeficiente de viscosidade horizontal foi mantido constante em todo o domínio ($A_h = 50 \text{ m}^2/\text{s}$). A mistura turbulenta vertical foi o *Generic Length Scale* (GLS: k-kl) para os parâmetros de fechamento turbulento (WARNER *et al.*, 2005). A tensão de cisalhamento de fundo foi parametrizada segundo a lei quadrática de arrasto do fundo, com coeficiente de arrasto igual a $C_d = 3 \times 10^{-3}$.

A discretização vertical adotada utiliza 40 camadas sigma com os parâmetros de estiramento de superfície e fundo prescritos como 6,5 e 2,5, respectivamente. As medições *in situ* mostraram que a pluma do Rio Doce ocupou preferencialmente a camada superficial até dois metros da coluna d'água, portanto, na região sobre a plataforma continental os nove primeiros níveis sigma foram concentrados até essa profundidade. Esses nove níveis representam 0,2 m, 0,4 m, 0,6 m, 0,9 m, 1,1 m, 1,3 m, 1,6 m, 1,8 m e 2,1 m de profundidade, respectivamente. De fato, tanto nas coletas realizadas na foz do Rio Doce entre os dias 05 e 15 de Novembro de 2018 (ponto SDN 13), quanto no segundo cruzeiro (entre os dias 14 e 15 de novembro de 2018) foi observada no ponto SD 01-2 uma água menos salina amostrada nos primeiros dois metros de profundidade, justificando a distribuição vertical das camadas sigma. As forçantes, os dados de entrada e de contorno estabelecidas para o modelo hidrodinâmico são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados e forçantes utilizados como condições iniciais e de contorno na modelagem hidrodinâmica

Dados e forçantes	Fonte	Resolução espacial	Resolução temporal
Batimetria	Mapa Batimétrico Geral dos Oceanos (GEBCO) (IOC e BODC, 2003)	30'	-
Atmosférica	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> (ERA Interim/ECMWF)	0,25°	3 horas
Maré (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf e Mm)	TPXO 9.0 (EGBERT & EROFEEVA, 2002)	0,25°	-
Hidrodinâmico	HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM Global) NCODA	0,5°	24 horas

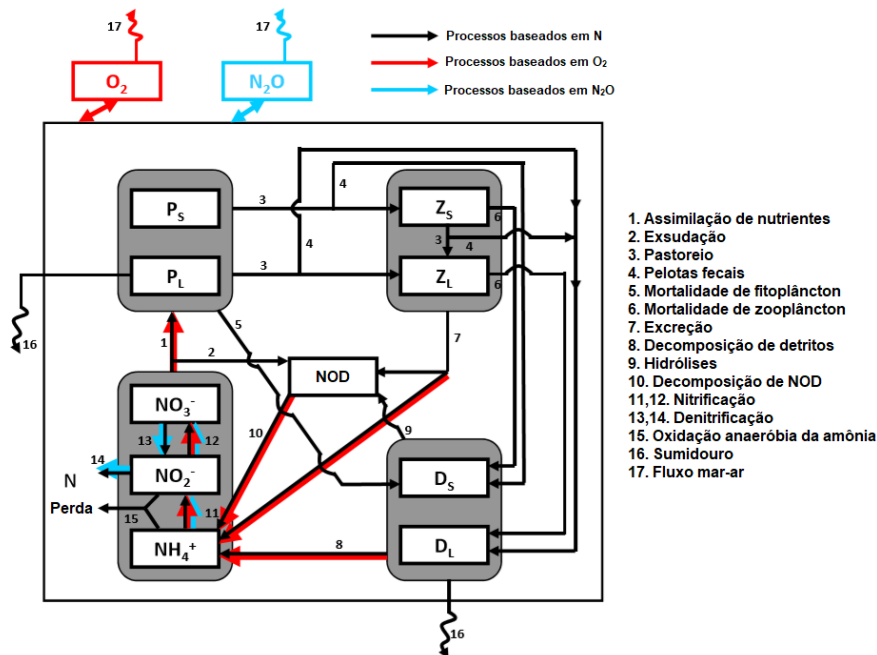
1.4.2 Modelo biogeoquímico

No presente estudo o modelo hidrodinâmico ROMS foi acoplado ao modelo biogeoquímico BioEBUS (*Eastern Boundary Upwelling Systems*), primariamente desenvolvido para aplicação em sistemas de ressurgência localizados nos contornos leste dos oceanos, tais como Califórnia, Humboldt e Benguela. Para este estudo, a aplicação deste modelo foi possível devido a ocorrência de ressurgência na plataforma continental capixaba entre as latitudes de 19,5°S e 22°S, visto que devido a atuação dos ventos ocorre advecção da ACAS sobre a plataforma continental, promovendo a disponibilização de nutrientes, e conseqüente aumento das comunidades fitoplanctônica e zooplanctônica (PALÓCZY *et al.*, 2016). Inicialmente havia sido proposta a utilização do modelo biogeoquímico PISCES (*Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*) acoplado às simulações hidrodinâmicas. No entanto, ao longo do desenvolvimento dos experimentos numéricos foram identificados problemas computacionais no código fonte desse modelo biogeoquímico. Além disso, as condições iniciais

necessárias para começar a simulação acoplada PISCES-hidrodinâmico estão associadas a 24 diferentes parâmetros biogeoquímicos (AUMONT *et al.*, 2015), e ao serem realizadas análises dos campos iniciais das variáveis consideradas pelo modelo constatou-se que alguns dos parâmetros tinham uma representatividade duvidosa sobre a plataforma continental brasileira, visto que são climatologias e campos médios desenvolvidos para outras regiões oceânicas ao redor do globo. O modelo BioEBUS, em contrapartida, necessita de 12 diferentes parâmetros biogeoquímicos para inicialização, o que reduz as chances de erros em condições iniciais e se adequa fisicamente a região de estudo, visto que foi desenvolvido para regiões de ressurgência costeira.

O modelo BioEBUS é derivado do modelo N2P2Z2D2 (KONEÉ *et al.*, 2005). Neste modelo, o íon nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+) representam a fonte de nitrogênio inorgânico dissolvido (N), sendo o fitoplâncton e o zooplâncton divididos em pequenos (flagelados e ciliados) e grandes (diatomáceas e copépodes) organismos. Os detritos, quando depositados na camada da interface sedimento-água, não podem ser mais advectados para a coluna d'água. No modelo BioEBUS, a exsudação do fitoplâncton, a excreção orgânica do zooplâncton e a hidrólise de detritos representam fontes de Nitrogênio Orgânico Dissolvido (NOD), enquanto que a amonificação retira o nitrogênio orgânico do sistema (DADOU *et al.*, 2001, 2004; HURET *et al.*, 2005). Na Figura 3 podem ser observadas as interações que ocorrem nos diferentes compartimentos do modelo BioEBUS.

Figura 3: Esquema representativo das interações que ocorrem entre os diferentes compartimentos do modelo BioEBUS. As siglas P_S, P_L, Z_S, Z_L, D_S e D_L correspondem ao nanofitoplâncton, microfitoplâncton, microzooplâncton, mesozooplâncton, detritos pequenos e detritos grandes, respectivamente. As setas pretas representam os processos dependentes do nitrogênio. As setas vermelhas indicam os processos dependentes de oxigênio. As setas azuis indicam os processos relacionados à produção de N₂O. Para simplificar a representação das interações que ocorrem entre todas as variáveis, as setas que saem ou que entram nos retângulos cinzas agem em todas as variáveis incluídas nos retângulos. Por exemplo, as setas entre os nutrientes e o fitoplâncton (assimilação) é uma simplificação de 6 diferentes interações, sendo elas: de NO₃⁻, NO₂⁻ e NH₄⁺ para P_S e P_L.



Fonte: modificado de Gutknecht *et al.* (2013).

Matematicamente, a determinação da evolução das concentrações dos traçadores biológicos (C_i) no modelo BioEBUS, é dada pela Equação 1:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (u C_i) + K_h \nabla^2 C_i + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + SMS(C_i) \quad \text{Equação 1}$$

Os três primeiros termos dispostos do lado direito da equação representam a advecção, a difusão horizontal e a difusão vertical, respectivamente, sendo que o último termo (SMS, do inglês "source-minus-sink") representa a atividade biológica.

Na Tabela 2 estão discriminadas as 12 variáveis consideradas no modelo BioEBUS, os valores considerados em superfície no início das simulações e a escala de profundidade utilizada no decaimento exponencial para NO₃⁻, NO₂⁻ e o NOD.

Tabela 2: Variáveis consideradas no modelo BioEBUS, unidades, valores iniciais utilizados nas simulações e escala de profundidade considerada no decaimento exponencial ao longo da profundidade (para o NO_3^- , NO_2^- e o NOD). Note que as unidades das variáveis biológicas e de detrito estão em termos de Nitrogênio.

Variáveis	Unidades	Valores iniciais	Escala de profundidade (m)
Nanofitoplâncton (Flagelados)	mmol N/m ³	$f([\text{Chl}])^a$	Extrapolção vertical ^f
Microfitoplâncton (Diatomáceas)	mmol N/m ³	$f([\text{Chl}])^a$	-
Nitrato (NO_3^-)	mmol N/m ³	CARS ^b	100
Nitrito (NO_2^-)	mmol N/m ³	0,05	100
Amônio (NH_4^+)	mmol N/m ³	0,1 ^c	
Microzooplâncton (ciliados)	mmol N/m ³	d	
Mesozoplâncton (copépodes)	mmol N/m ³	d	
Detritos pequenos	mmol N/m ³	0,02 ^c	Constante em toda profundidade
Detritos grandes	mmol N/m ³	0,02 ^c	Constante em toda profundidade
Nitrogênio orgânico dissolvido	mmol N/m ³	CARS ^b	100
Oxigênio dissolvido (O_2)	mmol O/m ³	$f([\text{O}_2])^b$	-
Óxido nitroso (N_2O)	mmol N/m ³		-

Fonte: modificado de Gutknecht *et al.* (2013).

^a Nanofitoplâncton, microfitoplâncton, microzooplâncton e mesozoplâncton são uma função de $[\text{Chl} - a]$ de climatologia do SeaWiFS.

^b Dados do CARS (2009).

^c KONEÉ *et al.* (2005).

^d Baixa concentração *offshore* (KONEÉ *et al.* 2005) e aumento *onshore*.

^e Função da $[\text{O}_2]$ oriunda da base de dados CARS (2009) utilizado na parametrização por Suntharalingam *et al.* (2000, 2012).

^f Extrapolção vertical de $[\text{Chl}-a]$ baseados em valores de superfície utilizados na parametrização de Morel e Berthon (1989).

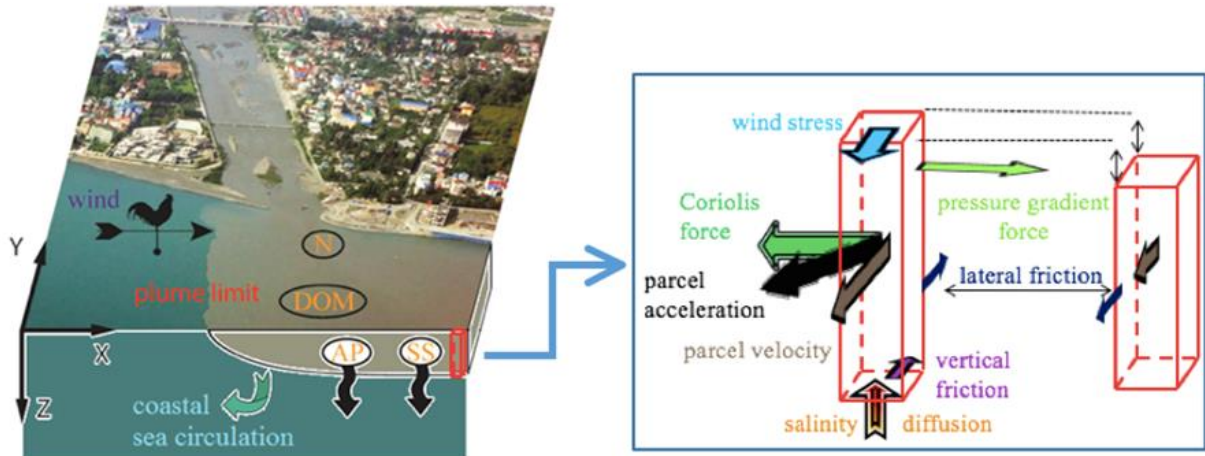
Mais informações sobre a matemática que rege o funcionamento do modelo BioEBUS podem ser encontradas no trabalho de Gutknecht, *et al.* (2013).

1.4.3 Modelo de transporte de sedimento

O transporte e a decantação de sedimentos finos suspensos carregados pelo Rio Doce foram simulados usando um módulo lagrangeano de rastreamento de partículas. Cada partícula representa um elemento imaginário de água doce da pluma (superfície à base inferior da pluma) sujeita à ação de diferentes

forçantes, como a força gradiente de pressão, tensão de cisalhamento do vento, fricção lateral e vertical, etc. (Figura 4).

Figura 4: Digrama esquemático mostrando a atuação de diferentes forçantes sobre uma partícula/elemento de água no modelo STRIPE. N: nutrientes; DOM: matéria orgânica dissolvida; AP: poluentes antropogênicos; SS: sólidos suspensos.



Os movimentos horizontais e verticais de uma partícula de sedimento são calculados usando-se uma combinação de componente determinístico definido pelo movimento da água no ambiente e o afundamento de uma partícula sob a ação da força gravitacional, bem como um esquema estocástico que reproduz a influência da mistura turbulenta de pequena escala. As partículas foram inicialmente lançadas na foz do rio e seu transporte horizontal foi determinado pela dinâmica interna de uma pluma de rio simulada pelo modelo *Surface-Trapped River Plume Evolution* (STRiPE).

Depois que as partículas de sedimentos se depositam sob a pluma, seu movimento é governado pela circulação costeira adjacente, reproduzida pelo modelo hidrodinâmico ROMS. Configuração semelhante de modelos Eulerianos e Lagrangeanos acoplados foi recentemente usada para simulação de transporte de sedimentos terrígenos lançados pelo Rio Peinan na costa sudeste da ilha de Taiwan (KOROTENKO *et al.*, 2014; OSADCHIEV *et al.*, 2016) e por numerosas pequenas plumas fluviais localizadas na costa nordeste do Mar Negro (OSADCHIEV & KORSHENKO, 2017).

O modelo STRiPE foi desenvolvido para a simulação de partículas em alta resolução da dinâmica de submesoescala de plumas de rios (OSADCHIEV & ZAVIALOV, 2013). As partículas do STRiPE são lançadas no mar a partir dos estuários dos rios, a sua velocidade inicial é governada pela vazão e pelas dimensões da foz (largura e profundidade). Movimentos subsequentes de partículas individuais e sua mistura com a água do mar subjacente são rastreados pelo modelo. O conjunto total de partículas representa uma pluma de rio e, portanto, a evolução temporal de uma estrutura de pluma é obtida. A principal vantagem do STRiPE reside na sua capacidade de fornecer resultados realistas a um custo computacional relativamente baixo em comparação aos modelos Eulerianos (OSADCHIEV, 2015).

A difusividade turbulenta horizontal usada no módulo STRiPE é parametrizada pela fórmula de difusão de Smagorinsky (SMAGORINSKY, 1963). A mistura vertical com a água do mar é parametrizada pela

equação de difusão de salinidade. Para a descrição completa e detalhada do modelo STRiPE o leitor pode buscar por Osadchiev e Zavialov (2013).

O módulo STRiPE foi forçado pela tensão de cisalhamento do vento e pela dinâmica costeira oriunda dos resultados da simulação numérica do ROMS. As partículas foram liberadas próximo à foz do rio e a vazão foi calculada usando os dados da vazão da ANA (SNIRH, 2019) considerando a largura da foz igual a 150 m e profundidade de 5 m. Após serem liberadas no oceano, as partículas ficaram suscetíveis às velocidades de fluxo e condições termohalinas fornecidas pelo modelo hidrodinâmico (ROMS). As massas específicas da água do rio e da água do mar foram prescritas como 1,000 kg/m³ e 1,037 kg/m³, respectivamente. O passo do tempo do modelo foi definido como igual a 600 s.

As concentrações de material em suspensão (carga sedimentar) do Rio Doce foram prescritas de acordo com dados semanais medidos *in situ* na estação de Colatina no período de janeiro de 2015 a junho de 2018 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2019), enquanto que a granulometria foi baseada em medições realizadas *in situ* na foz do Rio Doce previamente ao rompimento da barragem (APRILE *et al.*, 2004). Nesta etapa do projeto, foram consideradas partículas relativamente pequenas (argila e fração coloidal) com diâmetros inferiores a 10⁻⁶ m. Estas frações são geralmente transportadas para longe da foz do rio e em uma ampla área costeira devido à sua baixa velocidade de sedimentação. O movimento vertical induzido pela gravidade é determinado pela lei de Stokes (STOKES, 1901). Quanto a análise dos resultados das concentrações de sedimentos, é importante esclarecer que o STRiPE modela plumas que apresentam poucos centímetros de espessura, ou seja, plumas muito finas e que ficam restritas à superfície. Logo, os resultados das concentrações de sedimentos são sempre expressos em kg/m² e não em kg/m³.

2 RESULTADOS

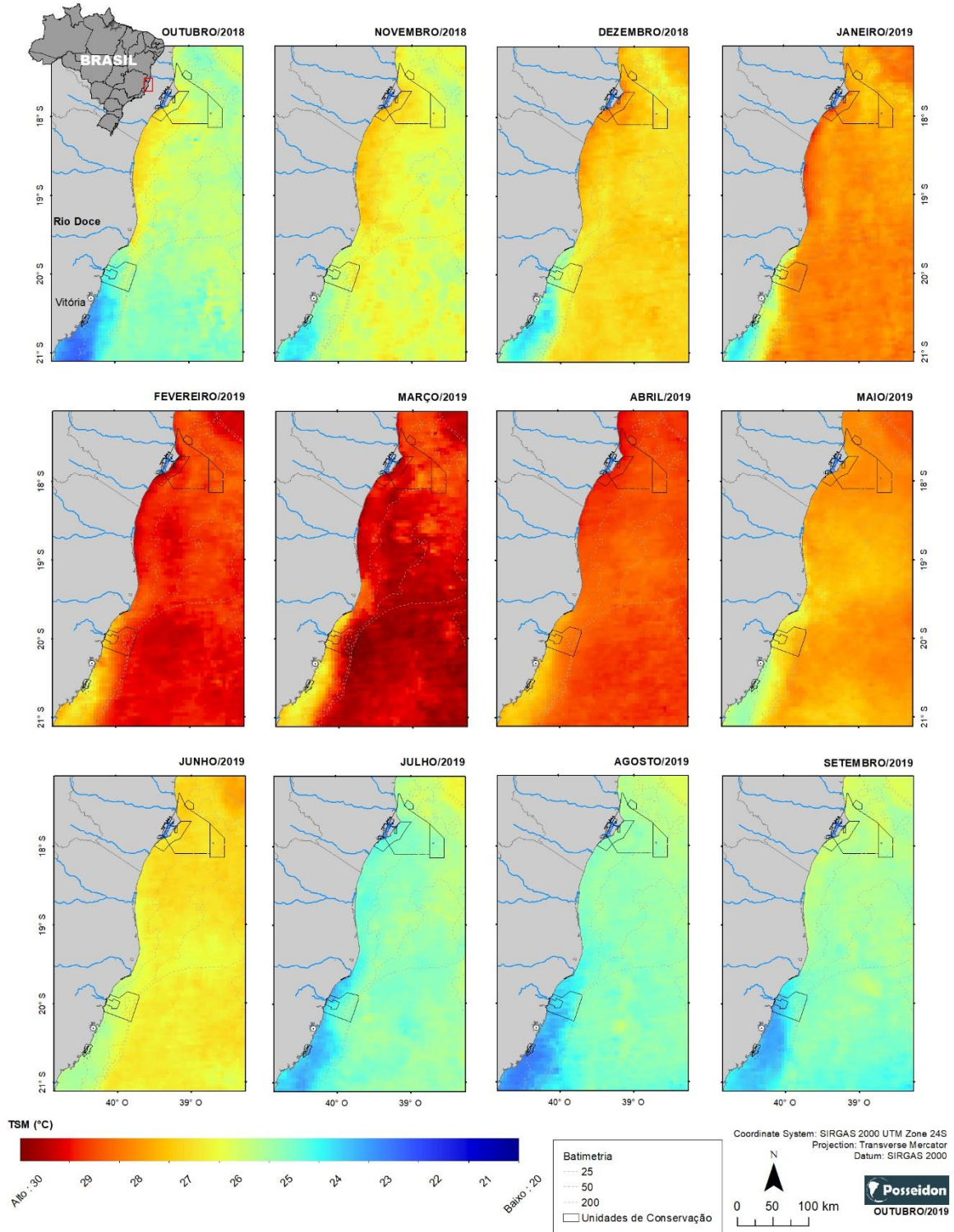
Primeiramente, uma visão geral das condições meteo-oceanográficas vigentes durante o período do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA) – outubro/2018 a setembro/2019 – será apresentada para melhor entendimento dos resultados obtidos.

A média mensal da temperatura da superfície do mar (TSM) para os meses do monitoramento quando ocorreram as amostragens em campo é apresentada na Figura 5. Nas imagens de TSM ficou evidente o ciclo sazonal de aquecimento (outubro a março) e resfriamento (abril a julho) da camada superficial do oceano regido pelo balanço do fluxo líquido de calor e a presença com intensificação e enfraquecimento da ressurgência costeira dirigida pelos ventos atuantes na região.

O mês de outubro/2018 (início da primavera) apresentou baixo valor médio da TSM, ficando em torno de 24 e 25 °C. Houve a presença de um gradiente térmico horizontal devido à presença de uma água relativamente mais fria que atingiu a temperatura mínima de 22 °C na região costeira ao sul da foz do Rio Doce (ES). A partir daí toda a área de estudo foi aquecendo ao longo dos meses até atingir a temperatura máxima de 30°C no mês de março/2019 (fim do verão). De abril/2019 (início do outono) em diante, as águas superficiais começaram a se resfriar e o gradiente horizontal térmico que delimitava

o processo de ressurgência costeira ficou menos intenso, isto é, a diferença de temperatura entre a água mais *offshore* e a água mais fria na plataforma continental interna ao sul da foz do Rio Doce que antes chegava a 4 °C, passou a ser de no máximo 2 °C durante o outono. Em julho/2019 (início do inverno) as águas superficiais ficaram entre 24 e 25 °C, sendo observadas águas mais frias que 23 °C na plataforma continental interna. Esse mesmo padrão foi mantido nos meses de agosto e setembro, meses que apresentaram o menor valor médio da TSM.

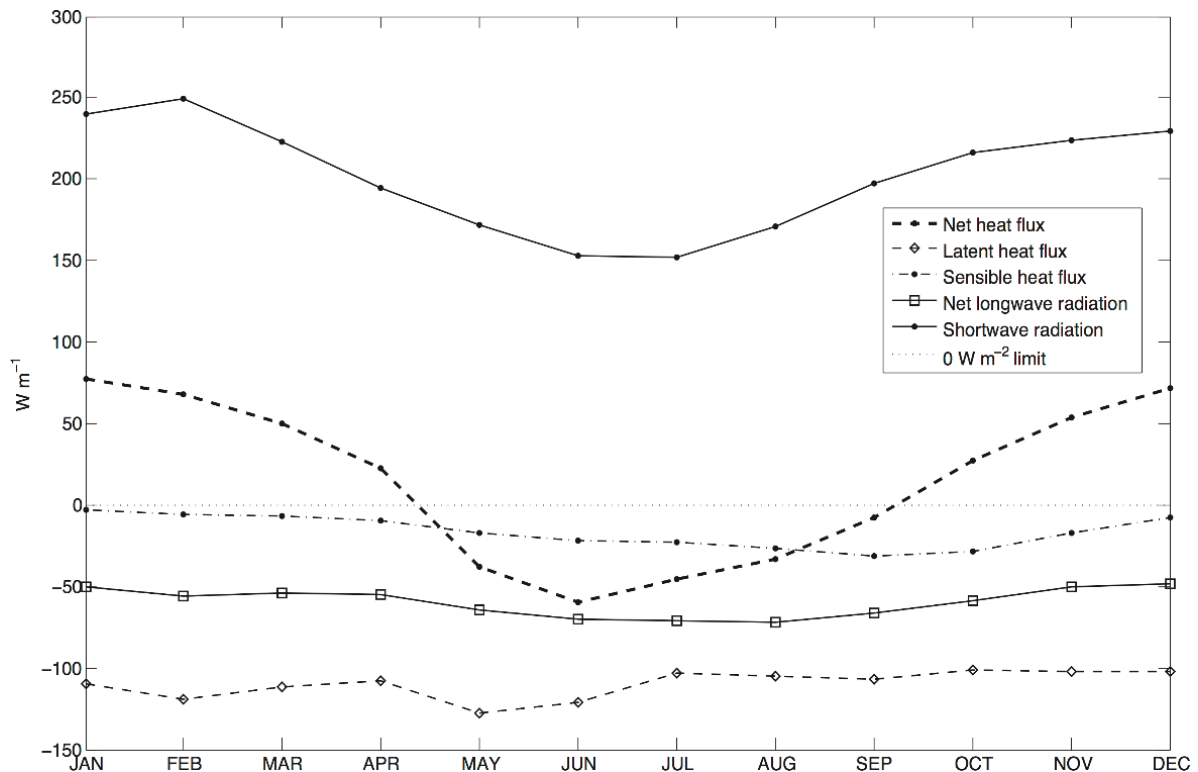
Figura 5: Médias mensais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) estimadas via sensoriamento remoto (Aqua/MODIS) para o período de outubro de 2018 a setembro de 2019.



Tanto no oceano aberto quanto sobre a plataforma continental os processos de estratificação e mistura são controlados, principalmente, pela interação oceano-atmosfera e pelas variações sazonais do balanço do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera (Figura 6). Ghisolfi *et al.* (2015)

ressaltaram que o ciclo de aquecimento-resfriamento varia de acordo com a entrada da radiação de onda curta, ou seja, de outubro a março quando a radiação de onda curta é maior do que 200 W/m^2 e o fluxo líquido de calor é positivo, a porção superficial do oceano aquece. Com o aumento da temperatura da camada superficial, a estratificação vertical se intensifica e a transferência vertical de *momentum* devido à ação da tensão de cisalhamento do vento diminui. Por outro lado, de abril a setembro a água superficial da área de estudo perde calor líquido para a atmosfera devido, principalmente, à redução da entrada de radiação de onda curta, ao aumento da perda de calor latente de abril a julho e ao aumento do fluxo líquido de calor de onda longa entre os meses de abril e outubro. O fluxo líquido de calor negativo induz a um aumento na espessura da camada de mistura e reduz a estratificação termohalina facilitando a transferência vertical de *momentum*.

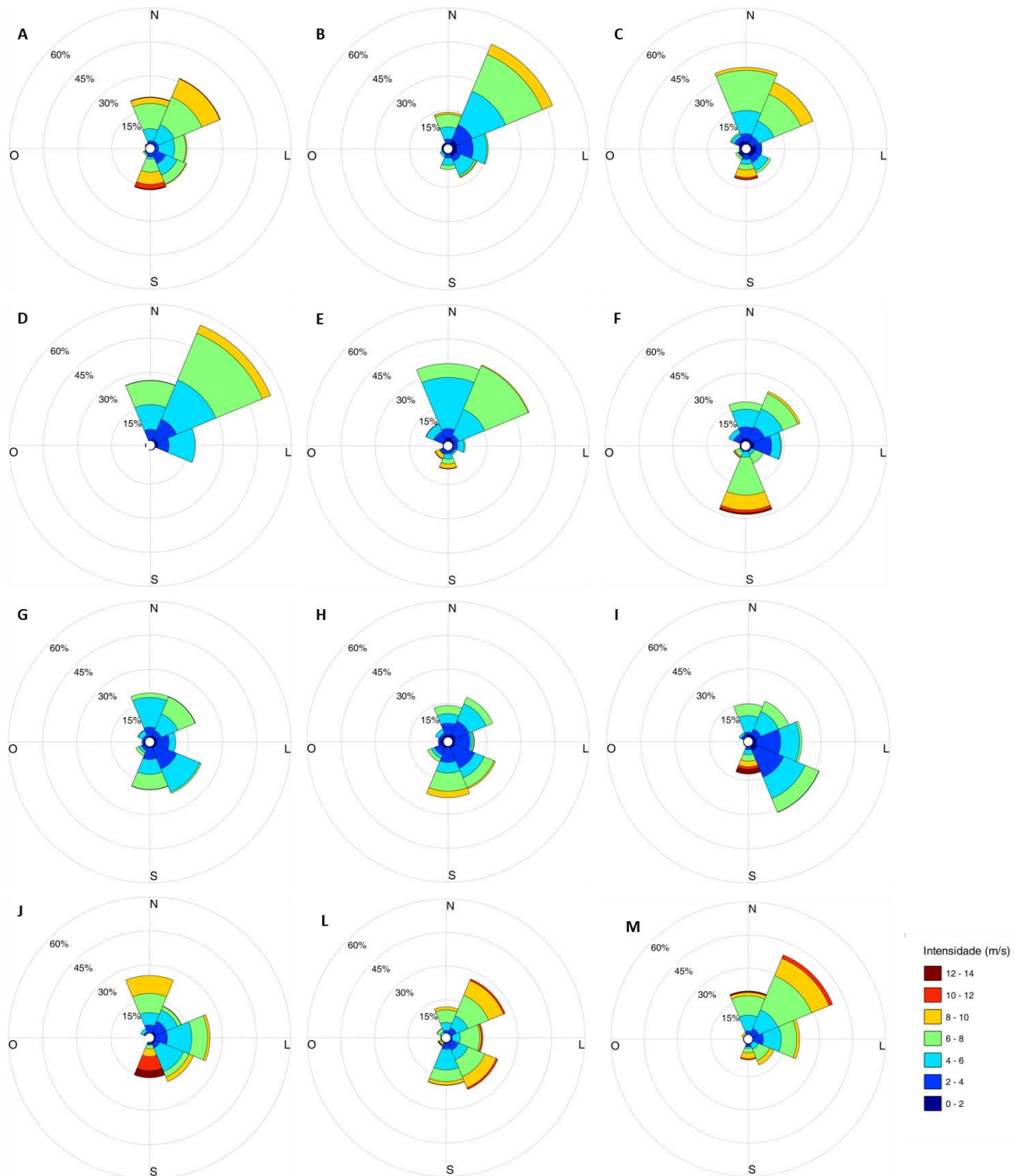
Figura 6: Médias mensais das componentes do balanço do fluxo de calor na interface oceano-atmosfera, válidas para a região de Abrolhos e estimadas a partir dos dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*.



Fonte: Ghisolfi *et al.* (2015).

Ao se analisar a distribuição mensal dos ventos entre outubro/2018 a setembro/2019 (Figura 7) verifica-se que ventos nordeste, relativamente mais intensos, foram típicos nos meses de outubro, novembro, janeiro e setembro. Ventos norte tiveram uma ocorrência considerável nos meses de dezembro, fevereiro e julho, assim como o mês de março foi marcado pela grande ocorrência de ventos mais intensos do sentido sul devido às passagens de uma frente fria e da Tempestade Tropical IBA que a seguiu. Nos meses de abril e maio os ventos nordeste diminuíram sua intensidade e a porcentagem de ocorrência. Nesse período houve uma maior contribuição de ventos mais intensos do quadrante sul devido às entradas de frente fria que se estenderam até agosto.

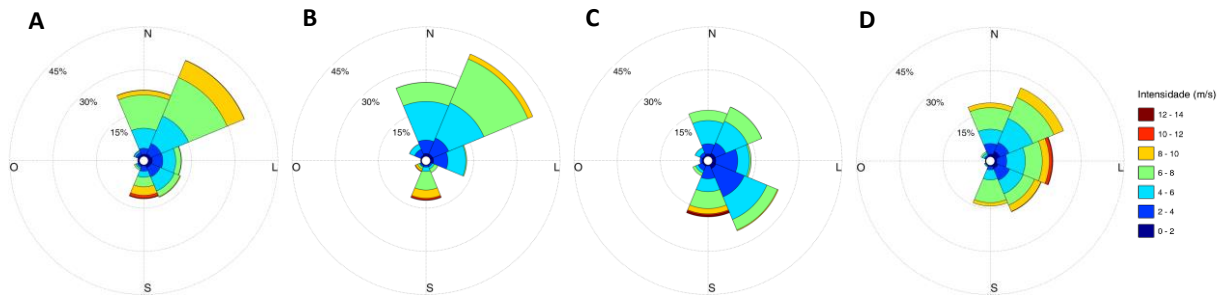
Figura 7: Rosas dos ventos mensais para o período entre outubro/2018 (A) a setembro/2019 (M). A série de dados de ventos foi retirada da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S.



Agrupando-se a distribuição dos ventos sazonalmente para o período do PMBA (Figura 8) observa-se que ventos norte-nordeste favoráveis a eventos de ressurgência costeira foram mais frequentes durante a primavera e o verão. Este padrão resulta da migração sazonal zonal e meridional do Centro de Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul (CAPSAS). O centro está próximo ao Brasil tropical durante o inverno e próximo da costa sul africana durante o verão (PETERSON & STRAMMA, 1991). Ventos

nordeste mais intensos durante a primavera decorrem do forte gradiente de pressão formado entre a alta pressão associada ao CAPSAS e a baixa pressão continental decorrente do alto aquecimento continental em função do baixo calor específico do substrato sólido.

Figura 8: Rosas dos ventos para cada estação do ano no período de outubro/2018 a setembro/2019. A - Primavera; B – Verão; C – Outono; D – Inverno. A série de dados de ventos foi retirada da reanálise e previsão do ECMWF para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S.

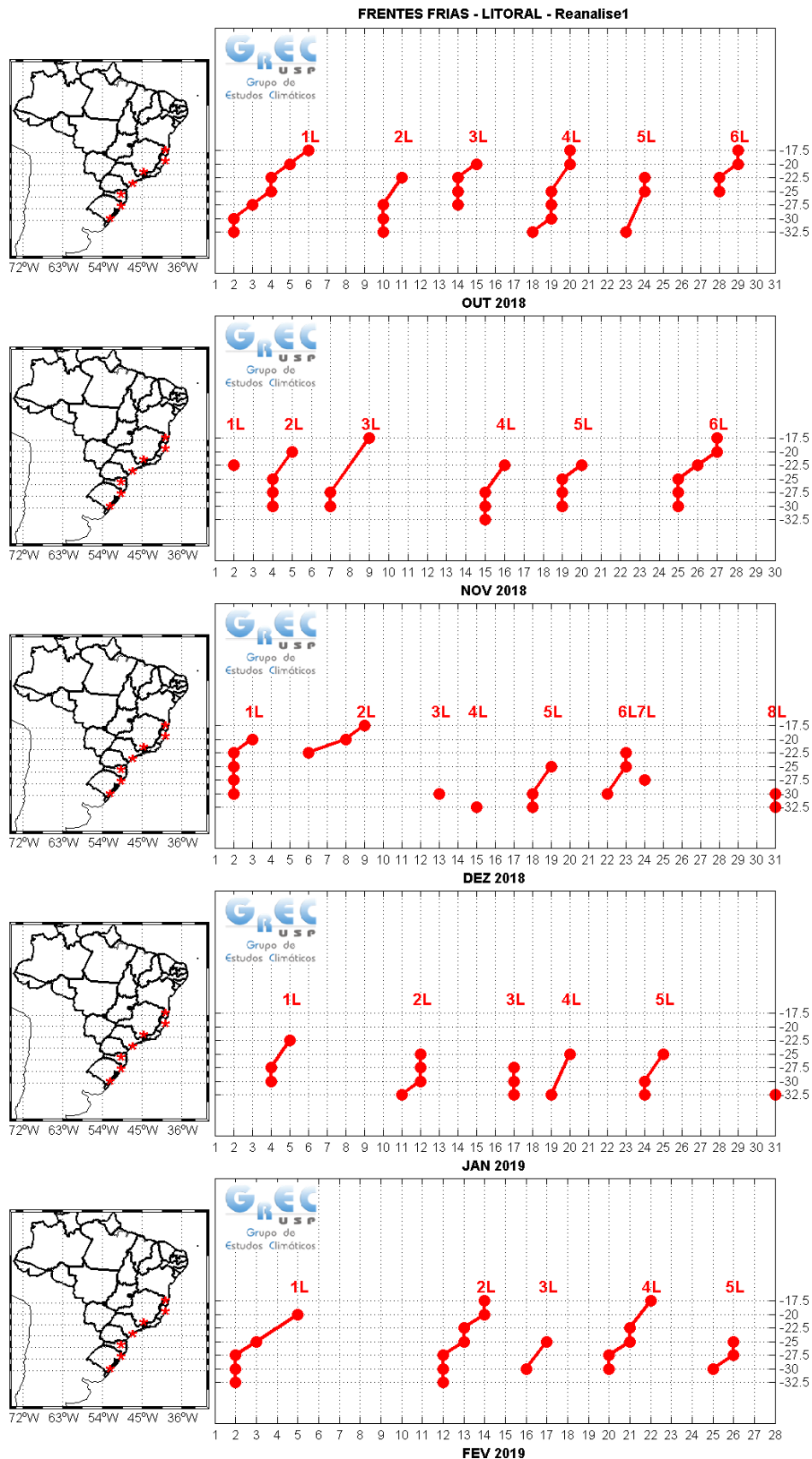


No outono-inverno os ventos nordeste enfraquecem porque o gradiente de pressão diminui e a intensidade e predominância dos ventos sul/sudeste aumentam, os quais são favoráveis à subsidência de água na costa do Espírito Santo. Nas quatro estações do ano amostradas foi possível identificar a ocorrência de entradas de frente fria evidenciadas pelos ventos relativamente mais intensos do quadrante sul, principalmente no outono e no inverno.

A quantificação do número de frentes frias que passaram pelo litoral do Espírito Santo (20 °S) o período entre os meses de outubro/2018 a julho/2019 foi realizada através de resultados obtidos pelo Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP, 2019) os quais são mostrados nas Figura 9 e Figura 10.

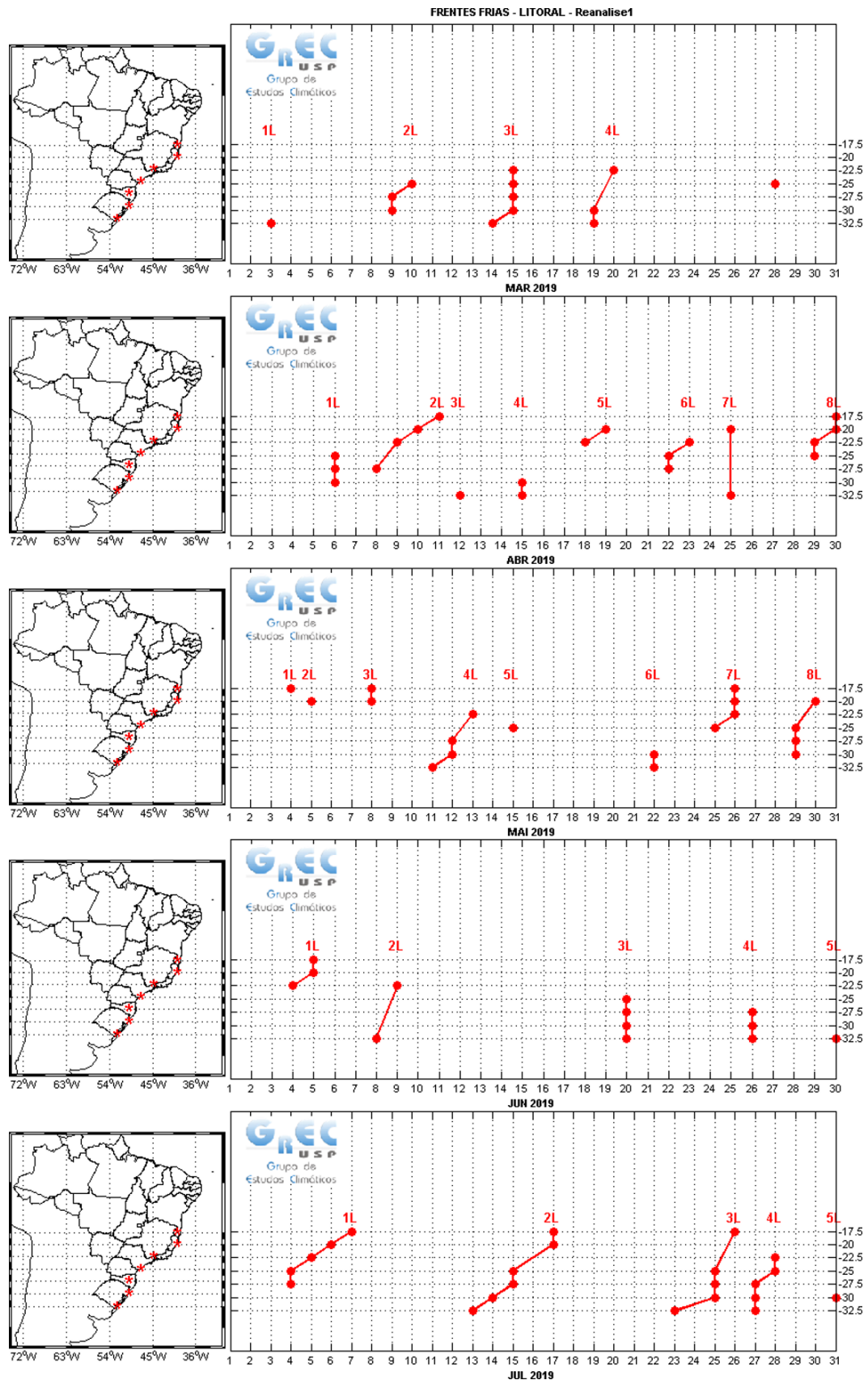
Durante o período analisado, 62 frentes frias passaram pelo litoral do Brasil, das quais 24 passaram no litoral do Estado do Espírito Santo e, entre essas, 17 chegaram até o litoral sul da Bahia. Quando uma frente fria passa por uma região específica diz-se que ela altera(ou) o padrão de ventos localmente. No entanto, é importante destacar que a região pode ser influenciada indiretamente pela atuação da forçante remotamente que provoca, por exemplo, uma mudança no padrão de ondas que pode atingir a área de estudo. Se o escopo de abrangência for ampliado, pode-se considerar que mais 14 frentes frias podem ter contribuído para os resultados obtidos, uma vez que, embora não tenham sido registradas na latitude 20°S, elas chegaram até a latitude de 22,5 °S.

Figura 9: Passagens de frentes frias ao longo da costa sul e sudeste brasileira entre os meses de outubro/2018 a fevereiro/2019. Os números indicam a sequência das frentes frias que passaram na região ao longo do mês considerado.



Fonte: Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP), 2019.

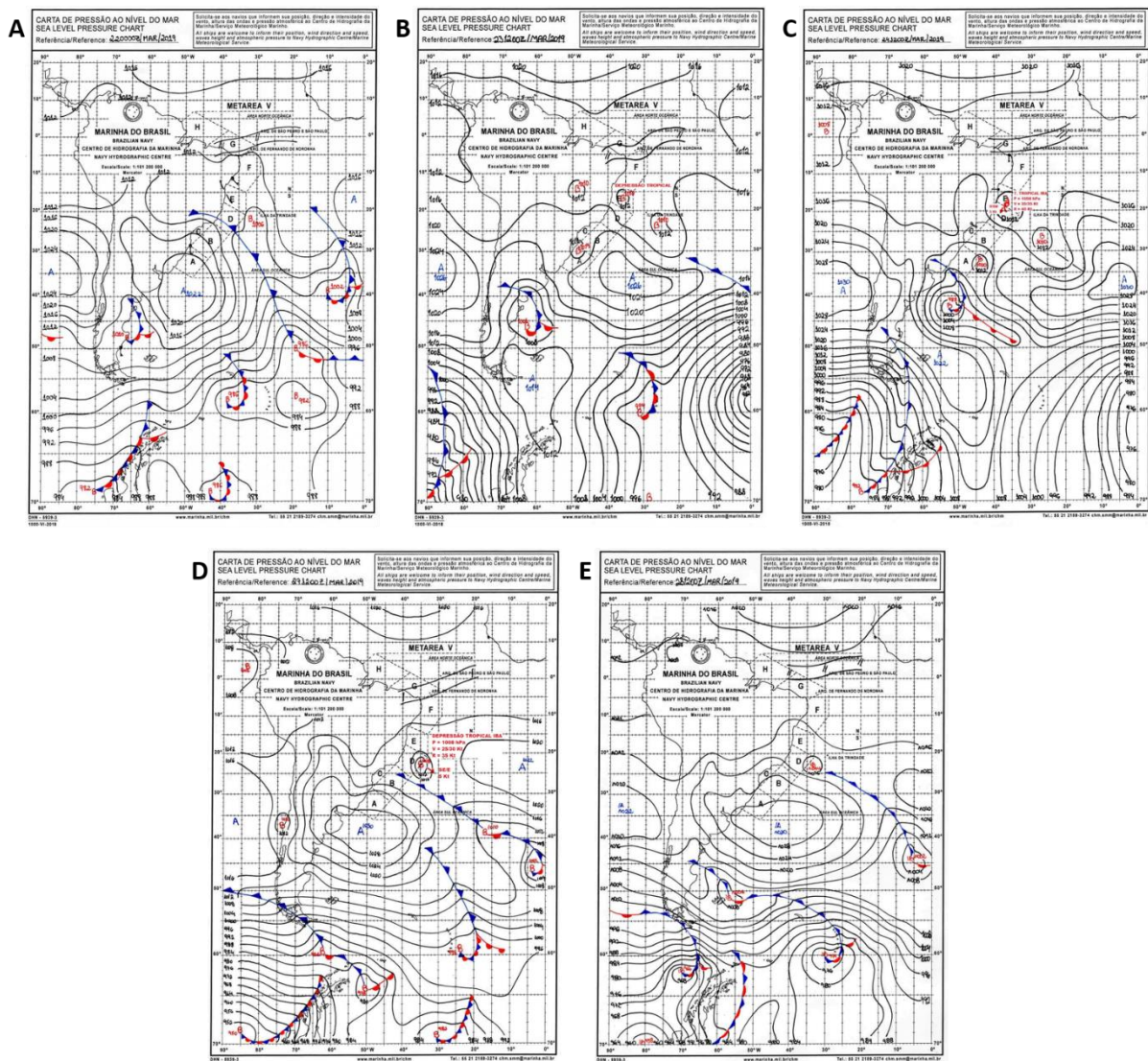
Figura 10: Passagens de frentes frias ao longo da costa sul e sudeste brasileira entre os meses de março a julho/2019. Os números indicam a seqüência das frentes que passaram na região ao longo do mês considerado.



Fonte: Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP), 2019.

Dois eventos meteorológicos significativos afetaram a área de estudo durante o período do PMBA no ano de 2019. O primeiro foi a intensificação de uma baixa pressão superficial (Figura 11a) que se transformou em Depressão Tropical na costa da Bahia no dia 23 de março (Figura 11b). No dia 24 de março a Depressão se tornou uma Tempestade Tropical denominada Iba (Figura 11c). No dia 27 de março, a Tempestade perdeu força e foi reclassificada como Depressão (Figura 11d). Em 28 de março, o fenômeno perdeu as suas características de ciclone tropical e se transformou em um centro de baixa pressão (Figura 11e). O evento foi significativo porque, teoricamente, ele não aconteceria na região tropical do Oceano Atlântico Sul devido à atmosfera cisalhante mas, ainda assim, ele se desenvolveu. Associado ao Iba também houve a passagem de uma frente fria que, em conjunto, deixou o sistema turbulento por duas semanas seguidas.

Figura 11: Cartas de pressão ao nível do mar dos dias (A) 22, (B) 23, (C) 24, (D) 27 e (E) 28 de março/2019.



Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (Marinha do Brasil), 2019.

O segundo evento relevante foi a atuação de um campo de ondas de grande altura e intensidade no final do mês de julho (altura máxima de 8 m e período de 20 s, medido no Fundeio 3) que chegou a

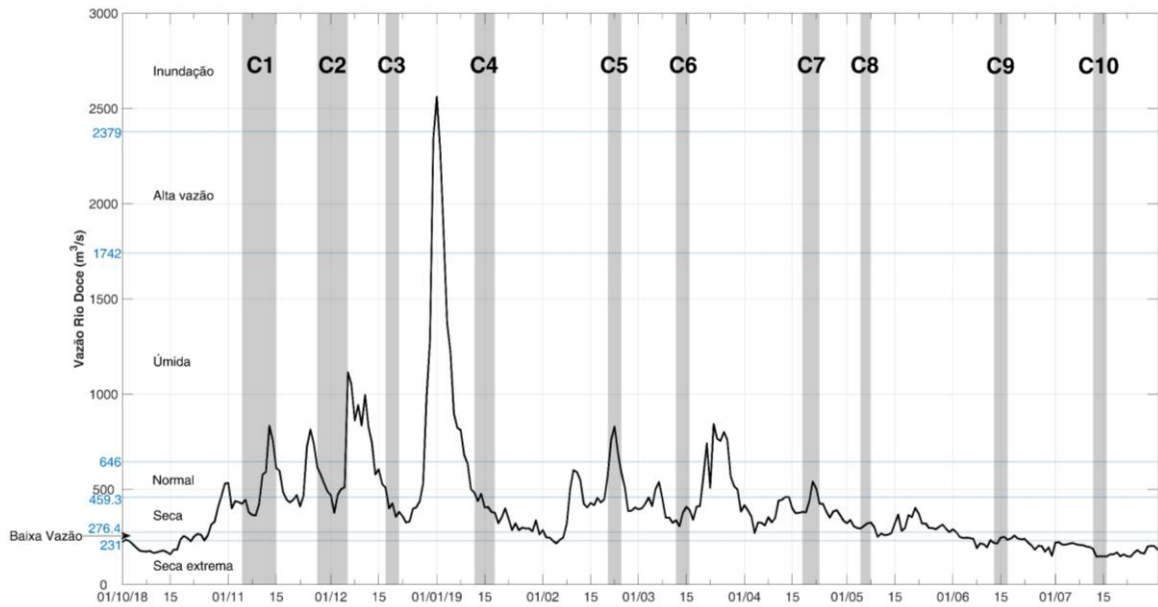
destruir parte da Rodovia do Sol em Guarapari – ES. Esses eventos foram significativamente marcantes durante esse período de monitoramento.

A Tabela 3 mostra sete condições de vazão do Rio Doce estabelecidas por Oliveira e Quaresma (2017) a partir da construção da Curva de Permanência com base nos dados diários de vazão entre 1990 e 2013 adquiridos pela Agência Nacional de Águas (ANA), segundo a metodologia da *Environmental Protection Agency*. Com base nessa classificação, a Figura 12 mostra que a vazão ao longo do período do PMBA ficou na maior parte do tempo sob condição seca (vazão entre 276,4 a 459,3 m³/s) que se estendeu de outubro/2018 a junho/2019. Exceções ocorreram no mês de novembro/2018 a abril/2019 com picos que se apresentaram dentro da condição normal de vazão (valores entre 459,3 e 646 m³/s) muitas vezes extrapolando para a condição úmida (646 a 742 m³/s). A série temporal contou ainda com um episódio que alcançou a condição de alta vazão (> 1742 m³/s) e de inundação (> 2379 m³/s) no início do mês de janeiro/2019. Em junho/2019 a vazão do Rio Doce atingiu a condição de baixa vazão (entre 231 e 276,4 m³/s) e passou para seca extrema ao final desse mesmo mês. Esse comportamento foi reflexo das duas contrastantes estações definidas por Oliveira e Quaresma (2017) baseadas nas medianas climatológicas mensais das descargas de vazão (Figura 13a) e sedimento em suspensão (Figura 13b) do Rio Doce. Segundo essas autoras, a estação seca se estende de abril a outubro, caracterizada pela mediana das menores vazões (≈ 368 m³/s). A estação úmida ocorre entre novembro e março e é caracterizada pela mediana das maiores vazões (≈ 965 m³/s) com a ocorrência de maior transporte de sedimento e alta descarga de água.

Tabela 3: Condições de vazão do Rio Doce estabelecidas por Oliveira e Quaresma (2017) a partir de dados diários de vazão de 1990 a 2013 obtidos no site do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH, 2019).

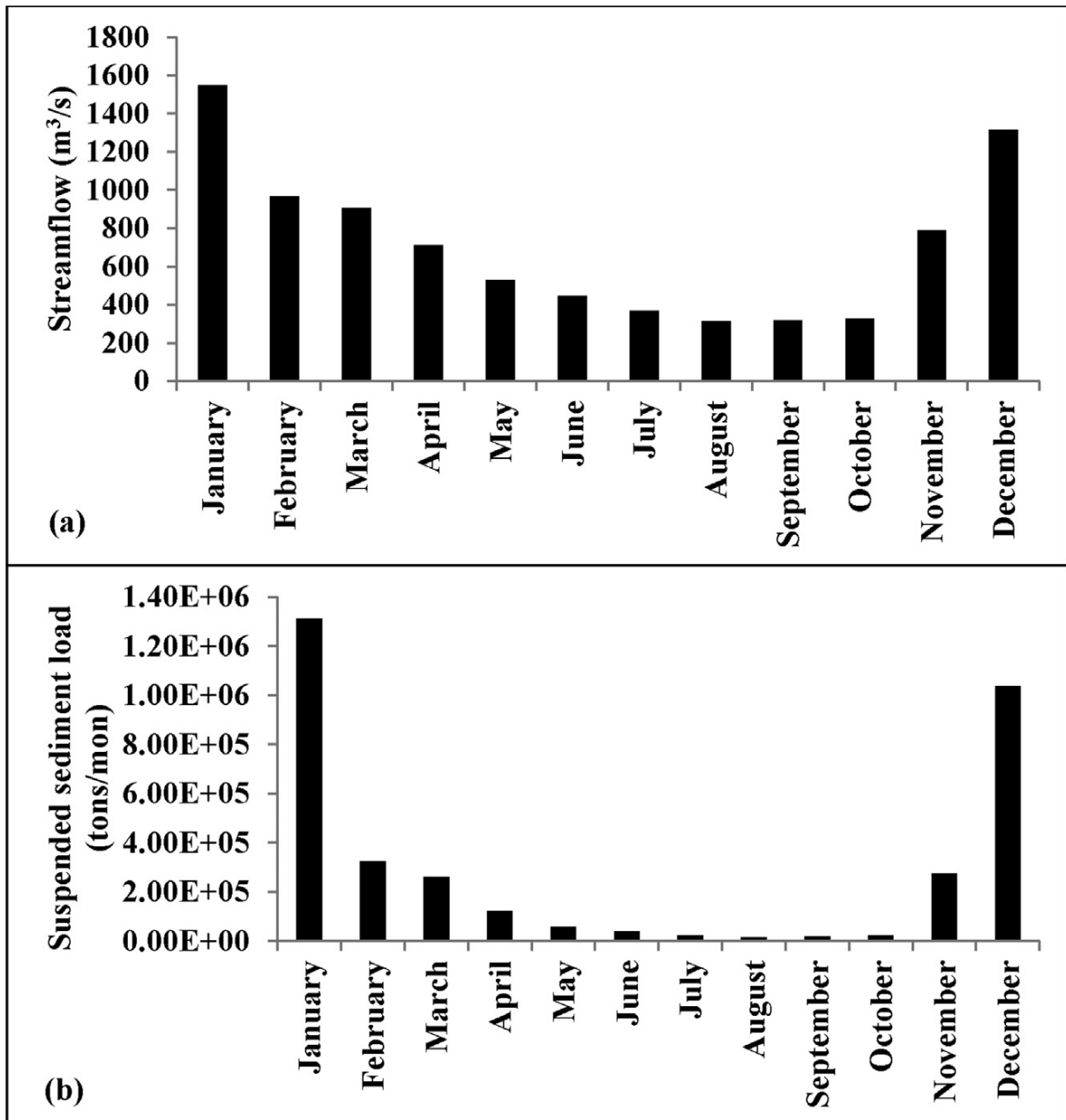
Condições	Vazão (m ³ /s)
Inundação (0 - 5%)	> 2379
Alta vazão (5 - 10%)	1742 – 2379
Úmida (10 - 40%)	646 – 1742
Normal (40 - 60%)	459,3 – 646
Seca (60 – 90%)	276,4 – 459,3
Baixa vazão (90%)	231 – 276,4
Seca extrema (95%)	< 231

Figura 12: Série da vazão do Rio Doce medida na estação da Ponte de Colatina – ES entre os meses de outubro/2018 e julho/2019. Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* são destacadas em cinza.



Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, 2019.

Figura 13: Medianas mensais climatológicas das descargas de vazão (a) e sedimento em suspensão (b) do Rio Doce de 1990 a 2013 baseado nos dados da estação de Colatina – ES.



Fonte: Oliveira e Quaresma, 2017.

No Relatório Semestral toda a discussão feita foi baseado na distribuição espacial dos dados *in situ* e *ex situ* entre outubro/2018 e fevereiro/2019, ou seja, nas estações de primavera e verão. As análises concentraram-se em caracterizar a hidrodinâmica local e entender as relações entre o aporte fluvial e a turbidez do material que chegou à plataforma continental e como foi a distribuição espacial (horizontal e vertical) desse material no período de coletas.

A turbidez próxima à foz do Rio Doce mostrou variações temporais e espaciais que foram consequência de uma combinação de diferentes processos físicos que ocorreram na região. Em superfície, o campo de turbidez próximo à foz mostrou uma estreita relação com a vazão do rio, sendo a direção preferencial

do material em suspensão regida basicamente pela direção e sentido da tensão de cisalhamento do vento predominante. A estratificação da coluna de água foi uma barreira à homogeneização vertical criando um sistema de duas camadas com comportamentos distintos na direção de transporte de sedimento quando combinados à vazão do Rio Doce. Durante o verão devido à relativa estabilidade dos ventos de norte-nordeste foi possível observar o sinal superficial da turbidez no sensoriamento remoto em direção ao sul. Da mesma forma, a turbidez superficial durante a prevalência de ventos do quadrante sul foi em direção norte ao longo da costa. Havendo a ocorrência de ondas mais energéticas, ainda se identificou um padrão de alteração de cor nas imagens de cor verdadeira desde a foz do Rio Doce até a região do PARNAM dos Abrolhos restrito a profundidades menores que 25 m.

A simulação da dispersão de sedimento através da modelagem numérica mostrou que superficialmente a direção predominante de dispersão foi para sul-sudoeste condicionada principalmente pela atuação dos ventos norte-nordeste durante o verão. Nesse período, a presença de sedimentos foi observada nas latitudes próximas à cidade de Vitória (plataforma média e externa) apenas durante dois dias. Já a APA Costa das Algas e o RVS Santa Cruz foram atingidos em quase 50% do tempo de simulação, embora em pequenas concentrações. No fundo, o modelo representou o desenvolvimento do *depocentro* ao mesmo tempo que indicou uma menor dispersão para norte ao longo da costa.

Nesse contexto, dentre as perguntas que ficaram em aberto pode-se destacar quais seriam as modificações que o outono e o inverno trariam ao sistema e como seria o transporte de sedimento determinado por elas. Para tanto, os resultados são apresentados para todo período amostrado de acordo com as subáreas de atuação que compõem o subprojeto Modelagem, iniciando com a apresentação dos resultados obtidos por sensoriamento remoto, seguindo com os dados *in situ* da perfilagem de CTD, a análise de dados dos fundeios e, por fim, os resultados da modelagem numérica.

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO

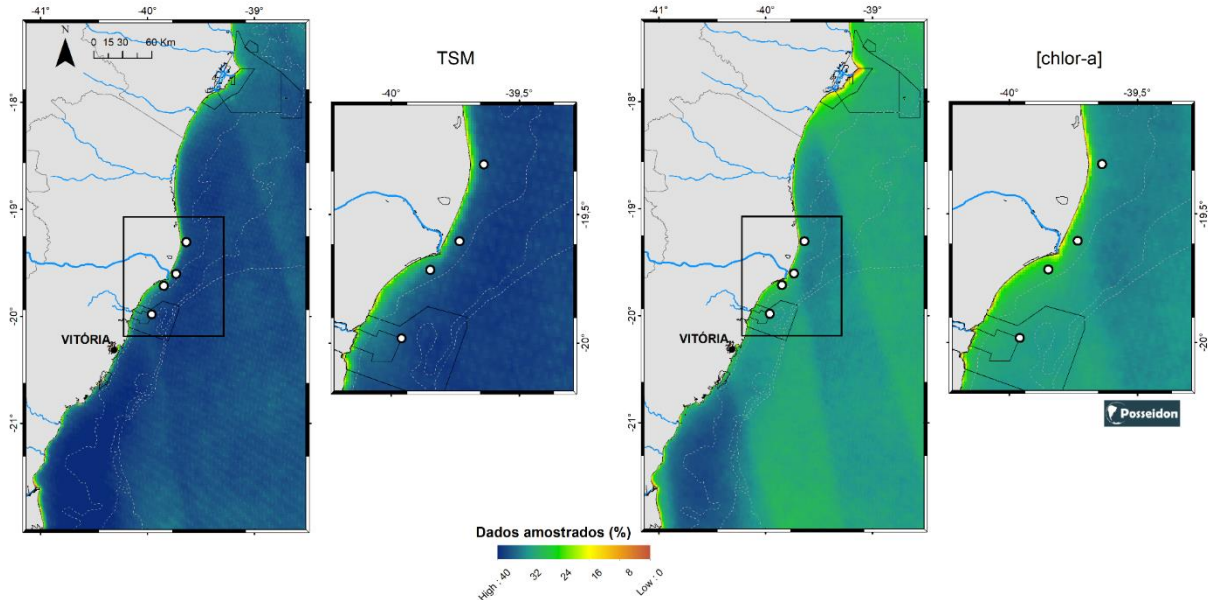
Os resultados apresentados nessa seção têm a proposta de auxiliar na compreensão da variabilidade espacial e temporal da cor ([chlor-a] e da turbidez superficial) e da (TSM). Com exceção da turbidez superficial cujos valores foram derivados em laboratório baseado nas metodologias propostas por Dogliotti *et al.* (2015) e Aurin *et al.* (2013), os dados de [chlor-a] e de TSM foram derivados de acordo com a metodologia usada pelo *Goddard Space Flight Center/National Aeronautics and Space Administration* (NASA, 2018) e não foram alterados.

2.1.1 Funções ortogonais empíricas (EOFs)

As EOFs são aplicadas a extensas séries temporais de dados. No entanto, como a TSM depende da radiação na banda do infravermelho emitida pela superfície do oceano e a cor depende da radiação do espectro de onda do visível refletida pela superfície, a presença de nuvens reduz de forma considerável a quantidade de dados disponíveis. O período compreendido nessa análise foi de 01 de janeiro de 2003 a 24 de abril de 2019, em um total de 5954 de imagens. A ausência de dados foi preenchida por sua respectiva média mensal do mesmo ano quando o dado foi obtido ou, mantendo-se a ausência de

dados, por médias mensais climatológicas do período considerado. A substituição dos dados foi necessária em, aproximadamente, 60% dos pontos de TSM e 65% para a [chlor-a] (Figura 14).

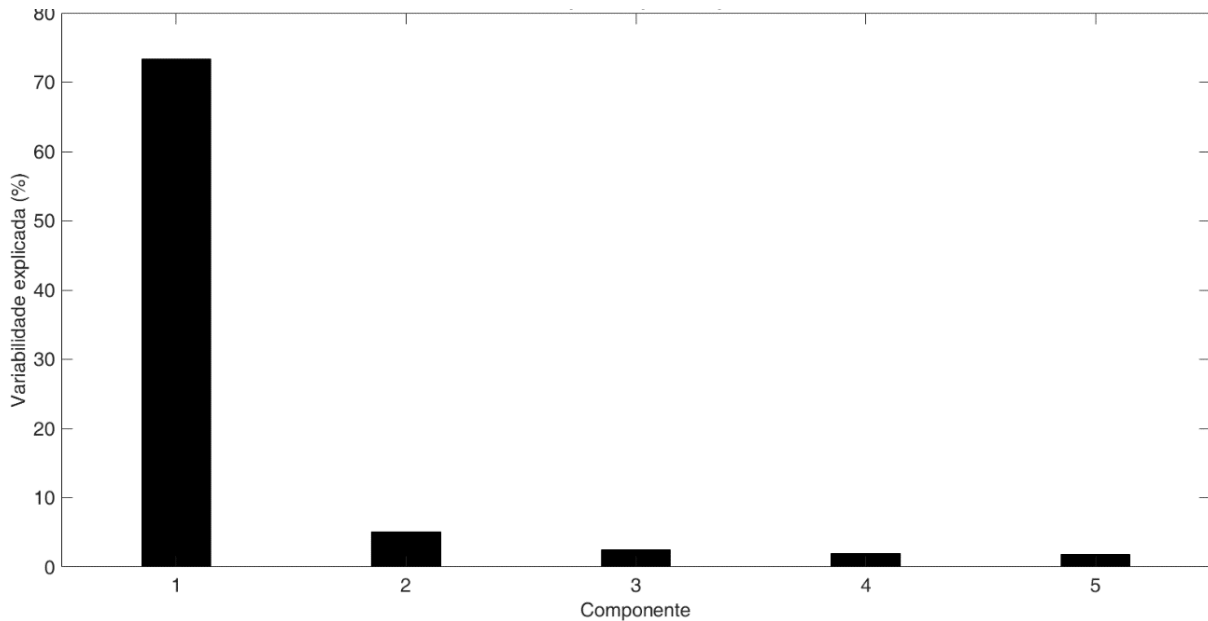
Figura 14: Percentual dos dados originais ao longo de todo o período analisado. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.



2.1.1.1 Temperatura da superfície do mar

Os cinco principais modos de variabilidade da TSM responderam por 84,6% da variabilidade total dos dados, sendo que somente o primeiro modo foi responsável por 73,3% desse total, seguido pelo segundo com 5,1% (Figura 15). Os demais modos não foram considerados porque foram associados a fenômenos físicos de menores escalas espaciais e temporais que não contribuem com os objetivos da análise proposta. Os dois primeiros modos são estatisticamente significantes, de acordo com o teste de significância de North *et al.* (1982).

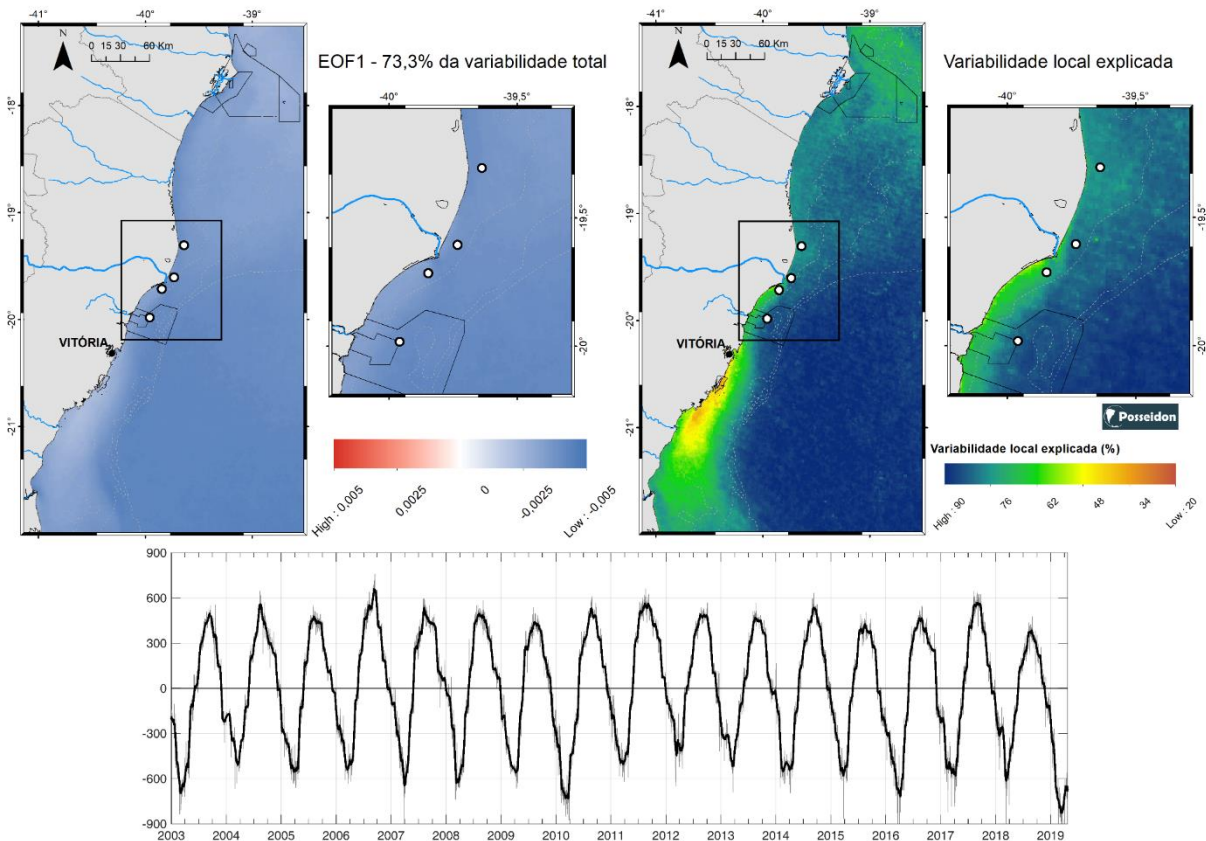
Figura 15: Percentual da variabilidade total dos dados explicada pelos cinco principais modos de variação da TSM.



Pôde-se associar o primeiro modo mostrado na Figura 16 ao ciclo anual de aquecimento e resfriamento da superfície do oceano em decorrência, basicamente, do ciclo do anual do balanço líquido de calor na interface oceano-atmosfera (Ghisolfi *et al.*, 2015), apesar de se observar pequena variação interanual entre os meses de início e fim do aquecimento e do resfriamento.

Apesar de ser responsável por 73,3% da variabilidade total dos dados, o percentual de explicabilidade do primeiro modo não foi homogêneo ao longo da área (Figura 16). Enquanto esse modo de variabilidade foi responsável por aproximadamente 90% da variabilidade da TSM na região oceânica, a porção norte do Banco de Abrolhos e principalmente a área costeira ao sul da foz do Rio Doce teve uma associação menor ao modo, chegando a aproximadamente 20% ao sul da cidade de Vitória. Esse resultado sugere que há a atuação de outras forçantes que determinam processos que afetam a TSM, cuja variabilidade está parcialmente desacoplada do regime de aquecimento e resfriamento anual superficial. A presença de águas mais frias em superfície ao norte do Banco de Abrolhos já foi reportada, por exemplo, por Aguiar *et al.* (2014), da mesma forma que Paloczky *et al.* (2016), por exemplo, descreveu o desenvolvimento de ressurgência costeira na região ao sul da foz do Rio Doce.

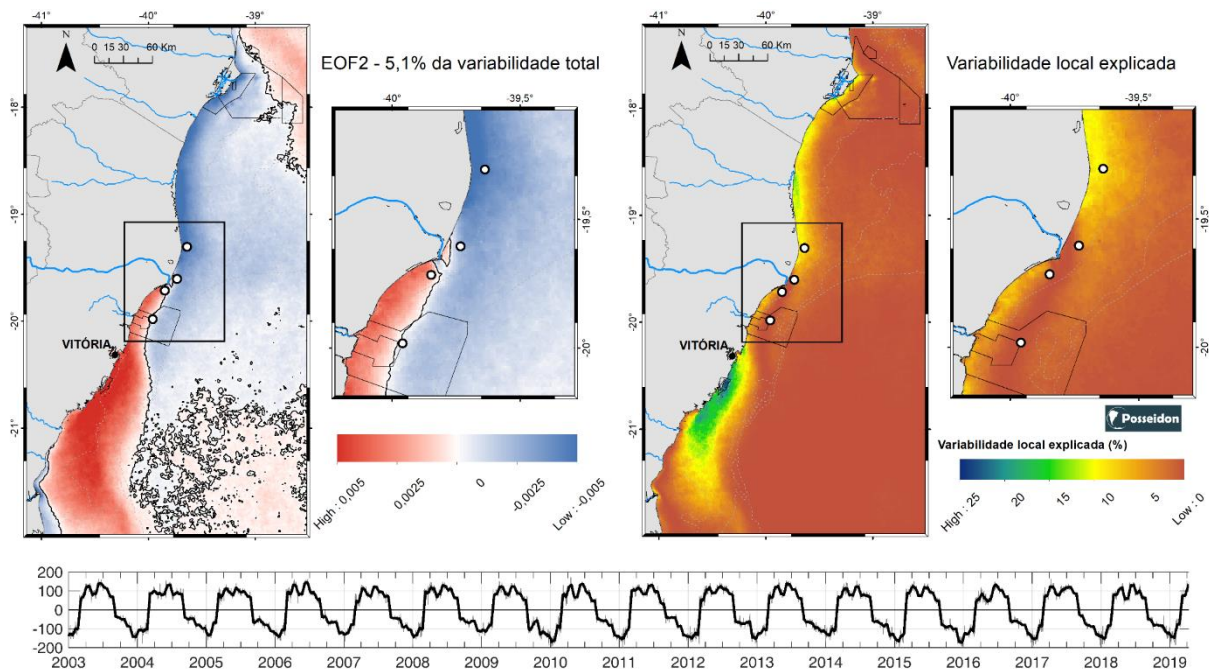
Figura 16: Principal modo de variabilidade da TSM (responsável por 73,3% da variabilidade total dos dados). Nas quatro figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial e o percentual da variabilidade local explicada. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal da primeira componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto).



O segundo modo foi responsável por 5,1 % da variabilidade total dos dados (Figura 17). Com exceção da área oceânica ao sul de 21°S, os valores positivos - em vermelho - correspondem aos relativamente menores valores de variabilidade local explicada na Figura 16. Apesar da baixa representatividade matemática do modo quando comparado ao primeiro, ele tem um importante significado físico relacionado à dinâmica da ressurgência costeira principalmente ao sul da foz do Rio Doce. Nessa região, o segundo modo teve uma variabilidade local explicada entre 10 e 25% e a TSM oscilou de forma desacoplada ao restante da maior parte da área de estudo (valores negativos do campo espacial). Esse padrão indica que existiu uma tendência de resfriamento (aquecimento) da TSM entre os meses de outubro a março, enquanto no restante da área havia a tendência de aquecimento (resfriamento). O comportamento oposto ocorreu no restante dos meses do ano.

O resfriamento local é concordante com o padrão de vento sazonal, quando ventos de nordeste mais frequentes e intensos favorecem o desenvolvimento de ressurgência costeira completa, isto é, com ascensão de água fria na superfície.

Figura 17: Segundo modo de variabilidade da TSM (responsável por 5,1% da variabilidade total dos dados). Nas quatro figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial e o percentual da variabilidade local explicada pela segunda componente da EOF. A isolinha preta no campo espacial da EOF corresponde ao valor zero. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal da segunda componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto). As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.



2.1.1.2 Concentração de clorofila-a

As oscilações espaço-temporais da [chlor-a] são condicionadas por um número maior de fatores com diferentes escalas espaciais e temporais do que a TSM; conseqüentemente, o seu nível de complexidade é maior. A análise desse tipo de variável exclusivamente com EOFs é dificultada em função das limitações matemáticas do método. No atual caso, por exemplo, o oceano sobre a plataforma continental apresentou variâncias da [chlor-a] da ordem de 100 vezes maiores do que o oceano sobre a bacia oceânica. Isso gerou uma tendência de as EOFs enfatizarem as variabilidades costeiras da [chlor-a], em detrimento da região oceânica. Além disso, o aporte continental de diferentes rios com diferentes períodos de cheia em diferentes locais também contribuiu para a redução da representatividade de cada modo. Fatores oceânicos com influência direta sobre [chlor-a], como a ressurgência costeira, atuação de vórtices oceânicos e as oscilações da energia dos trens de ondas que chegaram à região também aumentam a complexidade na separação dos modos de variabilidade da [chlor-a].

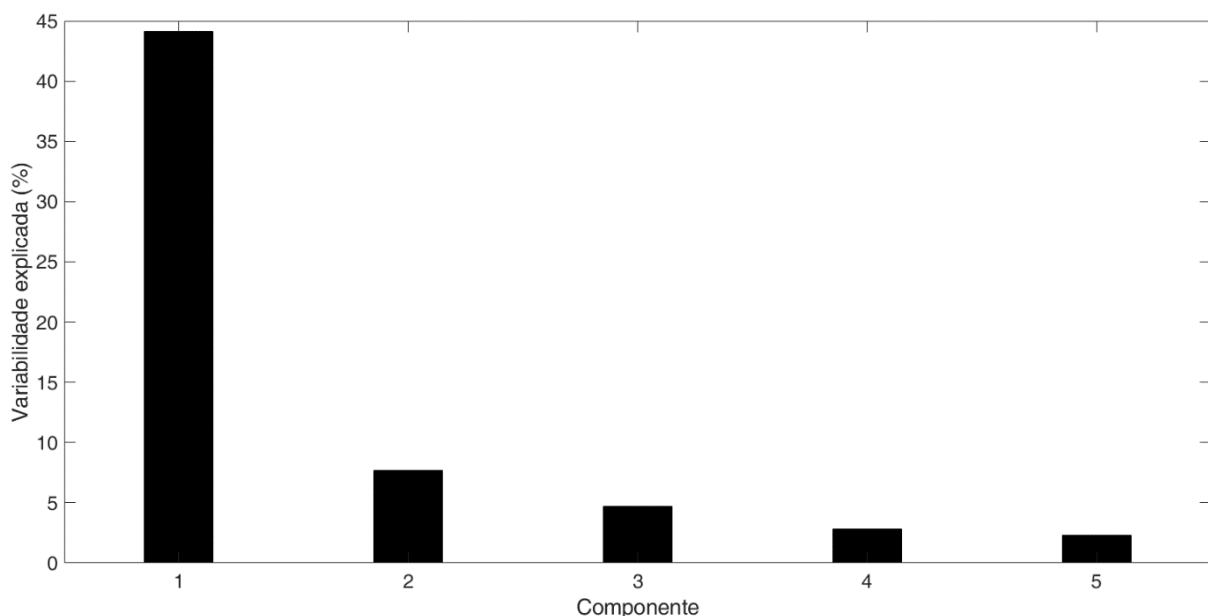
A primeira solução empregada para aumentar a eficiência do método foi a normalização dos dados pelo desvio padrão. Dessa forma, em todos os pontos de amostragem a média foi nula e o desvio padrão unitário (ambos adimensionais). Dessa forma foi eliminada a tendência de sobrestimar a região

costeira, ou seja, as oscilações, independente de localização, estavam em função do desvio padrão local.

O segundo ajuste foi a consideração de um modo de oscilação baseado na soma de outros dois. Apesar dos dados serem separados em EOFs estatisticamente independentes umas das outras, a soma de duas ou mais componentes pode permitir uma melhor interpretação física de fenômenos influenciados por forçantes com frequências variadas que se sobrepõem em diferentes posições no espaço e no tempo.

Os cinco principais modos de variabilidade da [chlor-a] responderam por 61,6% da variabilidade total dos dados, sendo que o primeiro modo foi responsável por 44,1 % desse total, seguido pelo segundo com 7,7% e o terceiro com 4,7% (Figura 18). Os demais modos não foram considerados porque foram associados a fenômenos físicos de menores escalas espaciais e temporais, não contribuindo com os objetivos da análise proposta. Os três primeiros modos são estatisticamente significantes, de acordo com o teste de significância de North *et al.* (1982).

Figura 18: Percentual da variabilidade total dos dados explicada pelos cinco principais modos de variação da [chlor-a].

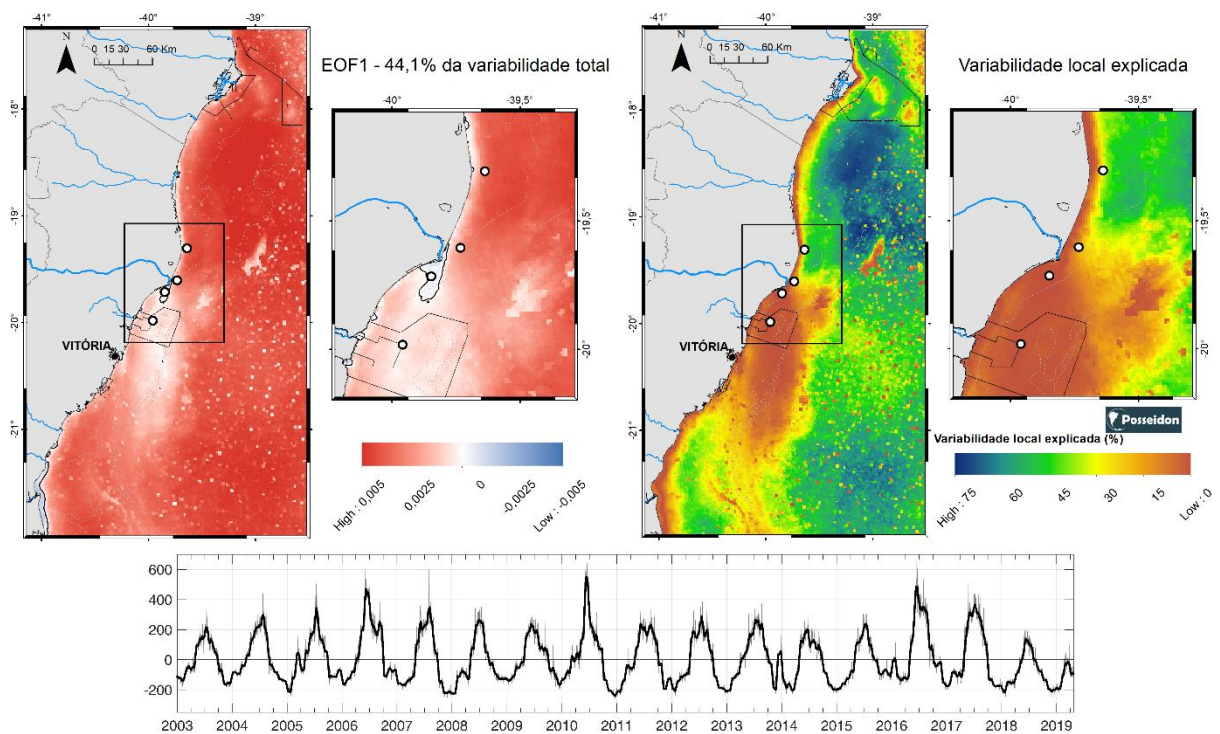


O primeiro modo de oscilação da [chlor-a] apresentou comportamento cíclico anual com a maior parte da área de estudo oscilando em fase no tempo (valores positivos do campo espacial da Figura 19). Nessas regiões houve uma tendência de aumento na [chlor-a] nos meses de outono e inverno, com máximas entre os meses de junho e agosto, e redução nas estações de primavera e verão, com mínimas entre os meses de dezembro e janeiro.

Esse é um comportamento típico de oceanos tropicais, onde o ciclo anual da estratificação térmica vertical da coluna d'água (a primeira EOF da TSM - Figura 16 - pode ser considerada um indicador do ciclo dessa estratificação) tem um importante papel sobre a circulação dos nutrientes aprofundados nos períodos mais frios, sobre a camada superficial e iluminada, a zona fótica, proporcionando uma maior capacidade de suporte ao fitoplâncton (REYNOLDS, 2006). Resultados semelhantes foram

observados na costa brasileira (por exemplo, VALENTIN, 2007; CIOTTI *et al.*, 2010; DELCOURT *et al.*, 2013; GHISOLFI *et al.*, 2015) e em outras regiões tropicais do mundo (por exemplo, DANDONNEAU & GOHIN, 1984; RADENAC & RODIER, 1996; GEORGE *et al.*, 2012; JENA *et al.*, 2013).

Figura 19: Principal modo de variabilidade da [chlor-a] elaborado com dados normalizados (responsável por 61,6% da variabilidade total dos dados). Nas quatro figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial e o percentual da variabilidade local explicada. A isolinha fina preta no campo espacial da EOF corresponde ao valor zero. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal da primeira componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto). As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.



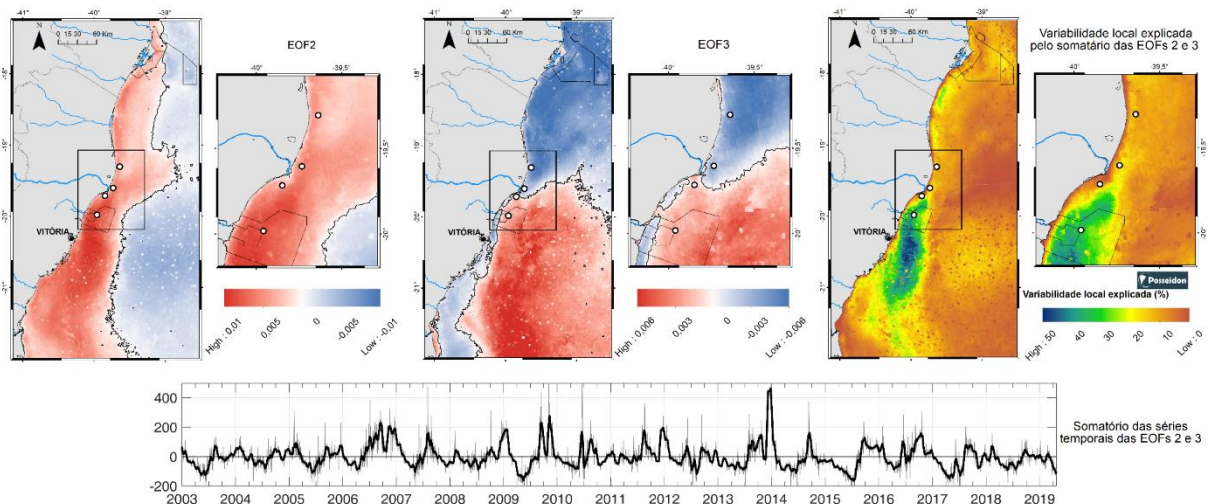
As exceções ao padrão geral descrito previamente foram as regiões associadas às desembocaduras dos rios Paraíba do sul e Doce, que apresentaram padrão de oscilação fora de fase com o restante (valores negativos no campo espacial). Nesse caso, a tendência de incremento na biomassa fitoplanctônica nos meses de primavera e verão é alta ao ponto de, matematicamente, considerar o aumento do outono/inverno como uma redução, quando na verdade ocorrem dois máximos de [chlor-a] nesses locais. Sabe-se que a vazão do Rio Doce é maior nos meses de verão e isso pode ter contribuído para o aumento na [chlor-a] na sua foz e área sob a sua influência e o mesmo pode ter acontecido com o Paraíba do Sul.

A principal diferença entre o comportamento da [chlor-a] nas desembocaduras desses rios foi que a influência do Paraíba do Sul sobre esse parâmetro foi trapeada à costa, tanto para o sul quanto para o norte da foz do rio, adentrando por até seis quilômetros em direção ao mar. Já a área de influência do Rio Doce pôde alcançar mais de 180 km na direção entre sul e sudoeste, quando os valores do campo espacial partiram de um núcleo negativo e com valores maiores (em módulo) na foz do rio e reduziram

(em módulo) de acordo com o afastamento do ponto de origem (região com tonalidade branca do campo espacial da EOF da Figura 19). A variabilidade local explicada pelo modo também ficou limitada nessa região a valores abaixo de 20%.

O segundo modo de variabilidade da [chlor-a] mostrado na Figura 20 representa a soma da segunda e da terceira EOF dessa variável, sendo responsável por 12,4% da variabilidade total dos dados. Assim como ocorreu com a segunda EOF da TSM, apesar de conter uma pequena representatividade matemática em relação a totalidade dos dados, esse modo tem um importante significado físico relacionado ao incremento anual de [chlor-a] nas regiões da plataforma média e externa ao sul da foz do Rio Doce. Mais facilmente observada no mapa de percentual da variabilidade local explicada, essa região representa a área com baixo percentual de variabilidade local explicada do primeiro modo (Figura 19), ou seja, esse resultado permite sugerir a atuação de forçantes restritas a essa região que atuam sobre o desenvolvimento da comunidade fitoplanctônica local.

Figura 20: Modo de variabilidade da [chlor-a] composto pela soma da segunda e da terceira EOF dessa variável (o somatório é responsável por 12,4% da variabilidade total dos dados). Nas seis figuras abaixo é mostrada a distribuição espacial das EOFs 2 e 3 e o percentual da variabilidade local explicada pelo somatório dessas duas componentes. A isolinha fina preta nos campos espaciais das EOFs corresponde ao valor zero. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. Na figura inferior é apresentada a distribuição temporal do somatório da segunda e terceira componente principal com os dados brutos (cinza) e a série temporal filtrada com média móvel de janela de 15 dias (preto). As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.

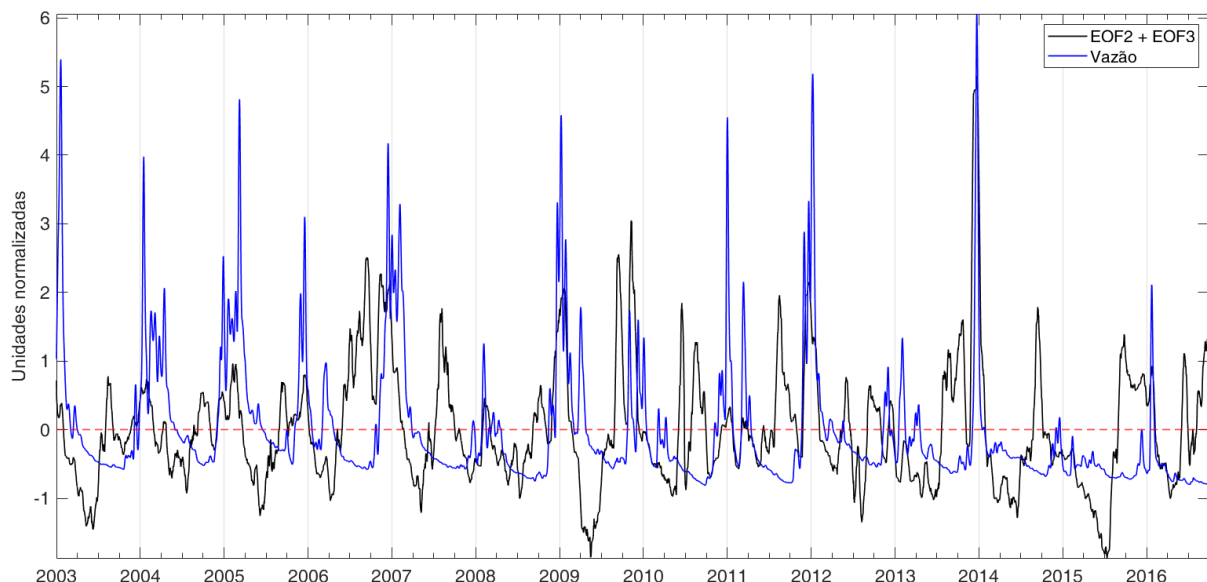


De maneira geral, a série temporal dessa componente apresentou uma tendência de manter valores positivos entre o início e o final dos anos, e os valores negativos no meio do ano. Entretanto, esse padrão não se manteve, necessariamente, constante ao longo de todos os anos analisados. De qualquer forma, o produto de um valor positivo da série temporal pelo valor de um ponto do campo espacial na área de maior variabilidade local explicada resulta em uma anomalia positiva na [chlor-a]. Assim, confirma-se a existência do segundo máximo temporal de [chlor-a] entre a primavera e o verão nessa região da Figura 20.

É interessante notar que a porção mais próxima à costa na região ao sul da foz do Rio Doce tem comportamento distinto daquela contígua *offshore*, sugerindo que durante o período de primavera-verão seja possível identificar duas áreas sob influência de processos distintos: a ressurgência costeira com afloramento de água fria e uma área com influência da descarga continental.

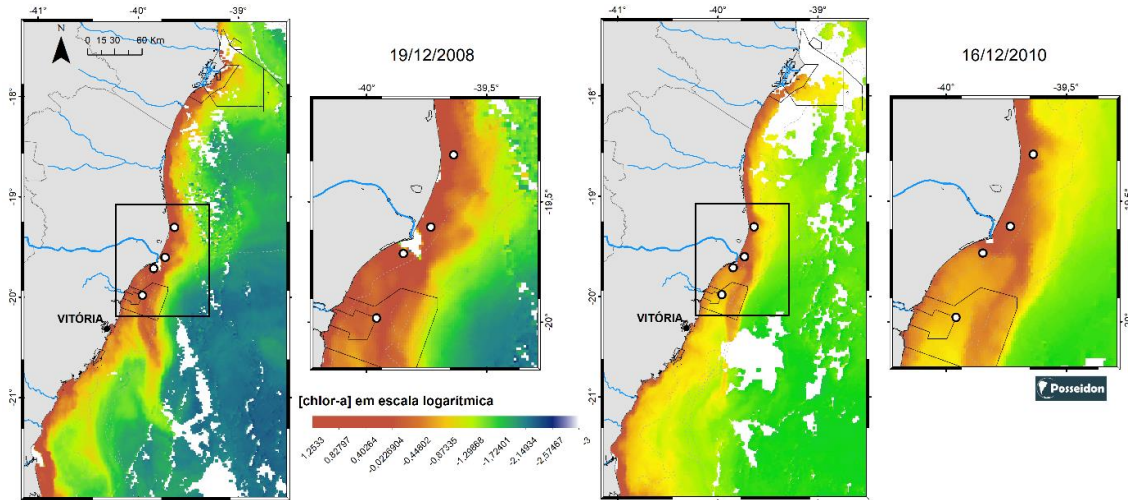
O aumento da vazão fluvial do Rio Doce nos meses de verão pode ter sido um importante favorecedor para o aumento na [chlor-a] ao sul da sua foz. Na maior parte do tempo entre o fim da primavera e o verão o vento local predominante é do sentido entre o nordeste e o norte, o que favoreceria o deslocamento da pluma do rio para a direção entre o sudoeste e o sul, tornando essa região mais rica em nutrientes e, conseqüentemente, aumentando a capacidade de suporte ao fitoplâncton e favorecendo o desenvolvimento de um segundo máximo de [chlor-a]. Essa relação pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21: Séries temporais normalizadas e alisadas por meio de média móvel com janela de 15 dias da vazão do Rio Doce e do somatório das EOFs 2 e 3 da [chlor-a].



A comparação entre a série temporal normalizada pelo desvio padrão da vazão do Rio Doce e do somatório da segunda com a terceira EOF da [chlor-a] entre janeiro de 2003 e setembro de 2016 mostrou que todos os picos de vazão ocorreram entre os meses de novembro e janeiro. Igualmente, durante 55% do tempo quando a vazão estava acima da média (acima de zero), a soma das EOFs 2 e 3 também era, ou seja, o aumento da vazão do rio nos meses de primavera e verão pode ser um, ou até, o principal gatilho para o desenvolvimento do segundo máximo de [chlor-a]. Nota-se pelos exemplos apresentados na Figura 22 que a área associada com o aumento da [chlor-a] ao sul da foz do Rio Doce se desenvolve como meandramentos de filamentos de água provenientes da desembocadura do rio.

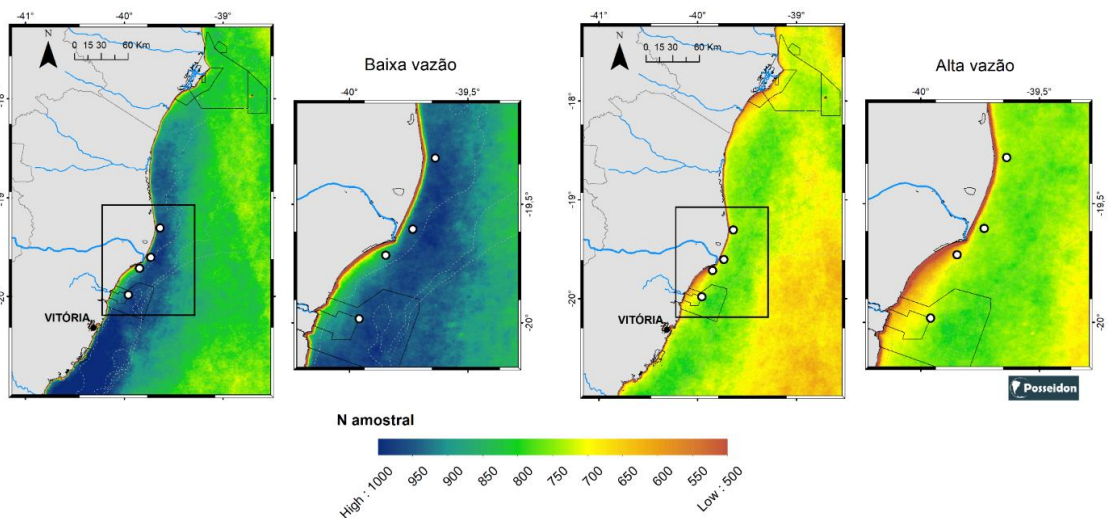
Figura 22: Exemplificações dos processos de incremento na [chlor-a] (mg/m^3) ao sul da foz do Rio Doce em momentos de vazão acima média. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros. As áreas brancas representam nuvens.



2.1.2 Distribuição de recorrência de plumas de turbidez superficial

Mapas de turbidez superficial foram estimados para o período de 01 de janeiro de 2003 a 24 de abril de 2019. Conforme mencionado anteriormente, a presença de nuvens pode reduzir de forma considerável a quantidade de dados válidos na análise, pois impedem que a radiação refletida pelos alvos superficiais chegue ao sensor do satélite. Diferentemente do procedimento realizado na análise via EOFs, as ausências de dados não foram preenchidas com valores climatológicos e a Figura 23 mostra a distribuição do n amostral de dados válidos para cada pixel para o que se denominou períodos de alta e baixa vazão.

Figura 23: Mapas de distribuição do n amostral dos dados de turbidez para os períodos de baixa e alta vazão do Rio Doce. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.



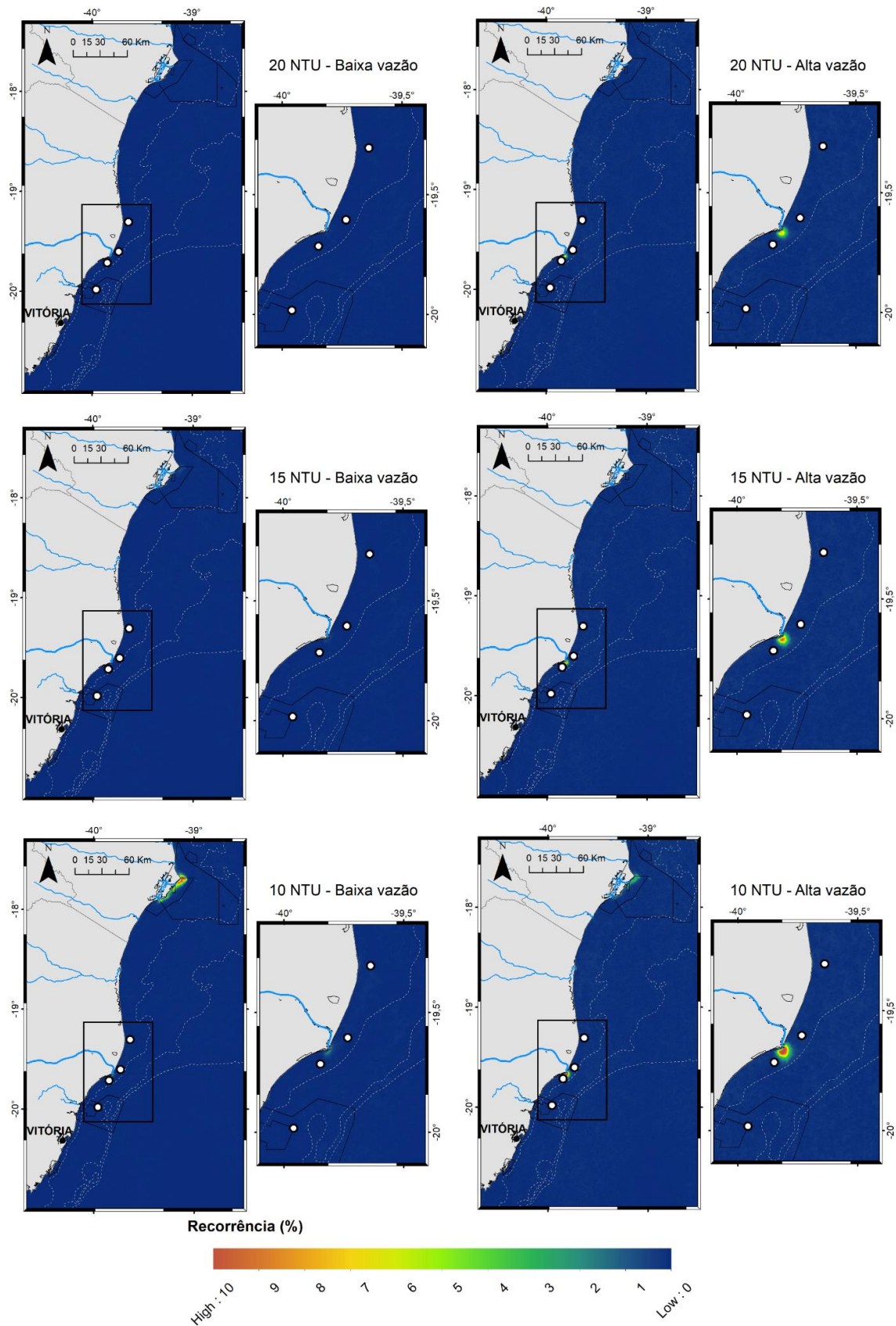
A distinção entre altas e baixas vazões seguiu os valores propostos por Oliveira e Quaresma (2017). Dessa forma, alta vazão foi considerada como vazão maior do que $646 \text{ m}^3/\text{s}$ e baixa vazão como valores menores que $459,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Nesta análise, os mapas de turbidez associados a valores de vazão considerados normais foram descartados. Durante a baixa vazão foram amostrados entre 900 e 1000 dados por ponto amostral próximo à foz do Rio Doce e na alta vazão essa quantidade foi reduzida para entre 650 e 850 dados por ponto amostral na mesma região. Vale salientar que os três primeiros pontos amostrais partindo da costa no sentido oceano não foram amostrados devido a essa ser uma região de difícil quantificação dos dados por parte do satélite.

Mapas de distribuição espacial de turbidez superficial foram construídos para valores maiores que 1, 2, 5, 10, 15 e superiores a 20 NTU. As três primeiras concentrações foram denominadas arbitrariamente de baixa turbidez e as três últimas de alta turbidez. Em todos os mapas construídos, o valor de 1% de recorrência foi o limiar adotado como indicador da área de presença de pluma de turbidez para cada uma das concentrações adotadas, excluindo-se os eventos extremos e esporádicos.

Independentemente da vazão, plumas superficiais com turbidez acima de 15 NTU somente foram identificadas associadas à descarga do Rio Doce (Figura 24). Além disso, nos períodos de alta vazão do Rio Doce as áreas de dispersão e os percentuais de recorrência das plumas superficiais de alta turbidez foram maiores do que durante a baixa vazão. Em plumas superficiais com turbidez acima de 20 NTU, o campo de distribuição de recorrência maior que 1% do tempo amostrado apresentou distribuição radial partindo da foz do Rio Doce, com diâmetro aproximado de 6,0 km. Reduzindo o limiar mínimo de turbidez para 15 NTU, o diâmetro da área de recorrência de pelo menos 1% do tempo amostrado aumentou para 7,5 km.

Para valores de turbidez entre 10 e 14 NTU tanto o Rio Doce quanto o Caravelas foram os maiores agentes indutores de alta turbidez superficial na região avaliada, independentemente da vazão. Aparentemente durante o período de baixa vazão do Rio Doce a pluma de turbidez associada ao Rio Caravelas foi maior, potencialmente refletindo uma modificação no padrão de chuvas na região. Especificamente durante a baixa vazão, a área de dispersão com pelo menos 1% de recorrência do tempo amostrado da pluma de turbidez superficial associada à desembocadura do Rio Doce teve formato elipsoidal com eixo perpendicular à costa de aproximadamente 2 km e paralelo à costa com aproximadamente 5,5 km. Já na alta vazão essa área apresentou formato semicircular com diâmetro de 8,5 km.

Figura 24: Mapas de distribuição do percentual de recorrência de plumas de alta turbidez. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.



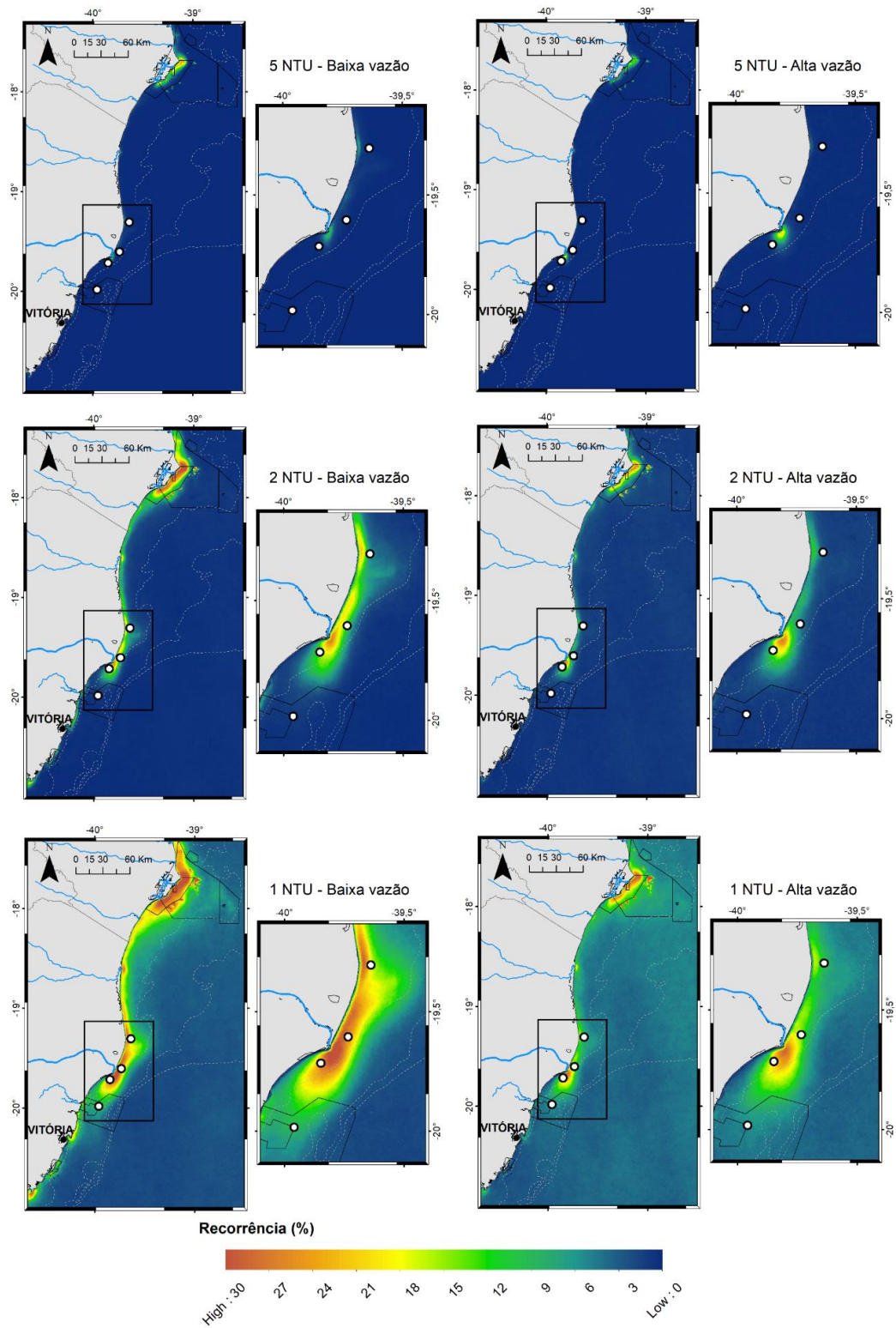
Com relação a distribuição espacial e temporal das plumas superficiais de baixa turbidez, a dinâmica dessas feições apresentou comportamento diferente quando comparado à dinâmica das plumas superficiais de alta turbidez. De maneira geral, recorrências maiores do que 1% foram quantificadas na maior parte do litoral (Figura 25), o que permitiu considerar a possível influência das ondas sobre a ressuspensão do sedimento local, principalmente nos períodos de baixa vazão, que normalmente ocorrem em simultaneidade com o aumento da energia das ondas incidentes entre as estações do outono e do inverno).

A recorrência de plumas superficiais com no mínimo 5 NTU em pelo menos 1% do tempo amostrado ocorreu tanto nas desembocaduras dos rios Doce e Caravelas quanto para outros pontos isolado ao longo da costa, por exemplo, Figura 25 – Baixa vazão – 5 NTU – região de Degredo. Novamente, a área de recorrência maior que 1% do tempo amostrado das plumas superficiais de turbidez na foz do Rio Doce foi maior durante a alta vazão do rio. Nesse período o diâmetro da feição alcançou 16,5 km, reduzindo para 8,0 km na baixa vazão. Todavia, principalmente durante as amostragens na baixa vazão, também foi possível observar a manutenção de valores de recorrência maiores do que 1% do tempo amostrado pela maior parte da região trapeada à costa entre as desembocaduras dos rios Doce e Caravelas, com núcleos de maiores recorrências em regiões de desembocaduras de pequenos rios locais (nem todos os pequenos rios locais estão destacados nos mapas da Figura 25). Esse comportamento também foi observado em regiões litorâneas ao norte e ao sul da cidade de Vitória. Contudo, essas feições são mais facilmente observadas nos mapas de recorrência das plumas superficiais com turbidez mínimas de 2 e 1 NTU.

Quando se considera os cenários com valores de turbidez menor que 5 NTU (mapas de 1 e 2 NTU – Figura 25) a área destacada com recorrência mínima acima de 1% do tempo amostrado resultou tanto da descarga continental quanto de processos de ressuspensão por eventos mais energéticos. Isso se ratifica uma vez que as áreas de percentuais de recorrência de plumas de turbidez superficial em momentos de baixa vazão foram maiores do que aqueles nos períodos de alta vazão. Isso se justifica porque nos períodos de baixa vazão (durante o outono e inverno) foi quando houve a maior incidência de ondas com maior nível energético, em média, que aumentam a ressuspensão do sedimento local e tornam mais difícil a deposição de sedimentos exportados pelos rios. Outro ponto a se destacar é que as áreas com maiores recorrências de plumas de turbidez superficial acima de 2 NTU estão mais associadas as descargas dos rios, mas ocorrem ao longo de toda a costa entre o Rio Doce e o Rio Caravelas durante períodos de baixa vazão.

Duas feições peculiares se destacaram na distribuição da recorrência de plumas de turbidez superficial acima de 1 NTU (Figura 25). A primeira se localizou entre os dois pontos do fundeio mais ao norte, principalmente durante o período de baixa vazão, isto é, com predominância de ventos provenientes da direção entre o sul e o sudeste e da ação de ondas com maiores alturas significativas, ambos em média. Naquela região, as plumas de turbidez superficial tenderam a se prolongar para leste-nordeste seguindo a isóbata de 25 m. A razão desse comportamento ainda está sob análise pelo nosso grupo.

Figura 25: Mapas de distribuição do percentual de recorrência de plumas de baixa turbidez. Os círculos brancos representam as posições dos fundeios. As isóbatas representam as profundidades de 25, 50 e 200 metros.



A segunda feição ocorreu ao sul da foz do Rio Doce. Posicionando-se entre os dois pontos de fundeio mais ao sul há uma feição que se desloca entre as direções sul e sudoeste, afastada da costa, com os

maiores valores de recorrência associados às isóbatas mais profundas. Essa foi a única região com mais de 40 metros de profundidade onde houve recorrências de plumas de turbidez superficial naqueles níveis. Como essa feição se encontrava conectada à foz do Rio Doce, isso sugere que uma das direções de propagação da pluma de turbidez superficial aportada por ele seja para sul/sudoeste, alcançando a quebra da plataforma continental (resultado semelhante ao que foi encontrado nas EOFs de concentração de clorofila-*a* – tópico 2.1.1.2). Em períodos de alta vazão do Rio Doce, o ponto do fundeio mais ao sul, por exemplo, apresentou recorrência de 6% do tempo amostrado com a presença de plumas de turbidez superficial com pelo menos 1 NTU e de 0,7% do tempo com plumas de 2 NTU, enquanto que durante a baixa vazão a recorrência foi de 9% para turbidez de 1 NTU e 1% para valores de turbidez de 2 NTU. Esse ponto se localiza em uma profundidade de 44 metros e a 16 km da praia mais próxima, o que reduz as chances dessa turbidez ter sido induzida pela ressuspensão do sedimento local.

Na metodologia utilizada para a quantificação da turbidez superficial se obteve, basicamente, a resposta do alvo no primeiro metro da coluna de água. Por isso, a dinâmica dessa variável em profundidades maiores pode ter um comportamento distinto do apresentado nesta seção/relatório e o entendimento das suas variações espaciais e temporais demanda o emprego de outras técnicas. Mas, somente com a avaliação da dinâmica superficial da turbidez associada à presença de sedimentos em suspensão e da dinâmica superficial da concentração de clorofila-*a* – esta segunda variável descrita no tópico 2.1.1.2 –, pôde-se concluir que a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas e o Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz são passivos de serem influenciados direta e indiretamente por alterações na composição físico-química da água do Rio Doce. Porém a quantificação dessas influências demandaria o emprego de um conjunto maior de técnicas.

2.2 PERFILAGEM

A apresentação dos dados coletados via perfilagem da coluna d'água foram subdivididos em dados pré-monitoramento (período entre 2015 e 2017) e aqueles obtidos durante o PMBA (entre outubro de 2018 a setembro de 2019).

2.2.1 Resultados Pré-Monitoramento

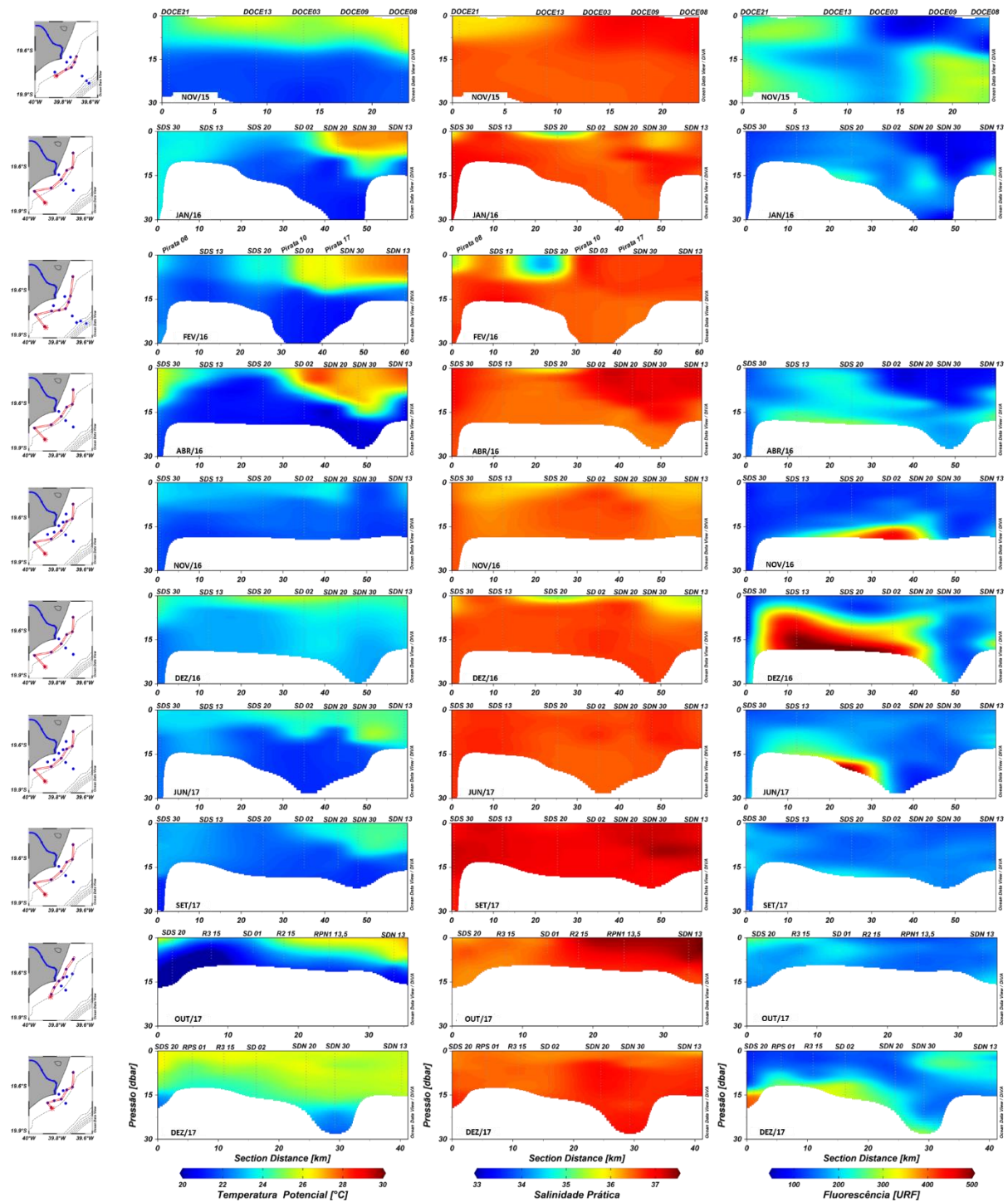
Os resultados pré-monitoramento foram coletados logo após a chegada da lama de rejeitos ao mar oriunda do rompimento da barragem de Samarco em Mariana no final de novembro de 2015 até dezembro de 2017 (Tabela 4). Em todas as campanhas foram coletados dados termohalinos e de fluorescência, exceto na campanha realizada em fevereiro de 2016 a bordo do Navio oceanográfico Antares, quando não foi coletado dados de fluorescência.

Tabela 4: Informações gerais sobre as campanhas realizadas na região marinha da foz do Rio Doce e adjacências entre 26 de novembro de 2015 a 11 de dezembro de 2017.

Campanha	Embarcação	Período	Número de Estações coletadas
Novembro/2015	NOc. Vital de Oliveira	26 a 29/11/15	13
Janeiro/2016	N. de Pesquisa Soloncy Moura	27/01 a 02/02/16	21
Fevereiro/2016	NOc. Antares	16 a 18/02/16	14
Abril/2016	N. de Pesquisa Soloncy Moura	19 a 27/04/16	27
Novembro/2016	Barco Abaeté	23 a 26/11/16	18
Dezembro/2016	Barco Abaeté	06 a 10/12/16	16
Junho/2017	Barco Abaeté	05 a 07/06/17	16
Setembro/2017	Barco Abaeté	26 a 30/09/17	19
Outubro/2017	Lancha	24/10/17	11
Dezembro/2017	Lancha	11/12/17	11

Os resultados obtidos nas diversas campanhas realizadas *in situ* evidenciaram o processo de ressurgência costeira que se desenvolveu na região (Figura 26). Em algumas campanhas, e.g. Fevereiro/2016, Abril/2016 e Setembro/2017, a presença de água relativamente mais fria atingiu a superfície do oceano evidenciando um processo de ressurgência completa nos pontos ao sul da foz do Rio Doce. Em outras campanhas a coluna de água apresentou maior estratificação com uma diferença entre a superfície e fundo de até 8 °C (Abril/2016), principalmente nos pontos localizados a norte da foz do Rio Doce. Os altos valores de temperatura e maior estratificação da coluna de água esteve intimamente ligada ao balanço do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera. Nas distintas campanhas a bordo do barco Abaeté (Novembro/2016, Dezembro/2016, Junho/2017 e Setembro/2017) o oceano não apresentou uma forte estratificação. Entretanto, ainda assim foi possível identificar a presença de água relativamente mais fria sobre a plataforma continental chegando a uma ressurgência completa na campanha Setembro/2017. Na maioria das campanhas realizadas não ficou evidente a presença de uma água menos salina sobre a plataforma continental, exceto na campanha Fevereiro/2016 quando essa água ocorreu, principalmente, nos pontos localizados ao sul da foz do Rio Doce da mesma forma como observado nas campanhas Janeiro/2016 e Dezembro/2016 (Figura 26). As maiores concentrações de fluorescência estiveram associadas à presença de água relativamente mais fria oriunda do processo de ressurgência, em geral na porção inferior da coluna de água (campanhas Dezembro/2016, Junho/2017 e Dezembro/2017). As campanhas nas quais a água fria estava ocupando toda a coluna de água, a fluorescência se apresentou em menores concentrações e distribuídas de forma homogênea verticalmente (Janeiro/2016, Abril/2016, Setembro/2017 e Outubro/2017) (Figura 26).

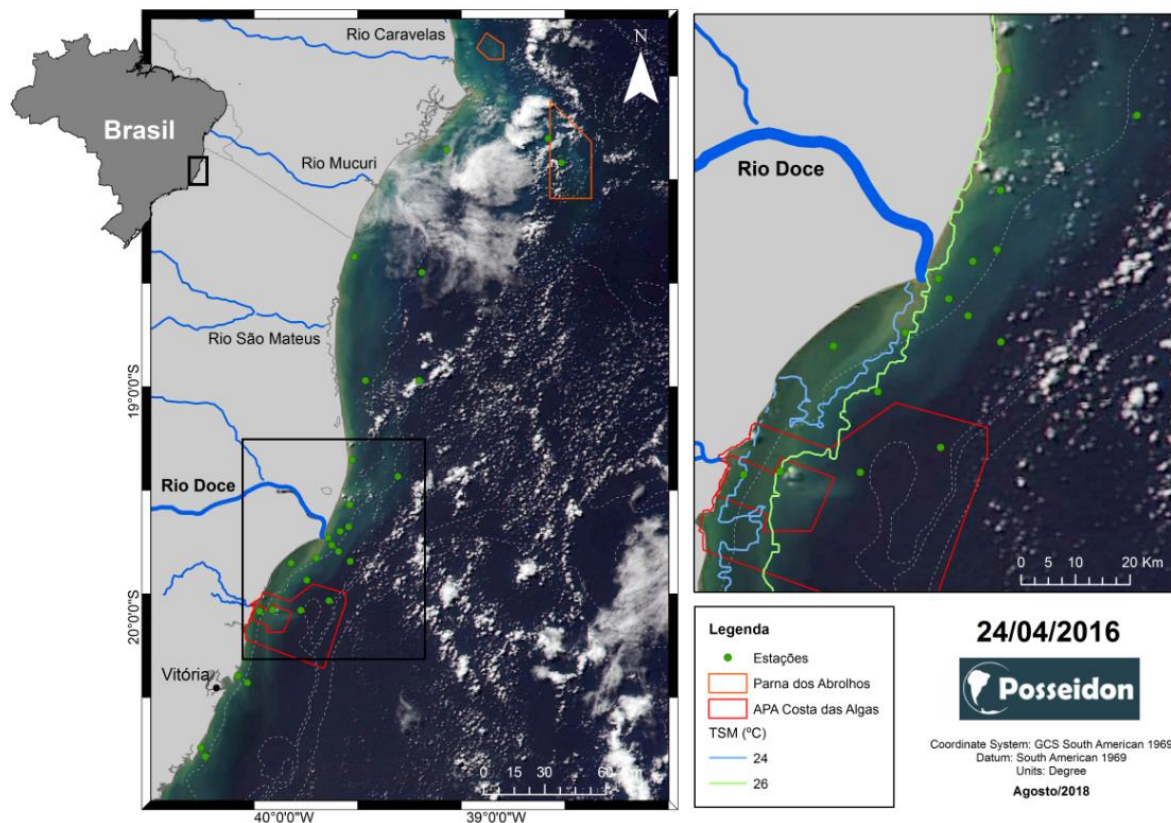
Figura 26: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) (esquerda), Salinidade Prática (meio) e Fluorescência (URF) (direita) em um transecto paralelo à costa nos pontos próximos à foz do Rio Doce nos períodos entre novembro/2015 e dezembro/2017. As linhas cinzas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. O *subplot* e as áreas em branco indicam a ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa à esquerda, não em escala real.



A dispersão da água menos salina e o transporte superficial de sedimento foi dependente da atuação de vento na região da foz do Rio Doce e a vazão do rio no período de coleta. No caso da campanha

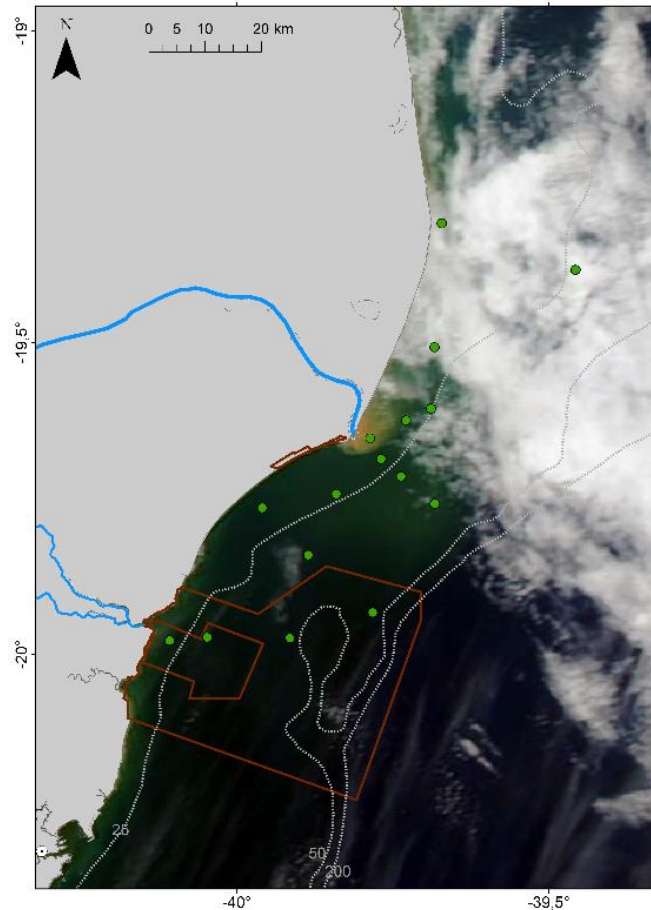
Abril/2016 a presença da água menos salina (< 35) ficou restrita ao primeiro ponto ao sul da desembocadura do rio (SDS 20). Nesse período o transporte de sedimento estava sob a influência de ventos do quadrante norte, porém com um cenário de baixa vazão do Rio Doce (246,86 m³/s) e resultaram em uma menor abrangência superficial desse material sobre a plataforma continental (Figura 27).

Figura 27: Imagem da cor verdadeira (VIIRS/Suomi NPP) com as isotermas provenientes do sensor Terra/MODIS do dia 24 de abril de 2016. Os pontos verdes identificam as estações amostradas durante a campanha realizada pela UFES e o ICMbio a bordo do navio Soloncy Moura. As isóbatas representam 25 m, 50 m, 100 m e 1000 m de profundidade.



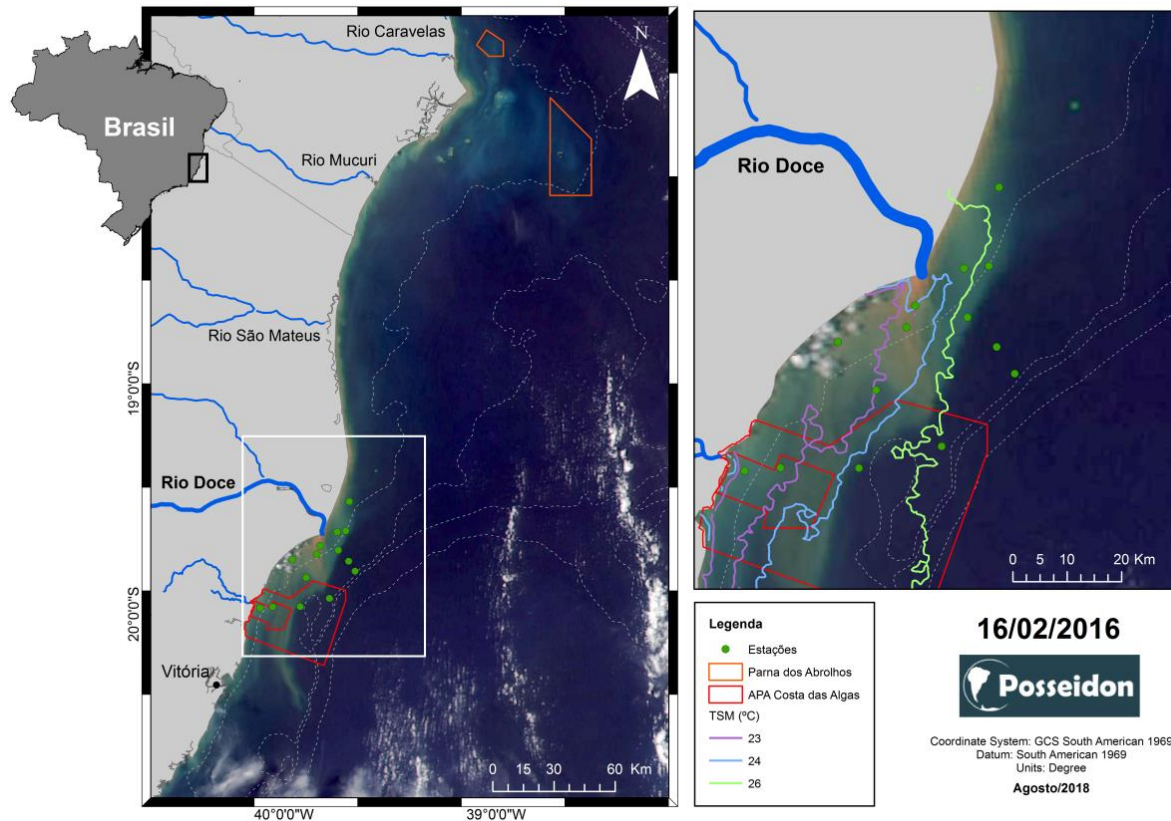
Apesar de terem sido isolados e em pequeno número, cenários caracterizados pela atuação de ventos sul associados às entradas de frentes frias foram identificados no período de coletas de dados *in situ* e provocaram modificações no padrão de transporte de sedimento superficial oriundo da descarga do Rio Doce resultando no transporte desse material para norte. Esse comportamento pôde ser observado na campanha Abaeté 2, quando foi identificado uma água menos salina nos pontos a norte da foz do Rio Doce e pela imagem da cor verdadeira do dia 07 de dezembro de 2016 (Figura 28).

Figura 28: Imagem da cor verdadeira provenientes do sensor Aqua/MODIS do dia 07 de dezembro de 2016. Os pontos verdes identificam as estações amostradas durante a campanha realizada pela UFES a bordo do barco Abaeté. As isóbatas representam 25 m, 50 m e 200 m de profundidade.



Em fevereiro, a forte influência de água relativamente mais fria ($< 24\text{ }^{\circ}\text{C}$) juntamente com a alta vazão do Rio Doce resultou em um comportamento distinto sobre a plataforma continental. A água menos salina ficou confinada na primeira camada do oceano e chegou a formar um bolsão na porção onde a água fria não alcançou (SDS 20). Nesse período, a alta vazão do rio resultou em uma descarga maior de sedimento sobre a plataforma continental e pôde ser observada ao sul da foz e descolada da costa com maior concentração de material contornando a isoterma de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 29). O maior transporte de sedimento ao sul da desembocadura do Rio Doce está diretamente relacionado à atuação dos ventos do quadrante norte e ao aumento da tensão de cisalhamento do vento nesse período permitindo um alcance maior desse material superficialmente.

Figura 29: Imagem da cor verdadeira (MODIS/Aqua) do dia 16 de fevereiro de 2016. As linhas coloridas representam as isotermas provenientes do sensor Aqua/MODIS. Os pontos verdes identificam as estações amostradas durante a campanha realizada a bordo do navio oceanográfico Antares (Marinha do Brasil). As isóbatas representam 25 m, 50 m, 100 m e 1000 m de profundidade.



2.2.2 Resultados do PMBA

Os resultados de perfilagem foram divididos em sub-regiões de acordo com as porções amostradas e seguem na seguinte ordem: Região Sul (Guarapari e Vitória – estações denominadas GUA e VIX), APA Costa das Algas e RVS Santa Cruz (CA), Foz do Rio Doce (SDS – porção sul, SD – transecto perpendicular e SDN – porção norte), Região Norte (Degredo, Barra Nova e Itaúnas – DEG, BN e ITA) e Região do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (ABR).

Uma forma de se visualizar conjuntamente o padrão espaço-temporal das variáveis amostradas é apresentada na Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34 que mostram a distribuição da temperatura potencial, salinidade prática, turbidez, fluorescência e oxigênio dissolvido, respectivamente, durante as campanhas (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.

Figura 30: Seções de Temperatura potencial (°C) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.

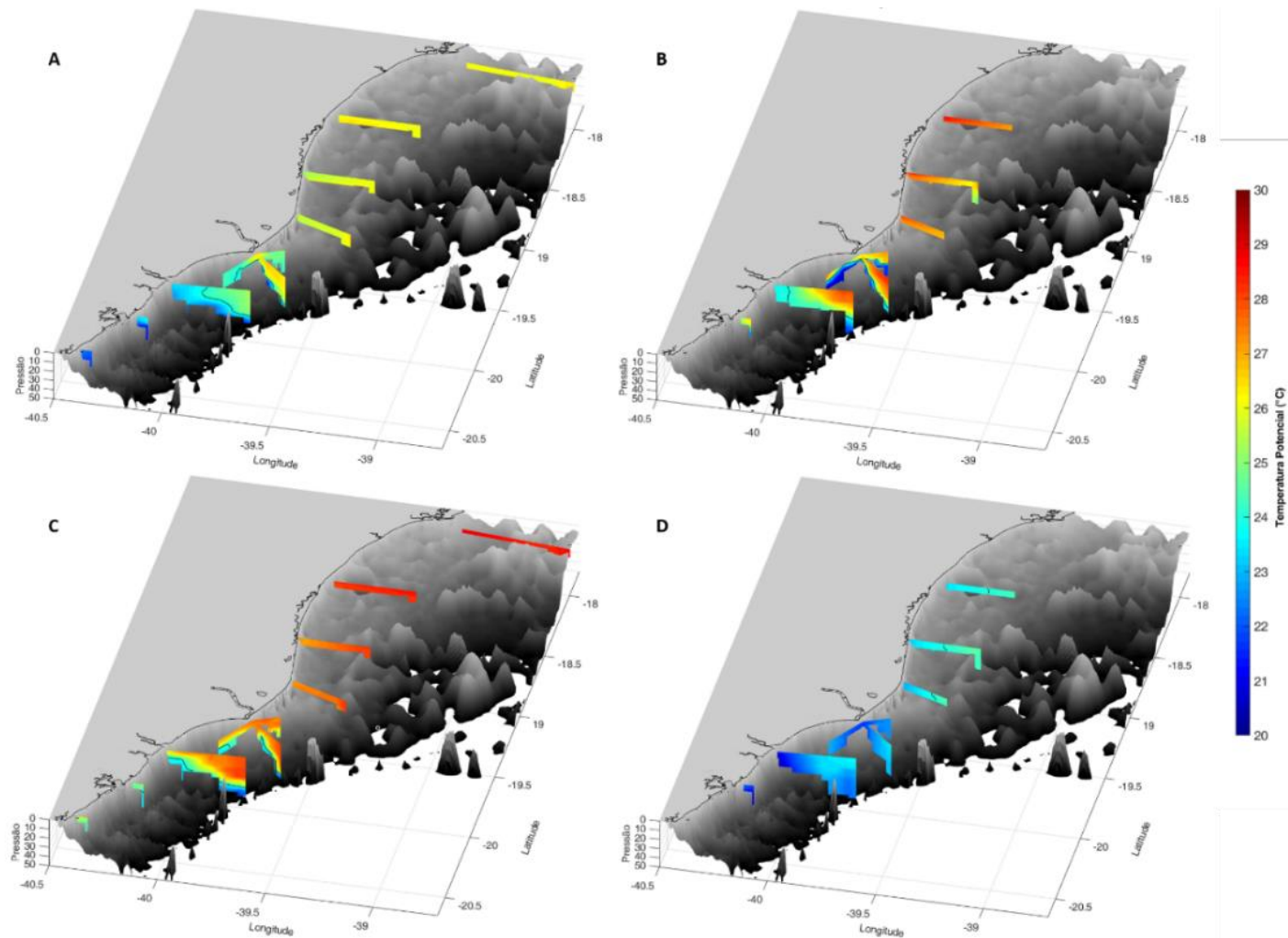


Figura 31: Seções de Salinidade Prática nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.

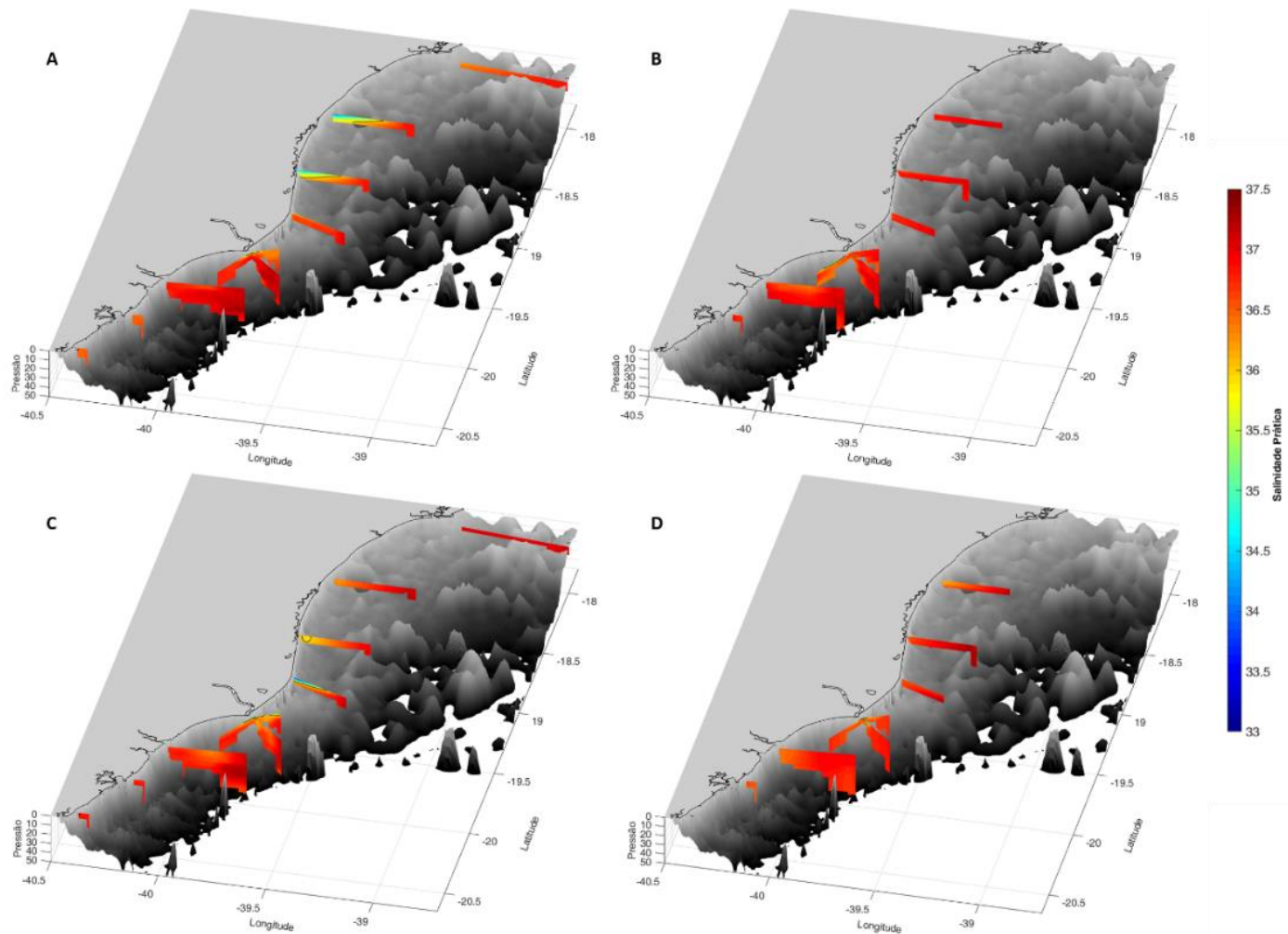


Figura 32: Seções de Turbidez (NTU) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.

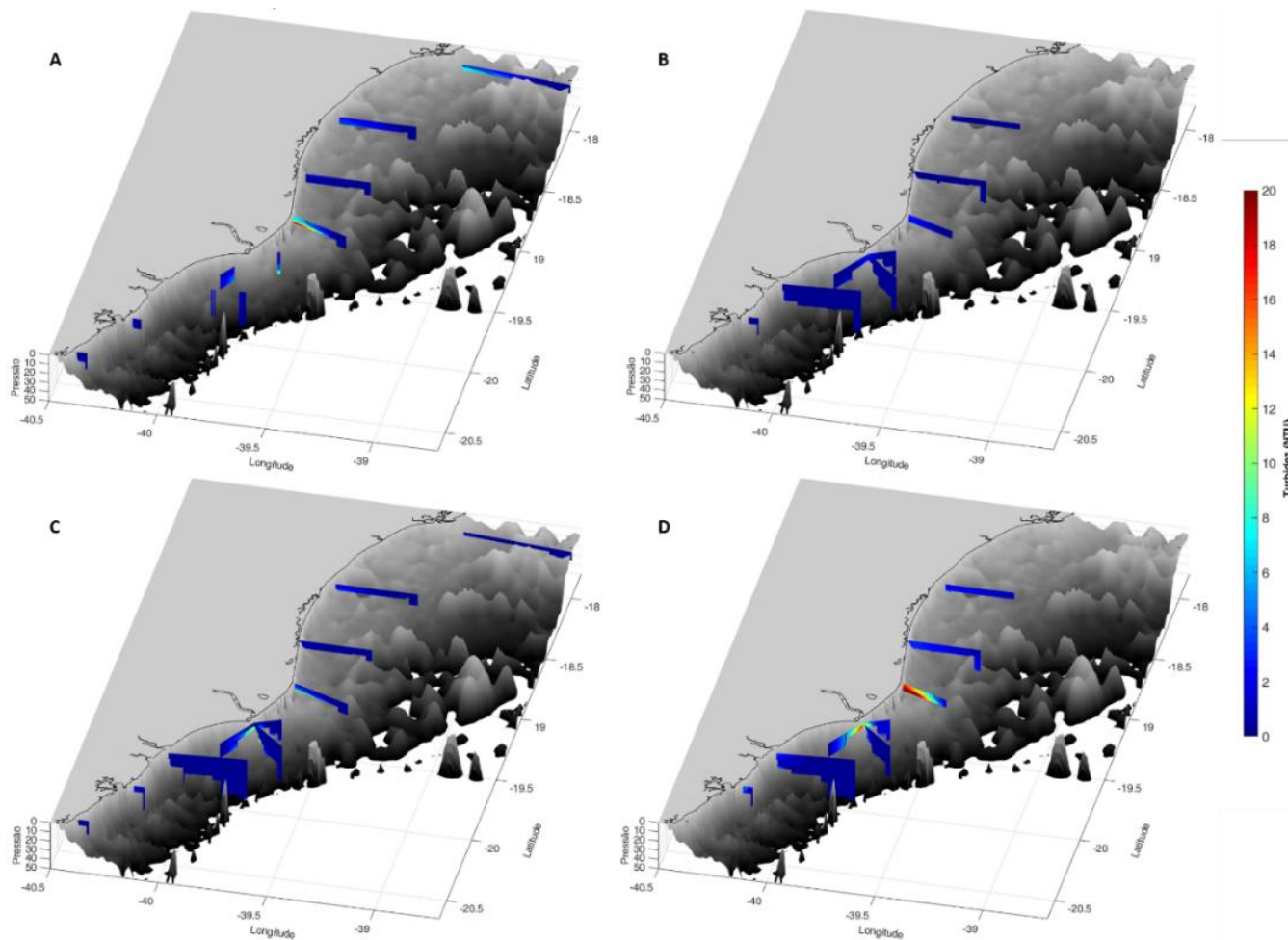


Figura 33: Seções de Fluorescência (mg/m^3) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.

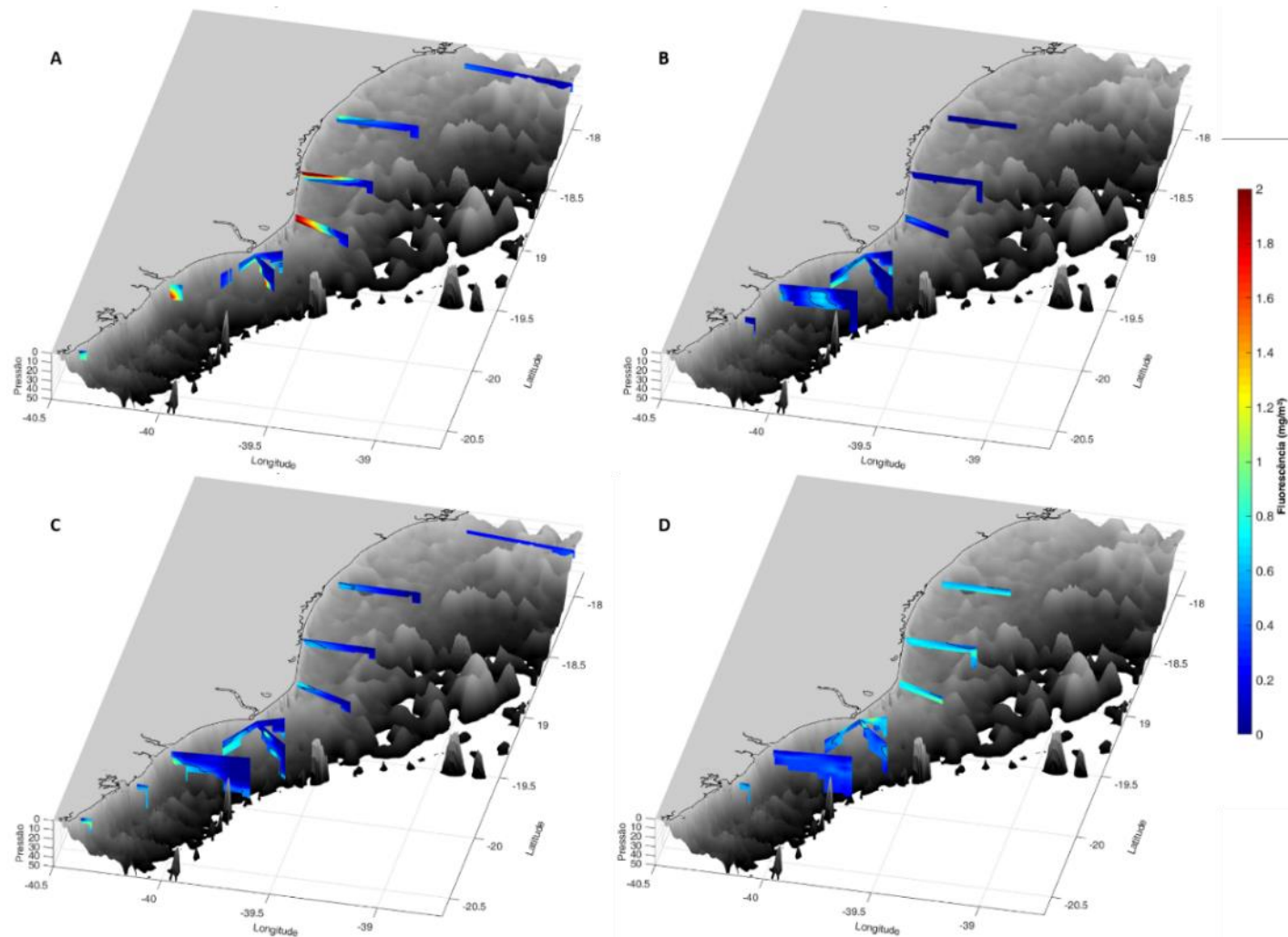
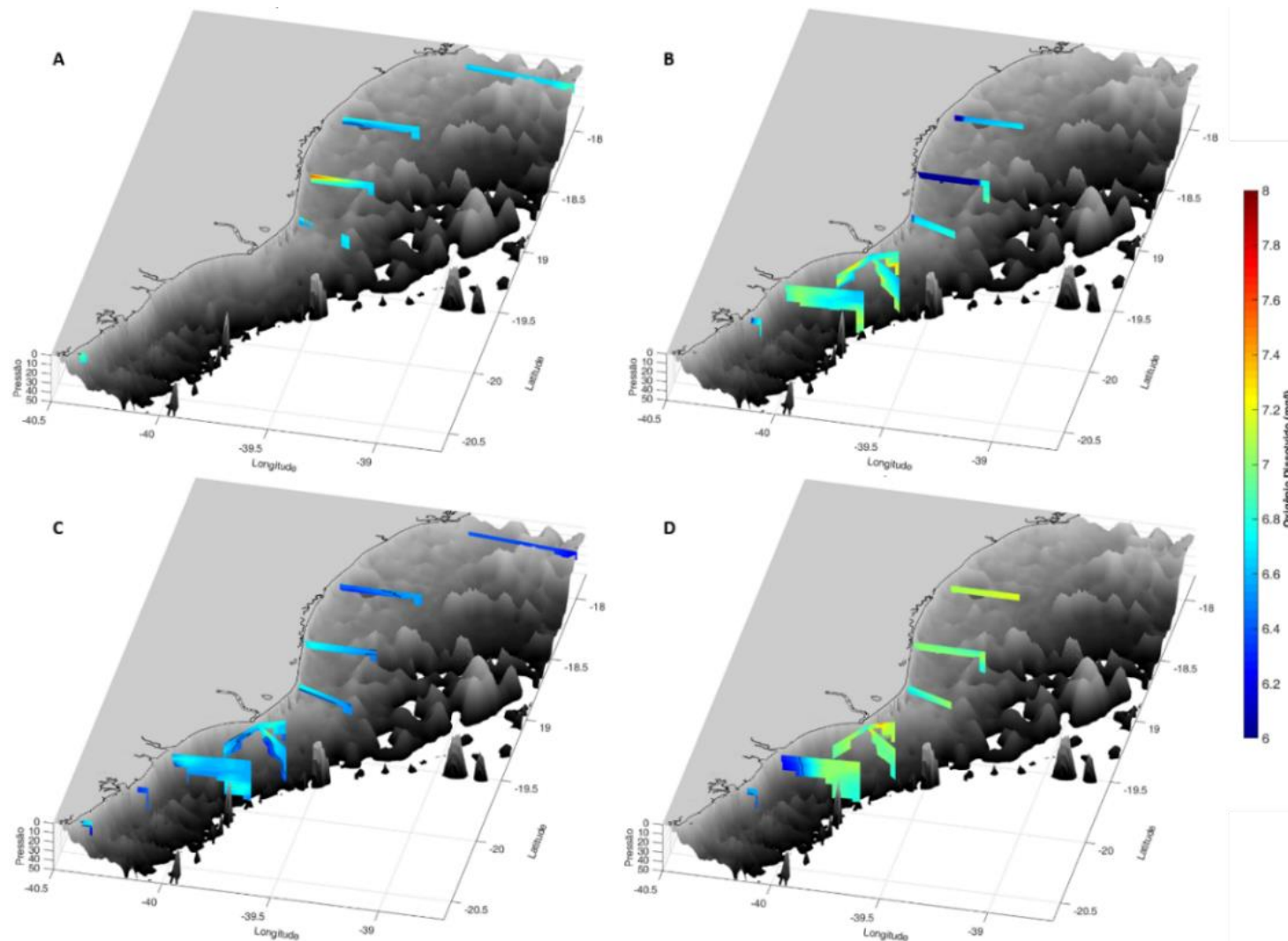


Figura 34: Seções de Oxigênio Dissolvido (mg/l) nos pontos amostrados durante as campanhas: (A) Semestral 1 – outubro/2018, (B) Trimestral 1 – janeiro/2019, (C) Semestral 2 – abril/2019 e (D) Trimestral 2 – julho/2019.



Em geral, o padrão de distribuição espaço-temporal da temperatura potencial (Figura 30) refletiu o balanço do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera, as variações sazonais da profundidade da camada de mistura e a presença/ausência do processo de ressurgência costeira (completo, isto é, com afloramento de água fria em superfície, ou incompleto). Em outubro a TSM estava relativamente baixa com fraca estratificação vertical nas regiões da foz do Rio Doce e Sul. Em janeiro e abril a TSM foi significativamente maior com forte estratificação vertical na região da foz e porção sul, enquanto que em julho a área amostrada apresentou um padrão térmico barotrópico frio (comparativamente ao observado em janeiro e abril).

A salinidade prática não variou significativamente ao longo do tempo e do espaço, exceto para a área restrita à foz do Rio Doce e nos pontos costeiros da Região Norte (Figura 32). A abrangência espacial da água menos salina foi resultado do *input* proveniente dos rios que deságuam ao longo da costa do Espírito Santo, principalmente pelo Rio Doce e rios ao norte dessa região, pela dispersão dessa água pelo padrão de vento atuante no momento da descarga e, secundariamente, dos ciclos de sizígia e quadratura e enchente e vazante da maré.

Os maiores valores de turbidez foram observados, principalmente, junto ao fundo da coluna de água nas estações mais próximas à foz do Rio Doce e nos pontos de Degredo e da Região de Abrolhos mais próximos à costa (Figura 32). Enquanto foi possível definir de uma forma relativamente objetiva para os padrões de distribuição espaço-temporal para a temperatura, a salinidade e a turbidez, o padrão da distribuição de fluorescência e oxigênio dissolvido foi mais subjetivo, pois essas variáveis representam propriedades não-conservativas, ou seja, suas concentrações variam também pelas trocas com a atmosfera, pelas reações químicas (no caso do oxigênio dissolvido) e/ou por processos biológicos ao longo da coluna d'água como produção, respiração, decomposição da matéria orgânica e nitrificação (LAMBERT & PERGA, 2019). No entanto, na maioria das vezes, a fluorescência se correlacionou positivamente com a presença de água relativamente fria proveniente do processo de ressurgência costeira e com o aporte continental (Figura 33). As maiores concentrações de oxigênio dissolvido estiveram associadas novamente à presença da água mais fria em janeiro e em toda a coluna de água em julho, haja vista que a temperatura da água é um fator muito mais importante no controle da solubilidade do oxigênio dissolvido (Figura 34). Embora insignificante quando comparada à temperatura, a salinidade também influencia na capacidade da água em dissolver oxigênio. A diminuição da salinidade aumenta a solubilidade do oxigênio dissolvido na água do mar. (DEBELIUS *et al.*, 2009).

Dividindo-se a análise por regiões, nas estações amostrais da região Sul (Guarapari e Vitória), a estratificação vertical ou a mistura da coluna de água foram diretamente definidas pelo balanço do fluxo líquido de calor ao longo do ano. Fluxos líquidos de calor positivos resultaram no aumento da estratificação vertical, enquanto que fluxos negativos ou próximos de nulo produziram uma coluna de água fria com baixa estratificação. Em janeiro e abril, a temperatura aumentou superficialmente (25 °C e 26 °C, respectivamente), enquanto que em outubro a temperatura era 24 °C na superfície e 22 °C no fundo e em julho. A região Sul apresentou uma coluna de água totalmente fria e misturada com valores

em torno de 22 °C. Embora a relação do padrão térmico observado esteja sendo relacionado ao balanço líquido de calor na interface oceano-atmosfera é preciso destacar que a sazonalidade neste padrão também é verificado, por exemplo, no padrão de intensidade e direção de vento (Figura 8), frequência e intensidade de entrada de frentes frias (Figura 9 e Figura 10), padrão de ondas (altura significativa, período e direção – Item 2.3), etc. Entende-se que a atuação conjunta de todas elas ou de algumas seja o fator determinante por estabelecer o padrão observado.

Nos meses de janeiro e abril também foi possível observar a presença de água relativamente mais fria (< 24 °C) no fundo das estações mais profundas sobre a plataforma continental. De fato, a presença de água relativamente fria provocada pela circulação associada à ressurgência costeira se estendeu até a porção norte da foz do Rio Doce.

Embora haja pequenas descargas continentais oriundas de aportes de rios na plataforma continental adjacente aos municípios de Vitória e Guarapari, não foram observadas variações de salinidade ao longo da coluna de água no período de amostragem, mas sim uma coluna quase que homogênea em todas as coletas realizadas. Da mesma forma, baixas concentrações de turbidez (< 5 NTU) foram observadas em todos os meses de coleta destacando a baixa influência do aporte dos rios nessa região e a ausência de eventos de ressuspensão de sedimento nas datas das coletas sobre a plataforma continental.

A presença de água relativamente mais fria observada ao longo do período de coleta refletiu-se na produtividade biológica, principalmente em maiores profundidades, evidenciadas pelo aumento da concentração de fluorescência nessa região. Entretanto, nos períodos quando a coluna de água esteve misturada, e.g. julho, a fluorescência apresentou menores concentrações (< 0,5 mg/m³) distribuídas ao longo da coluna de água.

O oxigênio dissolvido apresentou concentrações maiores quando ocorreu a presença de água relativamente mais fria devido ao processo de ressurgência, isto é, nos meses de outubro, janeiro e abril, atingindo a menor concentração no mês de julho quando a coluna de água estava homogênea. É importante ressaltar que a variação da concentração de oxigênio dissolvido está associada também a outros fatores, tais como produção e consumo, e não somente a temperatura da coluna de água.

Nas estações amostrais da região Norte (Degredo, Barra Nova e Itaúnas) a presença da água relativamente mais fria não foi visualizada, sugerindo que o limite de sua aparição seja entre o ponto mais ao norte da foz do Rio Doce (SDN 13) e os pontos de Degredo. Dessa forma, a coluna de água se apresentou barotrópica ao longo do ano, relativamente mais fria em outubro e julho e relativamente mais quente em janeiro e abril (Figura 30).

A distribuição de salinidade mostrou um padrão homogêneo com valores altos típicos de baixas latitudes. O aporte continental na plataforma adjacente à Região Norte pôde ser observado nos meses de outubro/2018 e abril/2019 indicado pela presença de uma água menos salina nos pontos mais costeiros de Barra Nova e Itaúnas e em Degredo e Barra Nova, respectivamente. Dois fatores se destacaram para justificar essa influência. No primeiro caso, a associação direta da presença dessa

água menos salina à influência da descarga do Rio Doce foi prejudicada pela logística de coleta que foi realizada no sentido do deslocamento da corrente, isto é, de norte a sul. Então, especulou-se a potencial contribuição da descarga continental principalmente dos Rios São Mateus, Itaúnas e Mucuri devido às fortes chuvas nessa região que poderia ter aumentado a vazão desses rios. No segundo caso, a água de menor salinidade poderia ter chegado às estações amostrais oriunda da descarga do Rio Doce combinada com a atuação de ventos sul característicos de entradas de frente fria que seriam capazes de transportar essa água para esses pontos mais ao norte.

Nos pontos de Barra Nova, Itaúnas e no ponto mais *offshore* de Degredo não foram encontrados sinais de turbidez. No entanto, a presença de valores maiores do que 5 NTU foram recorrentes no ponto mais costeiro de Degredo, principalmente na porção inferior da coluna de água. Esse padrão foi associado à ressuspensão de sedimentos decorrente do aumento da altura significativa de ondas devido à entrada de frente fria. Além disso, foi sugerido que a carga sedimentar proveniente do aporte do Rio Doce tenha sido transportada em direção a norte por correntes de fundo.

Em geral, as concentrações de fluorescência encontradas nessa região foram abaixo de 0,5 mg/m³. Picos de fluorescência (valores maiores do que 1 mg/m³) foram observados no mês de outubro/2018 nos pontos mais costeiros da Região Norte associados à presença da água de baixa salinidade. No mês de julho/2019, as concentrações de fluorescência relativamente altas (> 0,5 mg/m³) estiveram distribuídas em toda a região ao longo da coluna de água. Finalmente, a concentração de oxigênio dissolvido mostrou correlação negativa com o padrão térmico na Região Norte, isto é, os meses de outubro e julho apresentaram os maiores valores e em janeiro e abril as concentrações foram menores.

Para as demais regiões, a maior periodicidade e densidade de pontos de coleta permitiu uma análise mais detalhada. Para a região da APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz a análise da variação temporal da distribuição termohalina é mostrada na Figura 35 e de fluorescência, turbidez e oxigênio dissolvido na Figura 36 em um transecto perpendicular à costa que abrangeu desde a plataforma interna até a plataforma externa.

Figura 35: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) – esquerda – e Salinidade Prática – direita – na região da APA Costa das Algas e RVS Santa Cruz – ES nas campanhas Semestral 1 (outubro) e 2 (abril) e Trimestral 1 (janeiro) e 2 (julho) em um transecto perpendicular à costa conforme o mapa a esquerda. As linhas brancas referem-se às estações amostrais. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa.

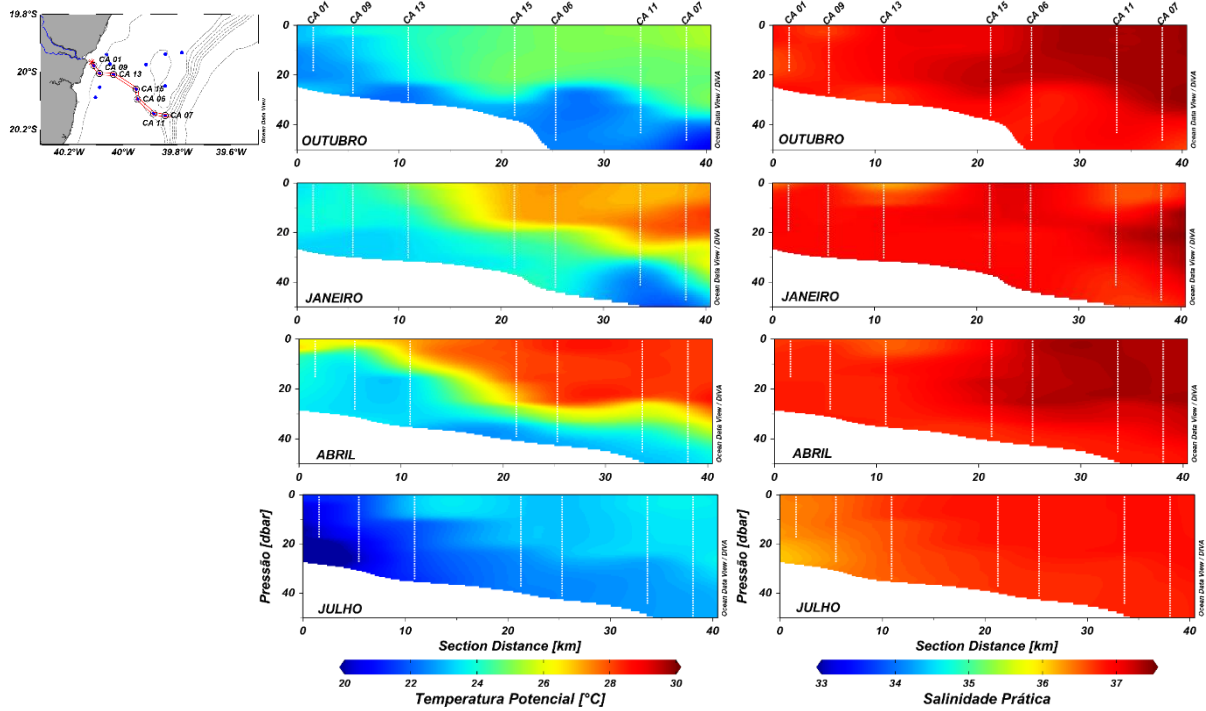
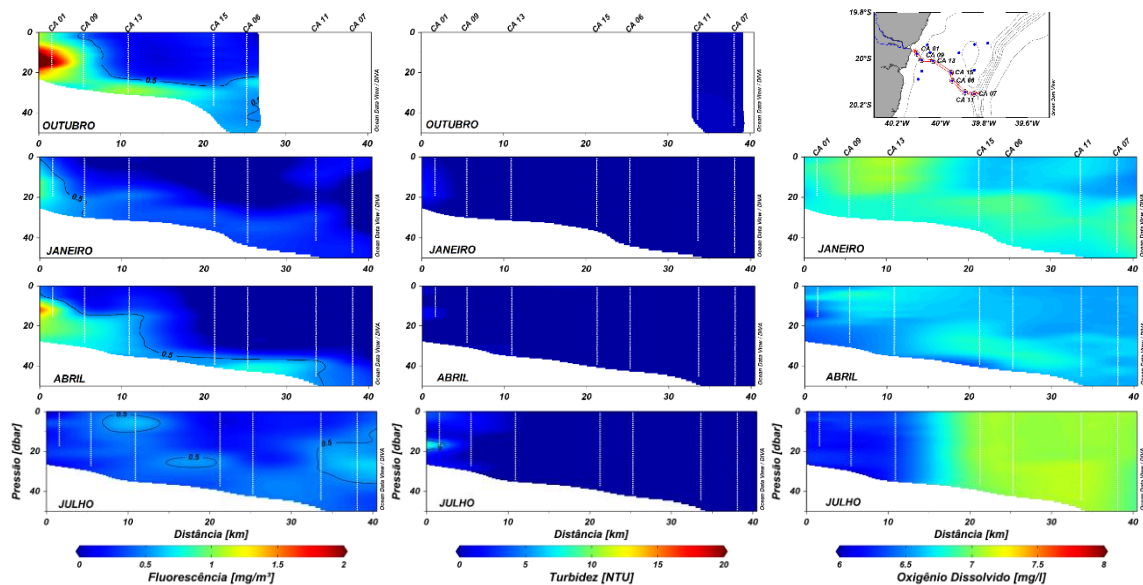


Figura 36: Distribuição da Fluorescência (mg/m^3) – esquerda – Turbidez (NTU) – central – e Oxigênio Dissolvido (mg/l) – direita – na região da APA Costa das Algas e RVS Santa Cruz – ES nas campanhas Semestral 1 (outubro) e 2 (abril) e Trimestral 1 (janeiro) e 2 (julho) em um transecto perpendicular à costa conforme o mapa a direita. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. O subplot e áreas em branco indicam a ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa.



Embora na Campanha Semestral 1 (outubro/2018), o ganho líquido de calor pelo oceano não era elevado, o aquecimento superficial do oceano resultou em uma estratificação da coluna de água com variação térmica de 3°C entre a superfície e o fundo na porção mais *offshore* da plataforma continental. Nas campanhas de janeiro (Trimestral 1) e abril (Semestral 2), o fluxo líquido de calor foi altamente positivo (Figura 6), isto é, o oceano ganhou calor, e foi observada uma variação térmica de até 6°C entre a superfície e fundo. Finalmente em julho (Trimestral 2) o oceano superficial perdeu calor, a estratificação vertical desapareceu em decorrência do processo de mistura o que também permitiu uma maior transferência vertical de *momentum* devido à ação da tensão de cisalhamento do vento, resultando em um oceano misturado com água relativamente mais frias ($<24^{\circ}\text{C}$) ao longo de toda a plataforma continental.

Nas quatro campanhas realizadas a água relativamente mais fria foi observada na porção inferior da coluna de água de todas as estações localizadas na plataforma média e externa. Já nas estações localizadas na plataforma interna essa água aflorou à superfície em outubro e janeiro, sendo a isóbata de 30 m o limite batimétrico onde a coluna de água passou de homogênea e mais fria para estratificada nos pontos mais *offshore*. A presença de água relativamente mais fria em superfície decorreu do processo de ressurgência completa que é favorecido pela atuação de ventos nordeste mais intensos e frequentes durante a primavera e o verão. A coleta realizada no mês de abril mostrou que a água mais fria estava na plataforma continental interna, mas não aflorou, resultando em uma ressurgência costeira incompleta. A redução na intensidade dos ventos nordeste e o aumento na frequência de ventos sul/sudeste típica do outono (Figura 8) reduziu a advecção do transporte de Ekman de superfície.

Apesar do padrão térmico mostrar uma baixa estratificação horizontal e vertical em julho, ainda assim se observou água relativamente mais fria bem próximo à costa (CA 01 e CA 09), sugerindo que o processo de ressurgência costeira seja um fenômeno perene ao longo do ano.

A salinidade se manteve alta, típica de regiões tropicais, ao longo de todo o período amostrado, indicando que não houve um *input* de águas menos salinas relevante na Região da APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz durante as amostragens realizadas.

As maiores concentrações de fluorescência nos pontos mais próximos à costa e no fundo ao longo da plataforma continental correlacionaram-se positivamente com a presença da água mais fria. Essa água está geralmente acompanhada do incremento na concentração de nutrientes que favorecem a produtividade primária nessa região. De fato, as concentrações de fluorescência foram superiores a 0,5 mg/m³ ao longo da coluna de água em julho (Figura 36).

A turbidez esteve baixa (< 5 NTU) ao longo de toda a plataforma continental da APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz independentemente do período de coleta e localização das estações amostrais, sugerindo que não houve um aporte continental significativo chegando na APA/RVS e nem eventos que promoveram a ressuspensão de sedimentos no momento quando as amostragens estavam sendo realizadas.

Em janeiro e abril as maiores concentrações de oxigênio dissolvido foram identificadas na porção onde a temperatura estava menor e a fluorescência estava maior, visto que menores valores de temperaturas favorecem a solubilidade do oxigênio dissolvido na água e a produção primária aumenta a concentração desse gás (MUSGRAVE *et al.*, 1988; DEBELIUS *et al.*, 2009). Em julho a plataforma externa apresentou maiores concentrações de oxigênio dissolvido. Porém, a plataforma interna apresentou um comportamento diferenciado, na qual foram encontradas menores concentrações de oxigênio dissolvido, possivelmente devido à atuação de processos biológicos e/ou reações químicas locais.

A distribuição mensal das propriedades termohalinas ao longo de uma seção aproximadamente paralela à costa centrada na área da foz do Rio Doce é mostrada na Figura 37. Ao longo do período amostrado foi identificada uma variabilidade tanto vertical quanto horizontal no padrão de temperatura.

No primeiro caso, foi observado que a coluna de água estava com fraca estratificação em outubro, se tornou fortemente estratificada de novembro a maio e em junho tornou-se fria e misturada como se manteve até setembro. Além de refletir o padrão do fluxo líquido de calor mostrado na Figura 6, a distribuição térmica mostrada decorreu da variação temporal da intensidade e direção do vento e, conseqüentemente, do desenvolvimento do processo de ressurgência costeira completa ou incompleta. A intrusão da água relativamente mais fria (representada na Figura 37 pela isoterma de 24 °C) sobre a plataforma continental observada na primavera e no verão deve-se à predominância e intensidade dos ventos nordeste que atuam na região, além do rotacional negativo da tensão de cisalhamento do vento devido ao bombeamento de Ekman que condicionam a ascensão dessa água mais fria (CASTELÃO & BARTH, 2006). Outros fatores como a topografia, a linha de costa e a intensificação e a aproximação à costa da Corrente do Brasil também podem atuar como responsáveis pelo processo de ressurgência

na costa do Espírito Santo (AGUIAR *et al.*, 2014; PALÓZCY *et al.*, 2016). Por outro lado, ventos mais fracos dos quadrantes sul e sudeste mais frequentes no outono e no inverno são favoráveis à subsidência da água superficial, o que tende a reduzir e até eliminar a estratificação vertical.

Quanto à variabilidade horizontal da temperatura, houve um comportamento diferenciado entre os pontos localizados ao norte e ao sul da foz do Rio Doce. Nos pontos ao sul (SDS 30, SDS 13 e SDS 20) a água relativamente mais fria ocupou praticamente toda a coluna de água no período entre novembro e março indicando um processo de ressurgência completo, principalmente no ponto mais próximos à costa (SDS 13). Nas estações ao norte da foz do Rio Doce (SDN 20, SDN 30 e SDN 13) a água relativamente mais fria ficou restrita à porção inferior da coluna de água resultando em uma variação de até 6 °C entre a superfície e o fundo, caracterizando um processo de ressurgência incompleta nessa porção. A causa deste comportamento diferenciado ao norte e ao sul do rio ainda está em análise, mas questiona-se, entre outras causas, o papel da variação da largura da plataforma continental ocasionado pela presença do Banco de Abrolhos exatamente na região da foz do Rio Doce.

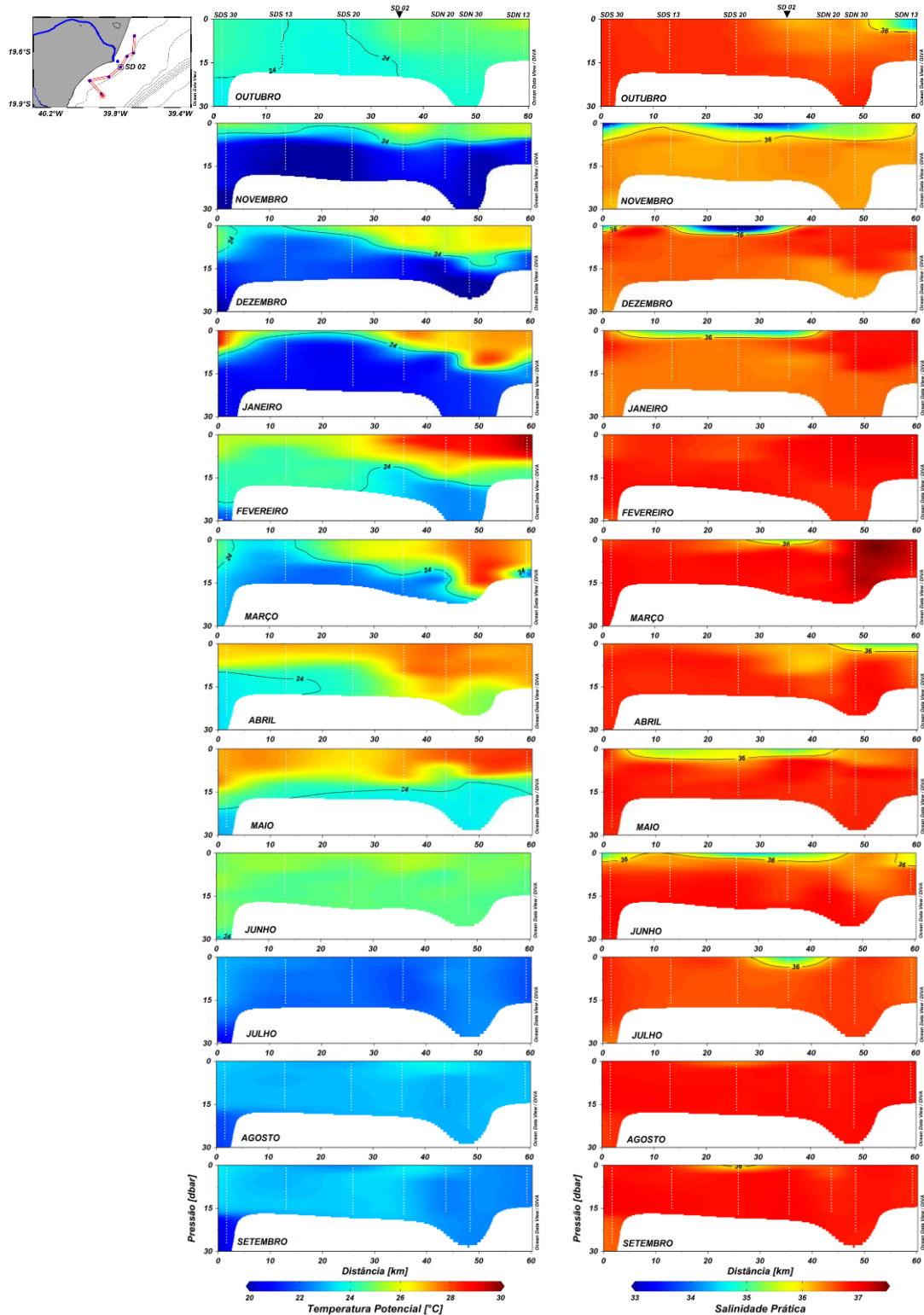
Nos meses entre junho e setembro, a perda de calor pelo oceano nesse período juntamente com a variação temporal da intensidade e direção do vento resultou na distribuição térmica praticamente homogênea e mais fria vertical e horizontalmente. Nesse período as entradas de frente fria mais frequentes e processos de mistura mais eficientes resultaram na homogeneidade da coluna de água (Figura 37). Nos meses de agosto e setembro a maior frequência dos ventos nordeste (Figura 7) podem ter induzido a entrada de uma água mais fria observada na porção mais profunda da plataforma continental mesmo no inverno.

Com exceção dos meses de fevereiro e agosto/2019, águas com salinidade menor do que 36 foram observadas ao longo da seção amostrada. A direção preferencial da dispersão dessa água menos salina para norte, para sul ou aprisionada em frente à foz do rio esteve diretamente relacionada à intensidade e direção dos ventos, da condição de maré (enchente/vazante, sizígia/quadratura), além, é claro, da vazão do Rio Doce. Essa é, de fato, a relação esperada, isto é, que maiores vazões se refletissem na maior dispersão horizontal da água de menor salinidade. Esse padrão ocorreu em dezembro/2018 quando o valor mínimo de 32 foi observado para uma condição de alta vazão do Rio Doce (Figura 37). A relação direta de causa-efeito nem sempre ficou evidente nos dados amostrados. Por exemplo, no dia 1° de janeiro/2019 foi reportada a maior vazão medida durante o PMBA (2562 m³/s) e, por isso mesmo seria esperada a maior área de dispersão superficial da água de menor salinidade, o que não aconteceu. Como a coleta referente a esse mês ocorreu entre os dias 12 a 17 de janeiro, a não identificação de água menos salina em campo não significou que ela não ocorreu na região, mas sim que a equipe de campo não estava presente *in situ* no momento exato em que ela ocorreu.

Além do exemplo descrito acima, existiram outros nos quais ficou clara a limitação da logística de campo. No mês de novembro/2018 enquanto os ventos atuantes eram nordeste e favoreciam o deslocamento da pluma para sul/sudoeste, as coletas estavam sendo realizadas nos pontos ao sul da

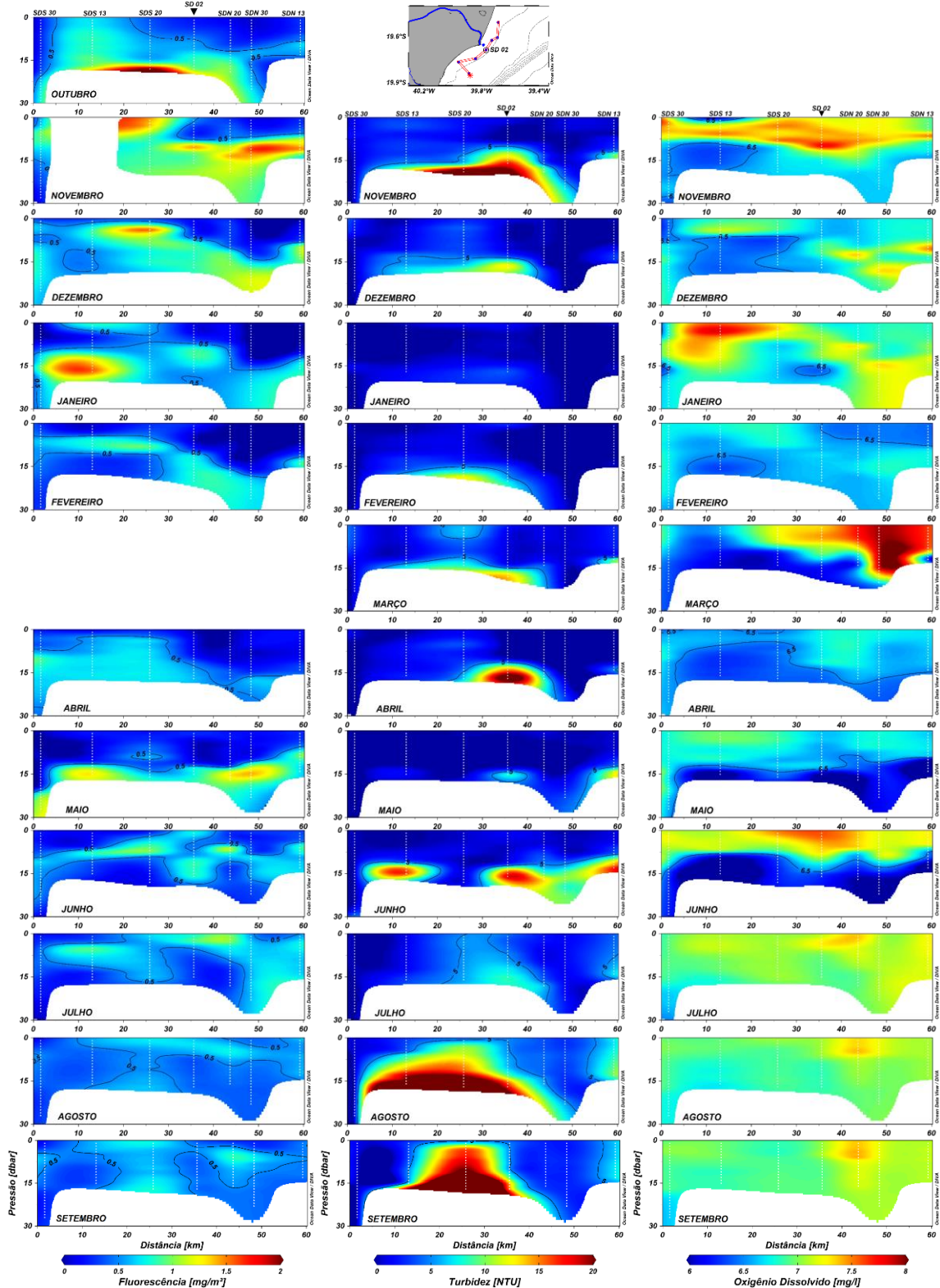
foz (SDS). Quando o padrão de vento se inverteu para sul-sudeste devido à entrada de uma frente fria e a pluma foi advectada para o norte, foram realizadas as coletas nas estações ao norte da foz (SDN). Como resultados desta estratégia, o resultado mostrou a presença de água menos salina tanto a sul quanto a norte da foz do Rio Doce, resultando na maior abrangência superficial identificada em todo o monitoramento, ou seja, a distribuição espacial ficou supervalorizada. Por outro lado, no mês de fevereiro/2019 a água de menor salinidade proveniente do aporte do Rio Doce não foi amostrada em nenhuma estação pré-estabelecida, podendo estar relacionada à baixa intensidade dos ventos nordeste e leste que atuavam na área ou mesmo à condição de maré durante a coleta. Esse sinal somente foi registrado porque a equipe de campo estabeleceu um ponto extra, descendo o CTD dentro de uma pluma de sedimentos identificada visualmente.

Figura 37: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) – esquerda – e Salinidade Prática – direita – em uma seção paralela à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. As áreas em branco se referem à ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa. A estação identificada pelo triângulo invertido nos *plots* superiores referem-se ao ponto SD 02 localizado em frente à foz do Rio Doce.



A variação mensal da distribuição vertical da fluorescência, da turbidez e do oxigênio dissolvido é mostrado na Figura 38. Entre novembro e maio, a fluorescência seguiu praticamente o mesmo padrão da presença de água relativamente mais fria com maiores concentrações foram superiores a $0,5 \text{ mg/m}^3$. Esse padrão foi observado ao longo da coluna de água nos pontos ao sul (SDS) da foz do Rio Doce e confinados à porção inferior da coluna de água nos pontos ao norte da foz do Rio Doce (SDN). Já nos meses de junho a setembro, quando a estratificação vertical foi quebrada, as maiores concentrações de fluorescência estiveram distribuídas no meio da coluna de água refletindo a homogeneidade vertical e/ou à dinâmica do fitoplâncton marinho.

Figura 38: Distribuição da Fluorescência (mg/m^3) – esquerda – Turbidez (NTU) – meio – e Oxigênio Dissolvido (mg/l) – direita – em uma seção paralela à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. Os *subplot* e áreas em branco indicam a ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa. A estação identificada pelo triângulo invertido nos *plots* superiores referem-se ao ponto SD 02 localizado em frente a foz do Rio Doce.

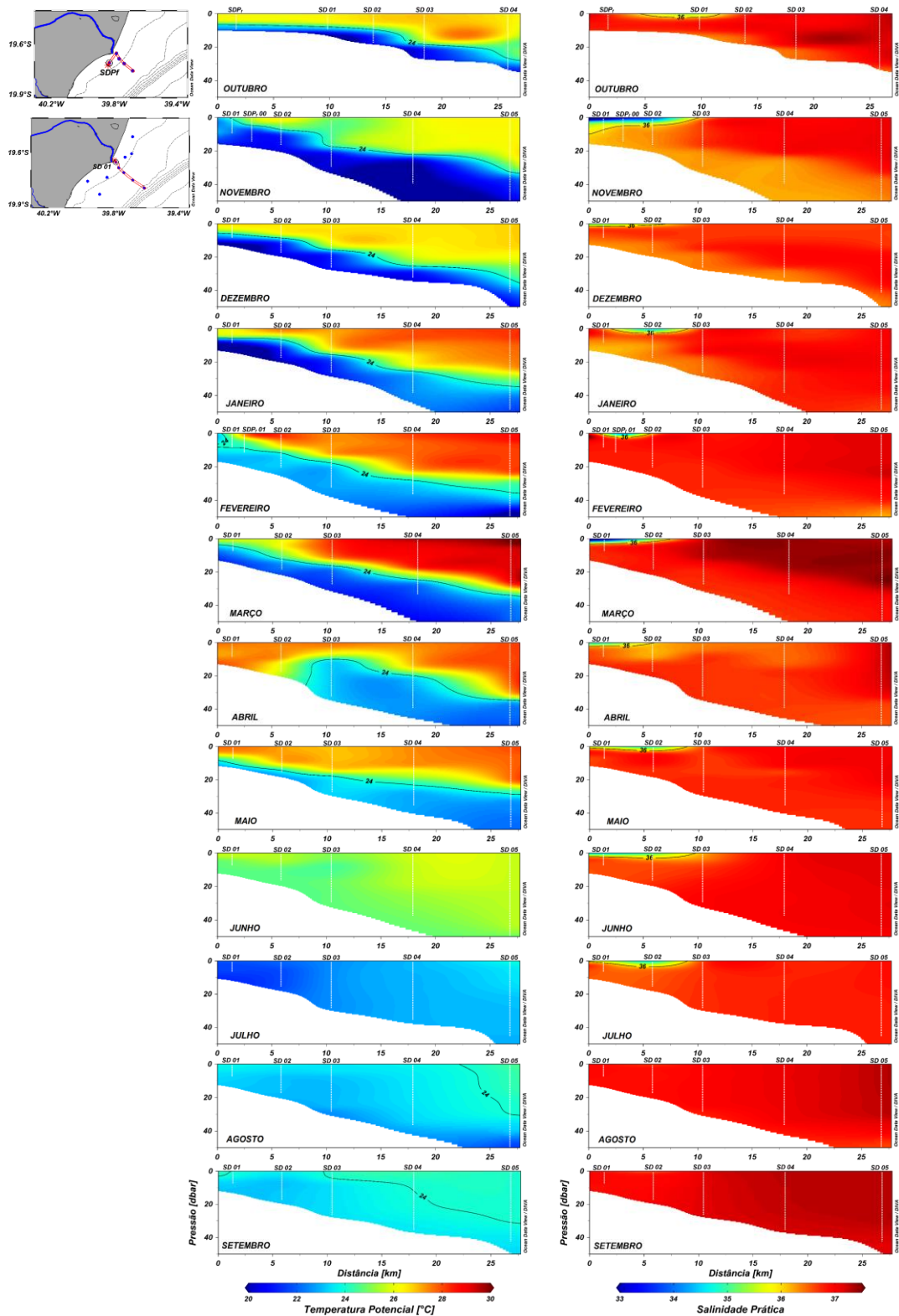


O padrão de variabilidade mensal da turbidez ao longo dessa seção mostrou que os valores foram consideravelmente maiores nas estações mais rasas e próximos ao fundo se comparados aqueles medidos na porção superficial da coluna de água. Em superfície, a turbidez próxima à foz mostrou uma estreita relação com a vazão do rio, sendo a direção preferencial do material em suspensão regida pela atuação dos ventos. Já no fundo, a descarga continental juntamente com o processo de ressuspensão sedimentar pelas ondas e o padrão de correntes de fundo atuantes no momento de medição resultaram no padrão evidenciado na Figura 38.

As maiores concentrações de oxigênio dissolvido foram observadas na porção superficial ou permaneceram praticamente homogêneas ao longo da coluna de água (Figura 38). No entanto, houveram padrões distintos, como por exemplo, nos meses de maio e junho quando foram medidos maiores níveis de turbidez, diminuição na concentração de fluorescência e menores valores de oxigênio dissolvido. Essa menor concentração de oxigênio dissolvido pôde estar relacionada à baixa fixação do oxigênio dissolvido pelo fitoplâncton ou até mesmo ao rápido consumo do oxigênio nessa região (Figura 38). Além disso, as maiores concentrações de oxigênio dissolvido estiveram associadas aos períodos de perda de calor do oceano e às menores temperaturas da coluna de água evidenciando a relação da solubilidade desse gás às menores temperaturas.

A variabilidade temporal da abrangência espacial da água relativamente mais fria e suas características associadas sobre a plataforma continental, bem como o efeito da vazão do Rio Doce e da carga sedimentar associada ficou mais evidente quando se observou a seção do transecto perpendicular à foz do Rio Doce (Figura 39).

Figura 39: Distribuição da Temperatura Potencial (°C) – esquerda – e Salinidade Prática – direita – em uma seção perpendicular à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. As áreas em branco se referem à ausência de dados. No mês de outubro a distância entre os pontos foi diferente devido ao ponto extra coletado fora do transecto central. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo os mapas.



O ganho líquido de calor pelo oceano e a presença da água relativamente mais fria sobre a plataforma continental produziram uma intensa estratificação vertical estabelecendo um oceano de duas camadas cuja máxima variação térmica entre a superfície e o fundo foi de 6 °C no mês de março quando as águas superficiais atingiram o valor máximo de 30 °C. Houve um nítido incremento na temperatura da porção superficial da coluna de água de novembro a março quando, então, teve início o resfriamento e a mistura culminando com uma coluna de água barotrópica e fria entre julho e setembro.

Apenas com o objetivo ilustrativo, a isoterma de 24 °C delimitou a abrangência da água relativamente mais fria ao longo da seção (Figura 39). Notou-se que a abrangência espacial foi variável entre novembro/2018 e maio/2019, mas, em pelo menos 3 amostragens mensais (novembro/2018, fevereiro e março/2019), a água relativamente mais fria aflorou à superfície próximo à costa enquanto que a água relativamente mais quente superficial foi advectada *offshore* em um padrão clássico de desenvolvimento da ressurgência costeira. O não afloramento, no entanto, caracteriza a ressurgência costeira incompleta. O processo é basicamente forçado pela tensão de cisalhamento do vento, mas o *encroachment* (e.g., AGUIAR *et al.*, 2014; PALÓZCY *et al.*, 2016), o impulso do vento (e.g., CASTELÃO & BARTH, 2006), a largura da plataforma continental e orientação da linha de costa (e.g., RODRIGUES & LORENZZETTI, 2001) também são importantes, além do Bombeamento de Ekman (e.g., CASTELÃO & BARTH, 2006; MAZZINI & BARTH, 2013). A presença da água relativamente mais fria próxima à foz do Rio Doce já foi reportada, por exemplo, por Paloczky *et al.* (2016) que sugeriram a região próxima ao Rio Doce como um dos caminhos preferenciais de entrada de água relativamente mais fria sobre a plataforma continental.

Climatologicamente, no outono (abril/2019) há uma alteração no padrão de fluxo líquido de calor (Figura 6), mas também no padrão de intensidade e direção dos ventos (Figura 7 e Figura 8) que se refletiu no padrão térmico observado. Enquanto nos meses de abril e maio ainda se identificou uma estratificação térmica vertical, ela completamente desapareceu no final do outono e no inverno. Esse padrão resultou, provavelmente, da mudança na intensidade e direção preferencial da tensão de cisalhamento do vento, agora favorável à subsidência, processos turbulentos decorrentes do aumento na frequência de entrada de frentes frias (Figura 9), da ação de ondas e da perda líquida de calor pelo oceano.

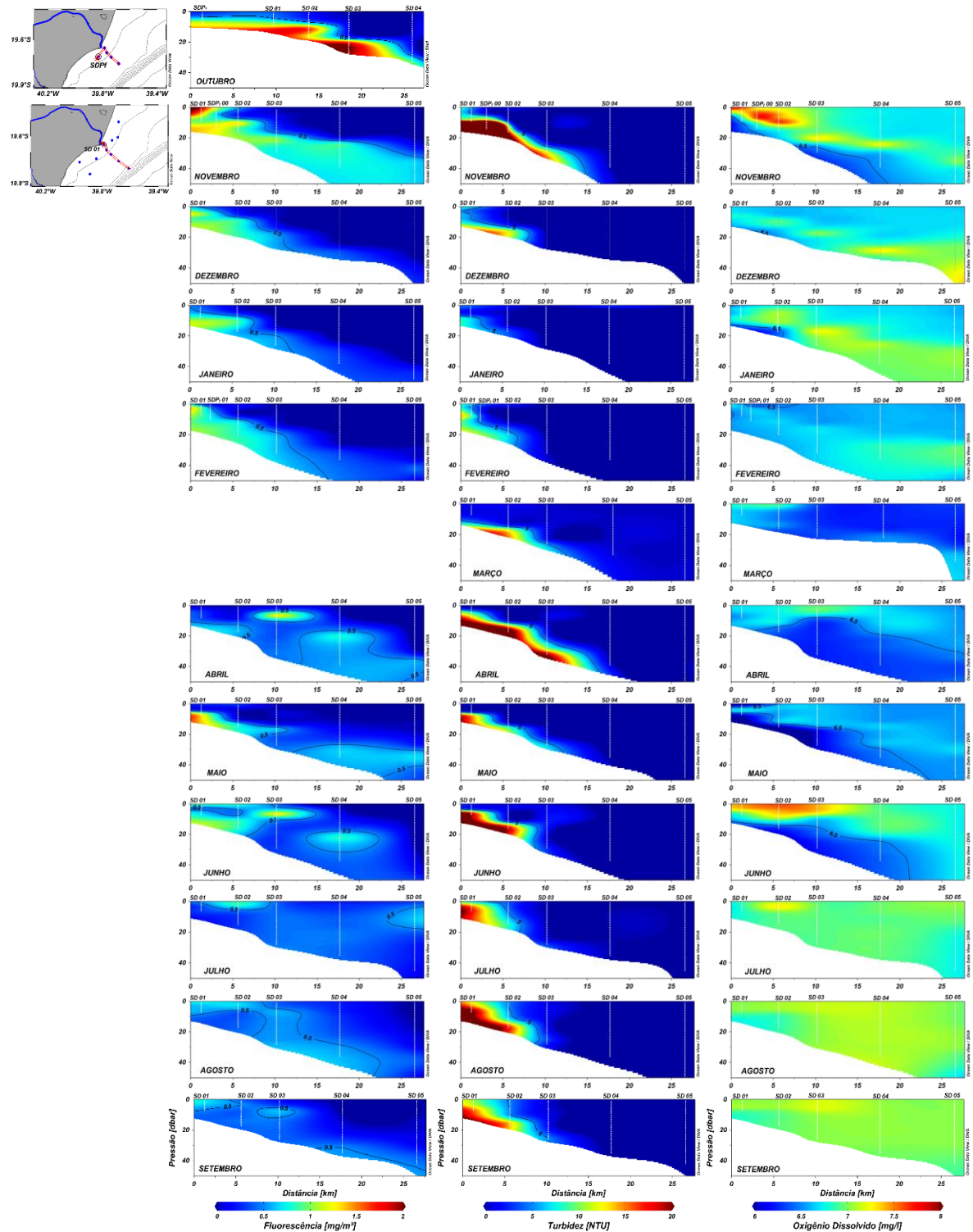
Como nas seções analisadas previamente, a distribuição da salinidade foi espacialmente homogênea com exceção da porção superficial próximo à costa limitada até a estação SD 03 onde os valores foram menores que 36 (Figura 39). A abrangência espacial dessa água menos salina foi variável e, não necessariamente, foi diretamente proporcional a vazão do rio, mas dependeu também da maré e das condições de vento, como explicado anteriormente, o que tornou a dispersão dessa pluma assimétrica.

Nesta seção perpendicular à foz do rio, um aumento nos valores de fluorescência foi observado junto ao fundo da plataforma continental e esteve associado aos menores valores de temperatura (Figura 40). Da mesma forma, a homogeneização vertical da coluna de água foi acompanhada de menores concentrações de fluorescência.

Como observado anteriormente, os maiores valores de turbidez (acima de 20 NTU) estiveram confinados junto ao fundo da plataforma continental e nas estações mais rasas e próximas à foz do rio (SD 01, SD 02 e SD 03) (Figura 40). Esse padrão sugeriu que os processos de ressuspensão juntamente com a carga sedimentar associada à descarga continental são fatores determinantes na disponibilização desse material na coluna de água. Entretanto, nos pontos mais próximos à costa a descarga continental associada à presença de uma água menos salina disponibilizaram esse sedimento na coluna de água e aumentaram os valores de turbidez próxima à foz do Rio Doce, principalmente nos meses de novembro, abril e maio quando também a abrangência espacial foi maior. É importante ressaltar que nesses meses as coletas foram realizadas logo após a inversão dos ventos do quadrante sul para os ventos do quadrante norte.

Finalmente, nesse mesmo transecto as maiores concentrações de oxigênio dissolvido foram observadas associadas à presença de água relativamente mais fria no fundo da plataforma continental, assim como observado em alguns meses (e.g. janeiro) na amostragem paralela à costa. A disponibilidade de oxigênio dissolvido, assim como a temperatura, respondeu às variações anuais do balanço do fluxo líquido de calor, além da sua relação com produção e consumo pela cadeia trófica (MUSGRAVE *et al.*, 1988; TRÉGUER *et al.*, 2003) e pela incorporação direta de oxigênio atmosférico via turbulência na interface oceano-atmosfera (MUSGRAVE *et al.*, 1988). Nesse sentido, é esperado que a camada superficial seja mais rica em oxigênio dissolvido ou que o oxigênio dissolvido esteja distribuído de forma homogênea na coluna de água nos períodos de maior mistura.

Figura 40: Distribuição da Fluorescência (mg/m^3) – esquerda – Turbidez (NTU) – meio – e Oxigênio Dissolvido (mg/l) – direita – em uma seção perpendicular à costa centrada na região da foz do Rio Doce. As linhas brancas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. Os *subplot* e áreas em branco indicam a ausência de dados. No mês de outubro a distância entre os pontos foi diferente devido ao ponto extra coletado fora do transecto central. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo os mapas.



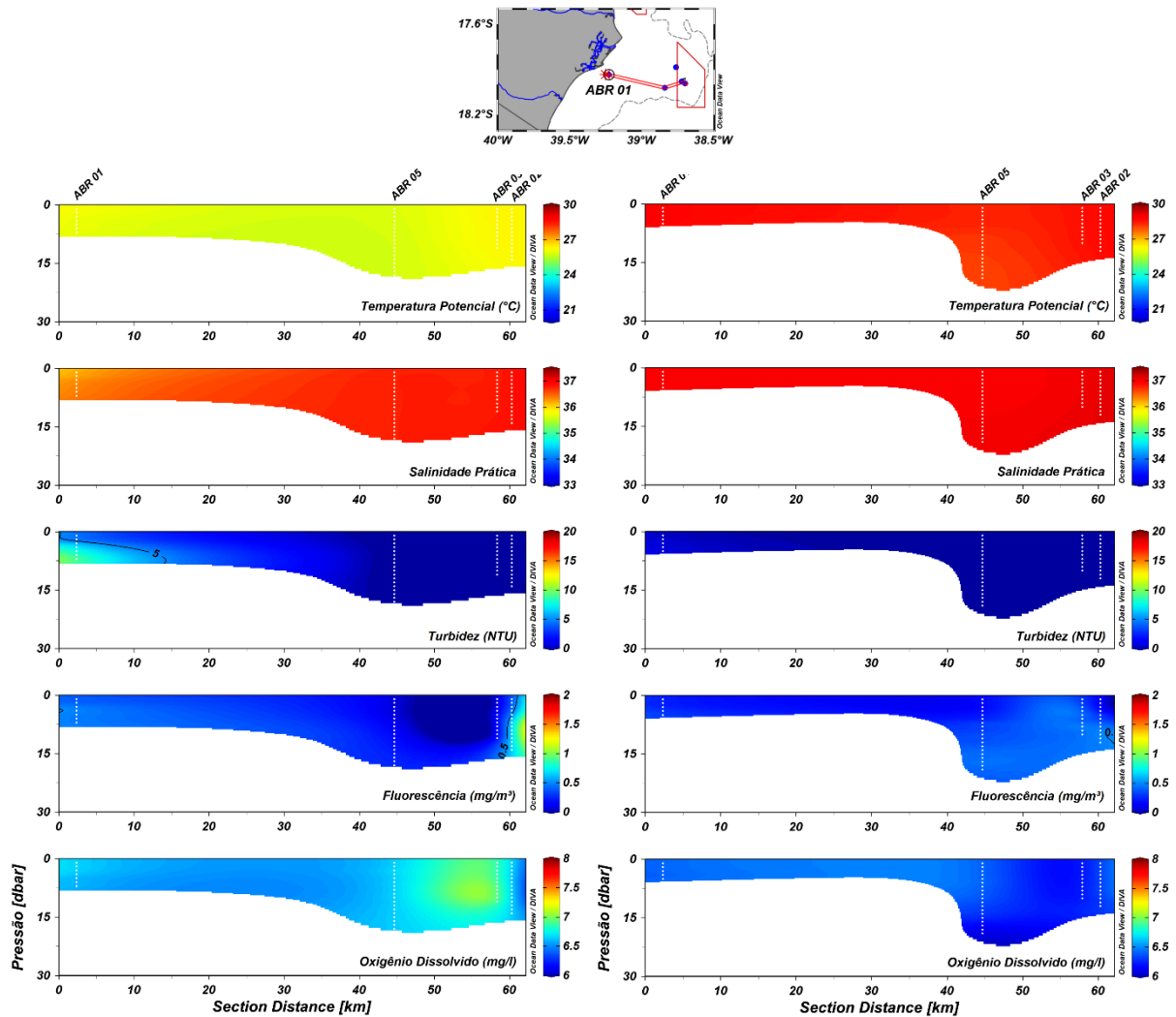
Na região do Banco de Abrolhos foram realizadas somente duas amostragens referentes às coletas sazonais, isto é, em outubro/2018 e abril/2019 (Figura 41). Em ambas a coluna de água esteve barotrópica relativamente mais fria em outubro e mais quente em abril. Apesar de trabalhos anteriores terem relatado que o padrão térmico sobre o Banco de Abrolhos obedece a um padrão anisotrópico (e.g., GHISOLFI *et al.*, 2015), o mesmo não pôde ser observado na área correspondente à região amostrada. Novamente, o padrão amostrado respondeu ao balanço do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera.

Na distribuição de salinidade foi amostrada uma pequena contribuição do aporte continental no ponto mais próximo à costa (ABR 01) no mês de outubro. Com exceção desse ponto, o padrão salino se apresentou com valores altos e completamente homogêneo tanto horizontal quanto verticalmente.

Os valores de turbidez se apresentaram próximos a zero no PARNAMAR dos Abrolhos em ambas amostragens. Próximo à costa (ponto ABR 01) as maiores concentrações de turbidez (> 5 NTU) no mês de outubro podem estar relacionadas ao aumento da precipitação e, conseqüentemente, da vazão dos rios da região (principalmente o Rio Caravelas) ou ainda à passagem de uma frente fria que pode ter ressuspensionado os sedimentos depositados no fundo.

As concentrações de fluorescência ao longo da Região do Banco de Abrolhos se mantiveram abaixo de 0,5 mg/m³ durante as duas amostragens, exceto no PARNAMAR dos Abrolhos onde as concentrações foram superiores a 1 mg/m³ na coleta de outubro. As concentrações de oxigênio dissolvido mostraram o mesmo padrão nesse mesmo mês, quando foram amostrados valores maiores do que 7 mg/l no PARNAMAR.

Figura 41: Distribuição da Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Turbidez (NTU) Fluorescência (mg/m³) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) na região de Abrolhos nas campanhas Semestral 1 (outubro) – esquerda – e Semestral 2 (abril) – direita. As linhas cinzas referem-se às estações amostrais indicadas na parte superior das figuras. As áreas em branco indicam a ausência de dados. O eixo x representa a distância acumulada entre os pontos seguindo o mapa à esquerda.

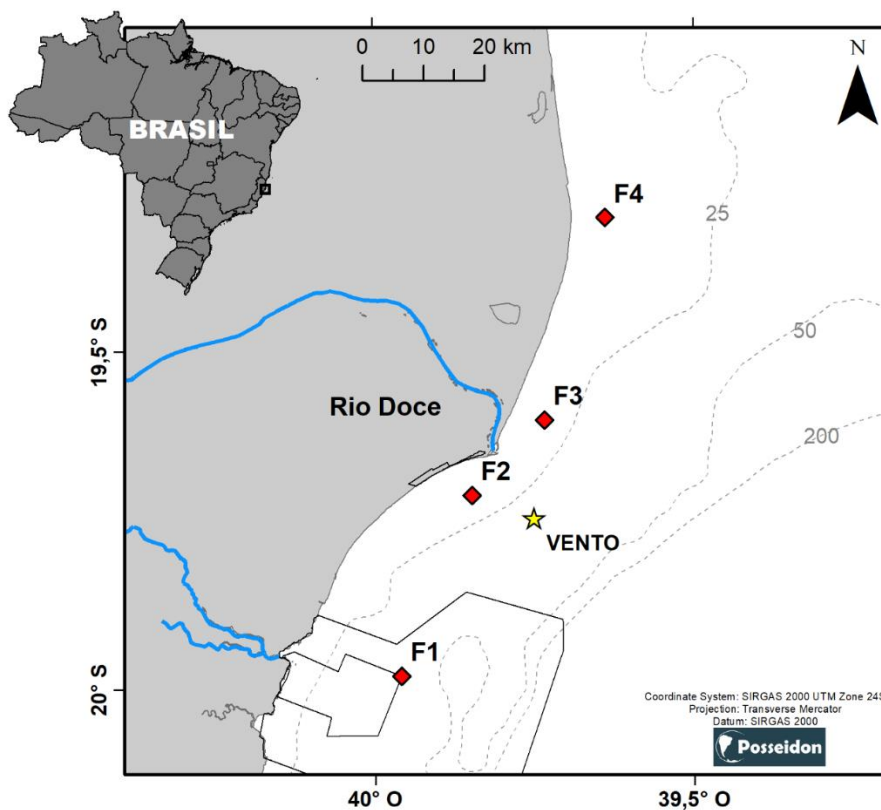


2.3 FUNDEIOS

As observações realizadas nos quatro Fundeios propostos consistiram na aquisição de dados de correntes a partir da utilização de perfiladores acústicos do fabricante Nortek, modelo Signature, com frequências de trabalho de 500 kHz para os Fundeios 1 e 2 (F1 e F2, respectivamente) e 1000 kHz, nos Fundeios 3 e 4 – F3 e F4) (Figura 42). Foram realizadas 10 campanhas de medições, com manutenção aproximadamente mensal compreendendo o período entre novembro/2018 e setembro/2019. Na primeira campanha de manutenção não foi possível a recuperação do equipamento instalado no Fundeiro 2. Uma campanha adicional foi realizada para recuperação/reinstalação do equipamento perdido cerca de 2 semanas após a detecção do problema, uma vez que a saída de

campo ficou condicionada as condições de bom tempo, para melhor desempenho das atividades embarcadas.

Figura 42: Mapa com a localização dos Fundeios 1, 2, 3 e 4 (losangos vermelhos) ao longo da costa do Espírito Santo. A estrela amarela se refere à estação de onde foi retirada a série de ventos do modelo global *ECMWF*. As linhas em preto referem-se às Unidades de Conservação e as linhas tracejadas em cinza às cotas batimétricas de 25, 50 e 200 m.



Apesar dos esforços, o equipamento não foi encontrado, sendo imediatamente substituído por outro perfilador, com frequência de 600 kHz, que foi fundeado cerca de 4 km da coordenada onde inicialmente tinha sido fundeado o primeiro equipamento. Em todos os Fundeios os equipamentos foram instalados próximo ao fundo, com transdutores voltados para à superfície, sendo as profundidades locais dos fundeios F1, F2, F3 e F4 iguais a de 44 m, 16m, 18m e 18m, respectivamente. Nos fundeios F1 e F2 as medições de intensidade e direção das correntes foram realizadas a cada 0,5 m, enquanto que para os Fundeios F3 e F4 as observações foram a cada 0,2 m de coluna d'água, com amostragens sendo realizadas a cada 20 minutos em todos os fundeios. No mês de março/2019 o perfilador acústico instalado no Fundeio F2 apresentou problemas e não houve coleta de dados correntométricos nesta posição.

Junto aos perfiladores de correntes foram instalados sensores de temperatura para acompanhamento da temperatura junto ao fundo. A partir de dezembro de 2018, foram instalados CTDs (*Sea-Bird HydroCAT*) junto ao fundo para medições de diferentes parâmetros (pressão, condutividade, temperatura, turbidez, oxigênio e fluorescência) com amostragem temporal de 20 min. No entanto, problemas com os CTDs instalados permitiram que apenas condutividade, temperatura e turbidez (este

parâmetro apenas na segunda campanha) fossem medidos. Os demais parâmetros não foram medidos corretamente pelos CTDs instalados. Os equipamentos que apresentaram problemas foram retornados ao fabricante para averiguação de possíveis problemas de fabricação.

No final de março de 2019 foram instalados CTDs na superfície acoplados às boias. Porém, em alguns períodos os sensores ficaram parcialmente emersos e os parâmetros de clorofila-a, condutividade e oxigênio dissolvido não foram medidos corretamente. Após a verificação desses dados espúrios, os equipamentos foram recolocados nas boias durante as campanhas de manutenção de forma que os sensores permanecessem imersos durante toda a campanha.

As séries temporais dos dados de concentração de clorofila-a, turbidez e salinidade constam nas figuras do APÊNDICE I. O Quadro constante nessa mesma seção traz informações dos períodos de medição e as intercorrências encontradas ao longo das campanhas.

O processamento dos dados foi realizado considerando-se o sistema cartesiano XYZ. A componente x é positiva para leste, y para norte e z para cima. Quando necessário, o sistema cartesiano foi rodado em THETA graus (Tabela 5) para redirecioná-lo de acordo com a orientação da linha de costa e, assim, se obter as componentes paralela e perpendicular. Quando indicado, foram utilizadas séries nas quais apenas se considerou processos de baixa frequência, com períodos acima de 40h.

Tabela 5: Orientação da costa em relação ao sistema cartesiano em cada fundeio.

Fundeios	F1	F2	F3	F4
THETA (graus)	-25	-70	-23	0

As análises dos parâmetros aferidos nos fundeios foram realizadas abrangendo toda a coluna d'água, chamando a atenção para padrões observados na superfície e no fundo. A superfície quando mencionada refere-se a aproximadamente 3 m de profundidade e o fundo representa a última medição (*bin*) correspondente à profundidade local.

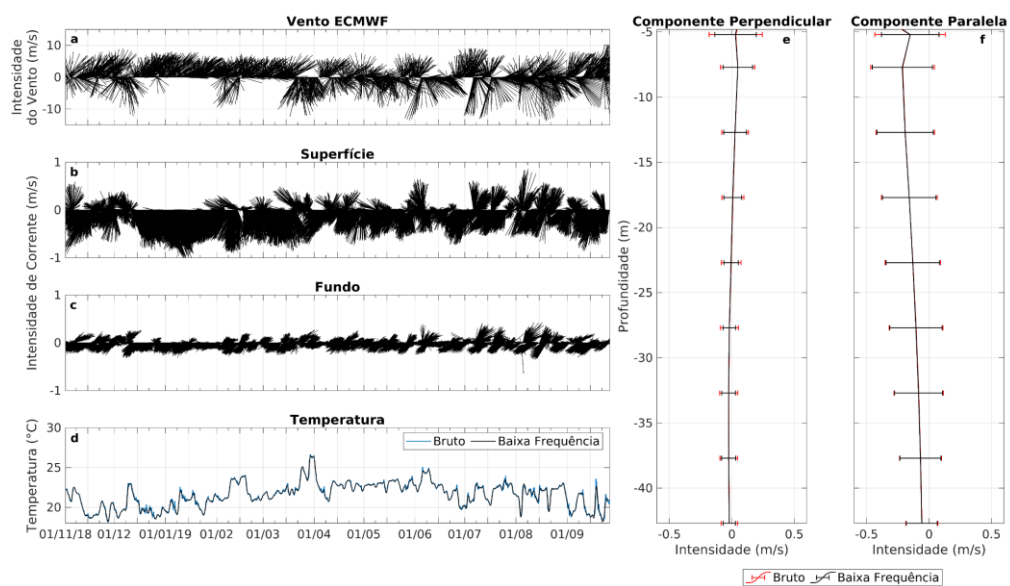
A seguir são apresentados os resultados das medidas realizadas nos fundeios, de sul (F1 – APA Costas das Algas/RVS Santa Cruz) para norte (F4 – Degredo).

2.3.1 Fundeio 1 (F1)

A medição de corrente e temperatura no Fundeio 1, na região da APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz, mostrou diferenças temporais marcantes entre o período de primavera-verão e outono-inverno e espacial entre a circulação superficial e de fundo (Figura 43). As correntes superficiais apresentaram maior intensidade comparativamente às correntes no fundo, com picos de até 1 m/s. Na primeira metade do registro, especialmente entre os meses de dezembro de 2018 a março de 2019, ficou evidente um período longo de relativa estabilidade do vento (Figura 43a), com predominância de ventos do quadrante norte-nordeste e poucas inversões de direção do vento. Isso se refletiu no campo de correntes superficiais locais produzindo correntes sul-sudoeste (Figura 43b) fluindo paralelamente às

isobatimétricas locais. Nesse mesmo período as correntes de fundo mostraram uma tendência semelhante, embora com intensidades menores e com a componente perpendicular à costa negativa (i.e., em direção à costa - Figura 43c), acompanhada da presença de água com temperatura abaixo de 22 °C durante boa parte do período, temperaturas inferiores a 19 °C em diversos momentos, além de aumentos episódicos (Figura 43d).

Figura 43: Fundeio 1 – Distribuição temporal do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de novembro de 2018 a setembro de 2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.



Do início das observações até a primeira quinzena de dezembro, ocorreram inversões na direção e intensidade das correntes (Figura 43b) e do vento (Figura 43a) com duração entre 2 e 4 dias. Essas inversões se refletiram em um aumento temporário de temperatura junto ao fundo de até 3 °C (Figura 43d), com um atraso variável entre a inversão das correntes e as mudanças de temperatura junto ao fundo.

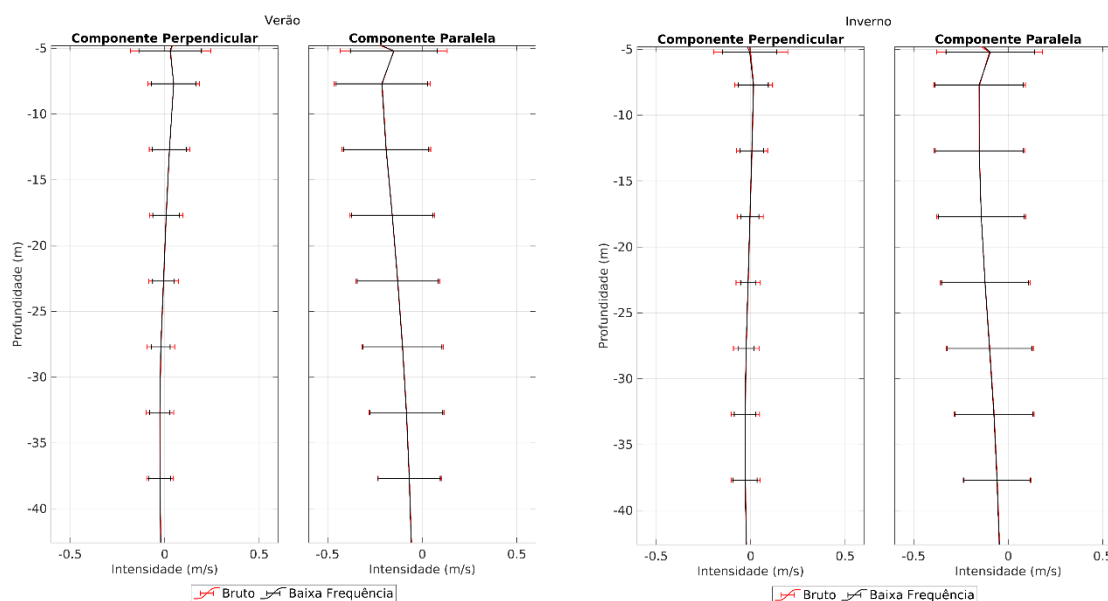
Inversões na direção do vento se tornaram mais frequentes e de maior duração a partir do dia 21 de março de 2019, com o final do verão. Essas mudanças ocasionadas pela entrada de frentes frias se refletiram na inversão no sentido das correntes em superfície e na elevação da temperatura junto ao fundo, com picos térmicos durante ou logo após os eventos meteorológicos. A maior frequência na passagem de frentes frias com a chegada do outono provocou um aumento relativo da temperatura que passou, em média, de 20,8 °C de novembro até a primeira quinzena de março para 22,6 °C da segunda quinzena de março a julho. Picos marcantes de temperatura foram observados no final de março/2019 com a passagem de uma frente fria seguida do desenvolvimento da Tempestade Tropical IBA pela região. Nesse período (28/03/2019) a temperatura da água próximo ao fundo ultrapassou os 26 °C (Figura 43d).

Valores médios de corrente entre novembro e julho mostraram que a componente perpendicular à costa (Figura 43e) foi ligeiramente positiva (em direção ao oceano aberto) nos primeiros 15 m da coluna de água ($< 0,1$ m/s) e fracamente negativos ($< 0,1$ m/s) em direção à costa em profundidades superiores a 25 m. Nesse mesmo período, a componente paralela à costa foi negativa (dirigida para sul) ao longo de toda a coluna de água, em um perfil cisalhante com menores intensidades próximo ao fundo (Figura 43f).

O padrão das correntes médias pode ser melhor investigado se for dividido em temporalmente em dois períodos: média de primavera e verão (aqui denominado de verão) abrangendo de novembro/2018 a março/2019 e o de outono e inverno (aqui denominado de inverno) contemplando os dados de abril/2019 a setembro/2019. O resultado das médias temporais por período é mostrado na Figura 44.

No verão a componente perpendicular à costa foi positiva (em direção ao oceano aberto) nos 20 m superficiais e negativa (em direção à costa) basicamente abaixo dos 25 m com intensidades menores que 0,1 m/s. Este padrão de circulação está de acordo com o processo de ressurgência costeira de Ekman (*upwelling*) forçado pela atuação da tensão de cisalhamento do vento do quadrante nordeste. Nele a água superficial é transportada em direção ao oceano aberto via transporte de Ekman e águas mais frias se deslocam em direção à costa próximo ao fundo. Esse padrão típico não ficou claramente evidente no inverno. Uma possibilidade é que o processo inverso, a subsidência costeira (*downwelling*) tenha ocorrido forçado pela tensão de cisalhamento do vento sul-sudeste. No entanto, o padrão sazonal de vento (Figura 8) mostra que o vento nordeste não desapareceu, mas sim que houve um aumento na ocorrência de ventos sul-sudeste. A inversão frequente no sentido da componente perpendicular à costa, isto é, valores positivos e negativos, pode resultar em um valor médio nulo ou próximo de nulo. Importante notar, também, que a componente continua negativa, embora ligeiramente menos intensa, abaixo dos 25 m de profundidade.

Figura 44: Fundeio 1 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de novembro/2018 a março/2019 (verão - esquerda) e de abril a setembro/2019 (inverno - direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.



Já para a componente paralela à costa (Figura 44) se observa que o padrão foi similar, isto é, corrente orientada para sudoeste, porém de menor magnitude. O resultado sugere, novamente, que a inversão de correntes forçada pela atuação de ventos sul/sudeste (Figura 8) seja a causa desta redução. O valor médio não muda de sentido porque, embora mais frequentes, os ventos do quadrante sul têm menor duração (em média 4 dias) comparativamente aqueles do quadrante norte. Além disso, se observa que o desvio padrão na componente paralela à costa é maior do que o da componente perpendicular à costa.

Retirando-se a influência de processos suprainerciais, dentre esses a variação da maré, foram observadas diferenças pequenas entre os valores dos dados brutos e as velocidades da escala subinercial locais (período inercial local aproximadamente 35 h) em ambos os períodos avaliados. O desvio-padrão das correntes brutas e subinerciais é parecido e a diferença está na ordem de 10^{-2} m/s em todo o perfil da componente perpendicular na ordem de 10^{-3} m/s para a componente paralela à costa. Esse resultado mostrou que ao longo de todo o período amostrado houve uma dominância da escala subinercial (associada essencialmente às variações de vento local e remoto) na variância de correntes na APA Costa das Algas e no RVS Santa Cruz.

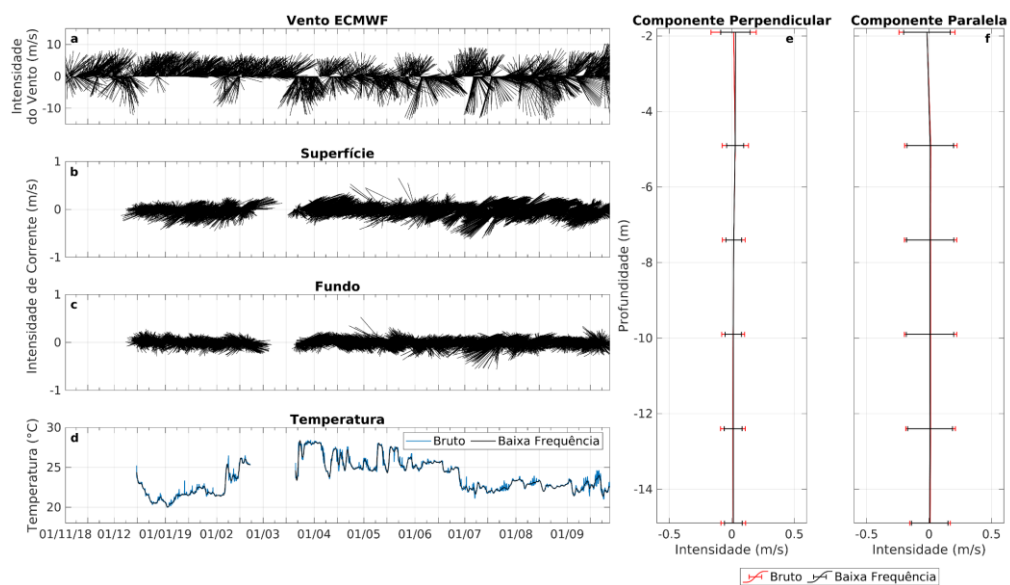
2.3.2 Fundeio 2 (F2)

O fundeio F2 está localizado na região ao sul da foz do Rio Doce em uma área denominada de *depocentro* (Bourguignon *et al.*, 2018) que é caracterizada por um grande depósito de lama proveniente do aporte do Rio Doce. Na primeira campanha, realizada no final de outubro para coleta de informações durante o mês de novembro, o perfilador de correntes foi perdido não havendo informações do período.

Dessa forma, o fundeio foi realocado da posição (19,71 °S /39,80 °O), passando para uma posição mais próxima à costa (19,71 °S /39,84 °O) e os dados foram coletados a partir de dezembro/2018. No mês de março/2019 o equipamento apresentou problemas e não houve coleta de dados correntométricos nesta posição.

De uma forma geral, as correntes medidas nesta posição apresentaram uma alta variabilidade direcional ao longo de toda a coluna d'água (Figura 45b-c), comparativamente maior que aquela observada na região da APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz (Fundeio F1) localizada ao sul deste ponto.

Figura 45: Fundeio 2 – Distribuição do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S e, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de dezembro/2018 a setembro/2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.

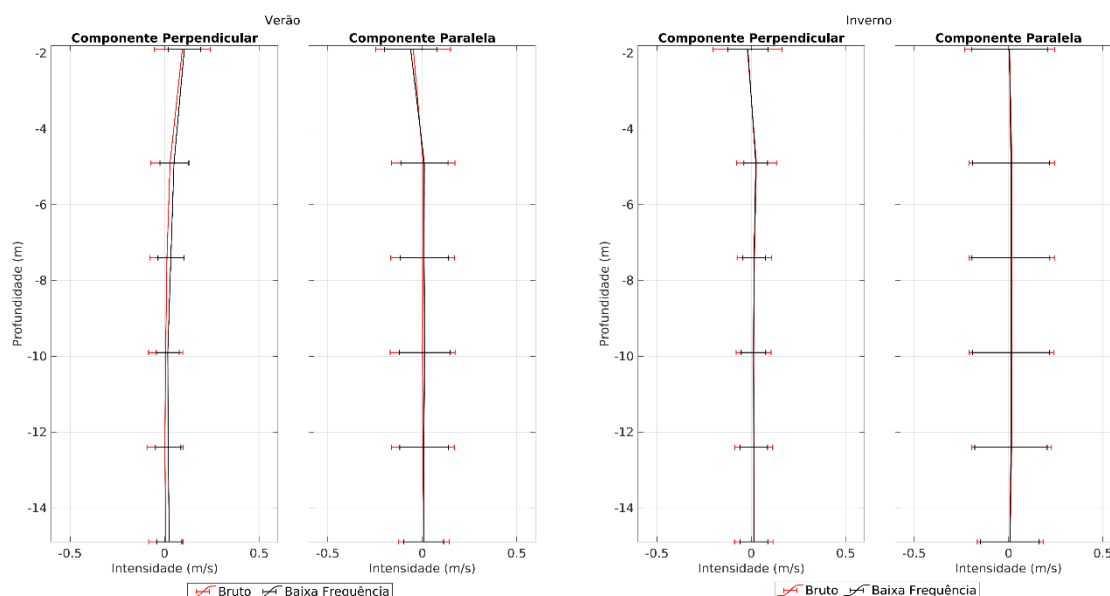


Em termos térmicos houve um aumento da temperatura da água próxima ao fundo a partir do dia 07 de fevereiro de 2019 que se estendeu até o início de julho, quando voltou a reduzir. Em função da grande variabilidade direcional das correntes é difícil associar um padrão de ressurgência ou subsidência costeira tal qual foi feito para o Fundeio F1. Diferente dele, no entanto, as correntes na foz do Rio Doce apresentaram no período de dezembro a setembro inversões constantes e muitas vezes diárias não refletidas na distribuição do vento (Figura 45a). Esse comportamento se manteve tanto na superfície quanto nas correntes próximas ao fundo e sugere que outros fatores possam condicionar esse padrão, como por exemplo, a própria configuração da linha de costa e a influência da vazão do Rio Doce que forma eventualmente uma feição ciclônica ao sul da foz, como descrito por Campos (2011). Como resultado, as intensidades médias de ambas as componentes de corrente foram próximas do zero, na O (10^{-2} m/s), em toda a coluna d'água (Figura 45e-f).

Analisando-se as componentes da corrente por período (Figura 46) observa-se uma alteração de direção em ambas as componentes nos primeiros 4 a 6 m de coluna de água, e na componente paralela à costa no restante da coluna de água. De qualquer forma, a baixa magnitude média das correntes refletiu exatamente a alta variabilidade direcional descrita previamente para todo o período analisado.

Comparando-se as médias e respectivos desvios-padrão das componentes paralela e perpendicular à costa entre os dados brutos e as correntes subinerciais - retirando a influência de processos de alta frequência como a maré - observou-se que os perfis apresentaram valores muito próximos e que o desvio padrão na componente paralela à costa é maior do que o da componente perpendicular à costa, semelhante ao que ocorre no Fundeio F1.

Figura 46: Fundeio 2 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de dezembro/2018 a março/2019 (esquerda) e de abril a setembro/2019 (direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.

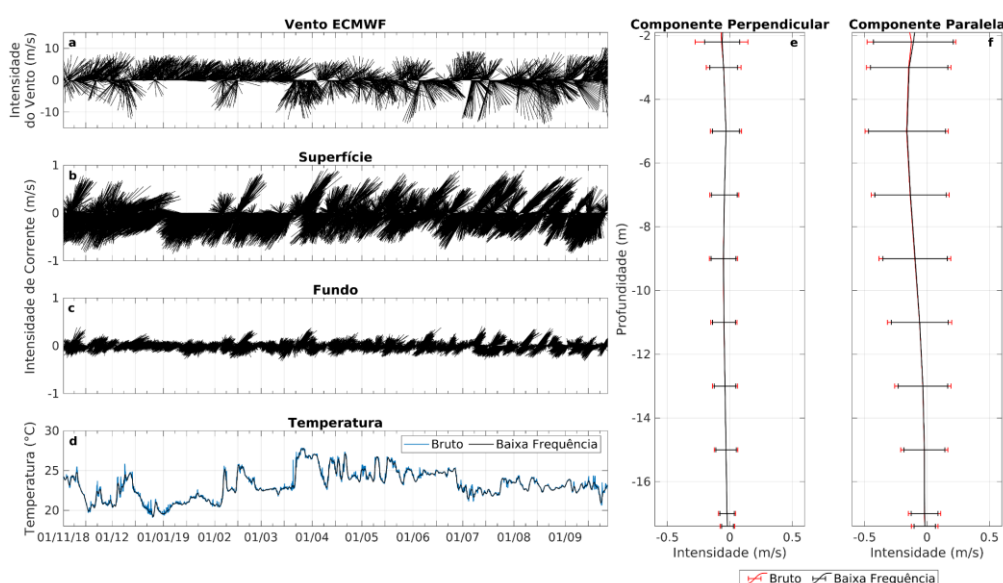


2.3.3 Fundeio 3 (F3)

A circulação costeira ao norte da Foz do Rio Doce (Povoação) – Figura 47 – apresentou semelhanças às correntes medidas na região da APA Costa das Algas (Figura 43). Contudo, as correntes nesta posição foram mais intensas. Assim, tal qual no Fundeio 1, as inversões de correntes ocorreram mais frequentemente no período de final de março a julho com durações mais longas do que aquelas observadas entre novembro e dezembro (Figura 47). A partir da segunda quinzena de dezembro até o início de fevereiro, as inversões foram eventuais e o fluxo tornou-se preferencialmente sudoeste, concordante com os ventos mais intensos norte-nordeste (Figura 47b). As correntes no fundo, no entanto, apresentaram uma variabilidade direcional maior quando comparadas às velocidades de fundo no Fundeio F1. Foi recorrente o padrão de longos período de ventos norte-nordeste produzindo uma componente perpendicular à costa negativa acompanhada de uma gradual diminuição de temperatura no fundo (Figura 47d). Durante a entrada de frentes e inversões de vento e corrente até meados de

março, as medições mostraram aquecimentos efêmeros da temperatura no fundo, a partir desse período a média da temperatura no fundo aumentou cerca de 2,5 °C. O aumento de temperatura acompanha o desenvolvimento de uma componente perpendicular à costa no fundo positiva (em direção *offshore*).

Figura 47: Fundeio 3 – Distribuição do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S e, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de novembro/2018 a julho/2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.

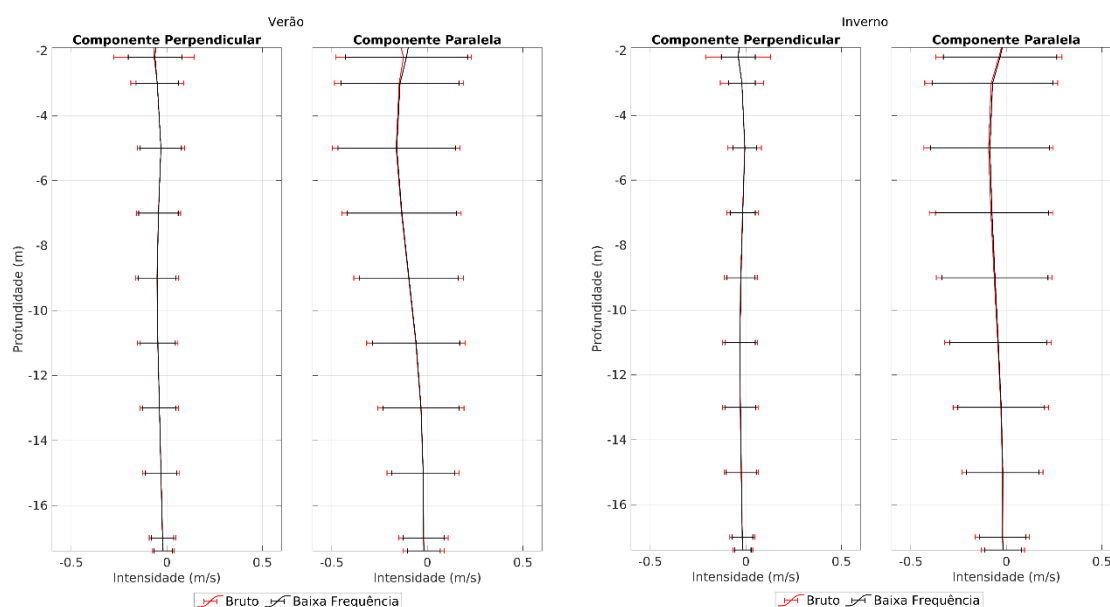


Como exemplificação destaca-se o ocorrido no final de março/2019. Em pouco mais de um dia (29 h) a temperatura no fundo passou de 22,8 °C para 27,4 °C em um aumento gradativo durante a passagem de uma frente fria que antecedeu a passagem da Tempestade Tropical IBA, (Figura 11) chegando a 27,9 °C em 25 de março.

As correntes médias apresentaram componentes de velocidade paralela e perpendicular à costa negativas ao longo de toda a coluna d'água (Figura 47e-f). Esse último é distinto daquele estimado para o Fundeio F1 (Figura 45e). Ainda que a componente paralela à costa seja igualmente negativa ao apresentado na Figura 45f, o cisalhamento vertical no perfil médio mostrado na Figura 47f é claramente maior, principalmente quando se compara o desvio padrão das medidas entre os primeiros e os últimos 5 metros da coluna de água.

Novamente, o perfil médio do período de inverno apresentou intensidades menores tanto na componente paralela quanto perpendicular à costa em relação ao observado no verão (Figura 48). No entanto, se destaca nesta figura que a componente perpendicular à costa no inverno tem média praticamente nula ao longo da coluna de água, à exceção dos primeiros 4 m superficiais. Além disso, o desvio padrão é significativamente reduzido nesta componente.

Figura 48: Fundeio 3 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de novembro/2018 a março de 2019 (esquerda) e de abril a julho/2019 (direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.

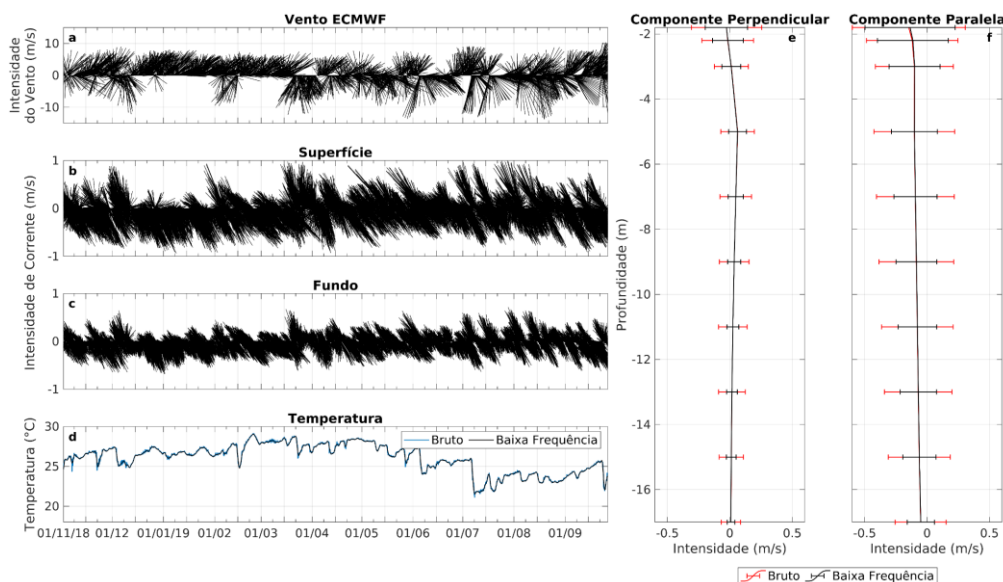


Apesar da diferença entre os valores de desvio-padrão da série bruta e da série filtrada em baixa frequência ser levemente maior para a componente paralela à costa, a magnitude da diferença está na $O(10^{-2} \text{ m/s})$, sugerindo novamente uma dominância da escala subinercial sobre a suprainercial na variância das correntes tal qual determinado para o Fundeio F1.

2.3.4 Fundeio 4 (F4)

O Fundeio F4 localizado na região próxima à praia de Degredo, no município de Linhares-ES, mostrou diferenças consideráveis na dinâmica local quando comparada aos demais fundeios. A Figura 49 mostra os resultados obtidos.

Figura 49: Fundeio 4 – Distribuição do (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S e, das correntes de (b) superfície e (c) fundo e da (d) temperatura próxima ao fundo. À direita são apresentados os perfis médios das componentes da velocidade (e) perpendicular e (f) paralela à costa no período de novembro/2018 a setembro/2019. As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.



Comparativamente aos Fundeios F1 e F3, o padrão das correntes foi quase que verticalmente homogêneo. Embora se identifique uma coerência entre o padrão de vento e corrente semelhante ao observado nos fundeios F1 e F3, sobre o sinal de baixa frequência forçado pelo vento, há a sobreposição de um sinal semidiurno associado à oscilação da maré na região. O resultado implica em mudanças de alta frequência na intensidade das correntes locais, tanto em superfície quanto no fundo (Figura 49), que impõem uma alternância de sentido na direção sudeste-noroeste. As correntes na superfície tiveram picos de magnitude superior a 0,9 m/s e superior a 0,6 m/s no fundo.

Em média, a componente paralela à costa foi determinante na direção e sentido da corrente medida no Fundeio F4, enquanto que perpendicularmente ela foi negativa nos primeiros 3 m e positiva no restante da coluna (Figura 49e-f). Esse padrão de circulação está de acordo com o padrão térmico amostrado na água próxima ao fundo.

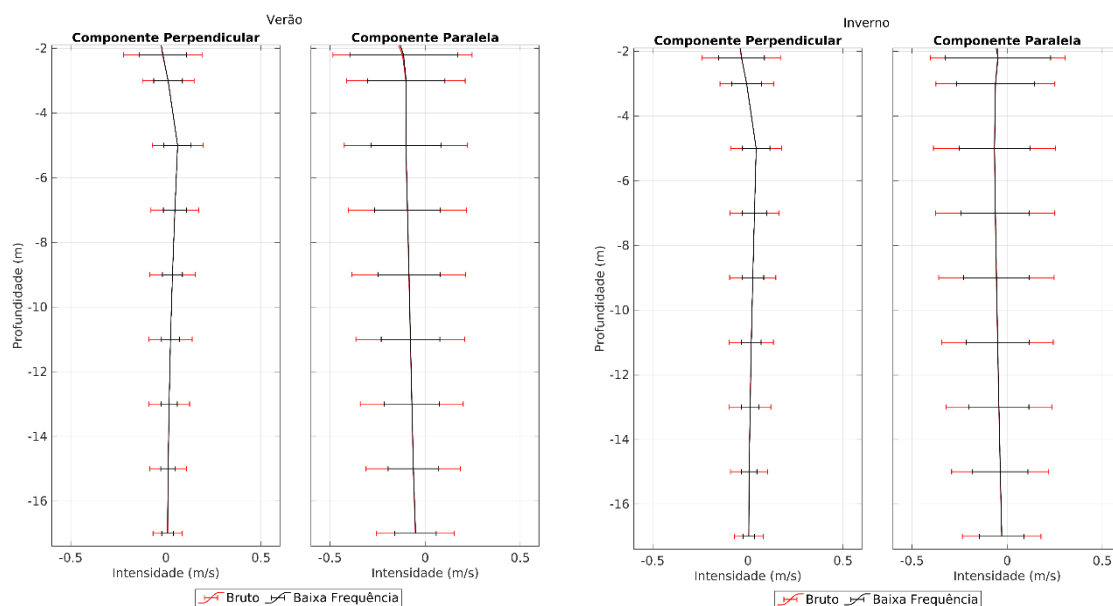
A temperatura de fundo no fundeio F4 se comportou de forma inversa e com menor variabilidade em relação aos demais fundeios. Aumentos de temperatura medidos no fundeio F4 foram acompanhados de decaimentos quase simultâneos da temperatura nos demais fundeios, e vice-versa. No período de primavera-verão a temperatura no Fundeio F4 foi mais elevada comparativamente aos demais, com média em torno de 26,5 °C, com máxima em 29 °C e mínima em 24,3 °C (Figura 49d). No período de outono-inverno, a temperatura em F4 tendeu a diminuir, com a mínima chegando a 21 °C, enquanto a temperatura dos demais fundeios aumentava, perdurando um comportamento oposto ao observado nos demais fundeios. Esse resultado sugere que essa seja uma região limítrofe de dinâmica complexa

entre a presença de águas mais frias ao sul daquelas mais quentes ao norte. A comparação entre o padrão de temperatura no fundo nos quatro fundeios é apresentada no Item 2.3.5.

As médias das componentes da corrente paralela e perpendicular à costa para os períodos de primavera-verão e outono-inverno é apresentada na Figura 50. Enquanto o padrão encontrado para a componente perpendicular à costa se manteve similar nos dois períodos, a componente paralela foi significativamente distinta no inverno, já que ela foi praticamente nula ao longo da coluna de água refletindo a grande variabilidade temporal no sentido desta componente da corrente.

A análise comparativa do desvio-padrão da série de dados brutos e das correntes subinerciais mostrou uma diferença significativa ao longo da coluna d'água. Enquanto na região da APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz e próximo à foz do Rio Doce a variabilidade das correntes subinerciais era responsável pela maior parte do desvio em torno das correntes médias, na região de Degredo as componentes suprainerciais exerceram um papel importante na variabilidade total das correntes locais (Figura 49e-f e Figura 50).

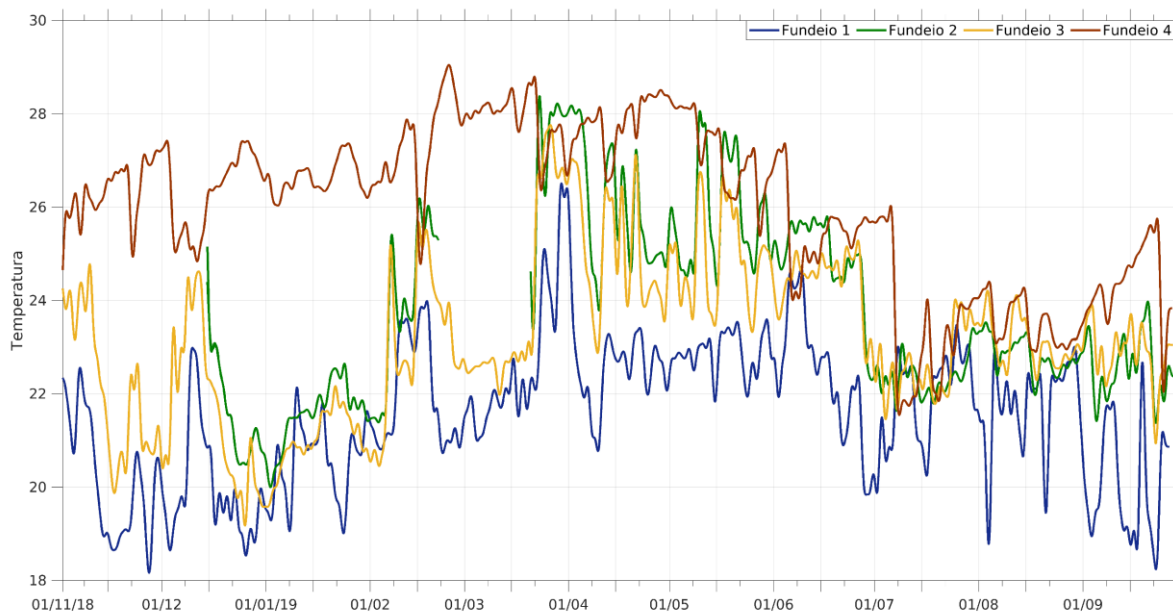
Figura 50: Fundeio 4 – Perfis médios das componentes da velocidade perpendicular e paralela à costa no período de novembro/2018 a março/2019 (esquerda) e de abril a setembro/2019 (direita). As barras horizontais vermelhas (dados brutos) e pretas (baixa frequência) sobrepostas representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas.



2.3.5 Análise da variação temporal da temperatura de fundo nos fundeios

Dos quatro fundeios, o primeiro foi instalado em maior profundidade, em torno de 42 m, na APA Costa das Algas. Os três demais estão fundeados em torno de 15 a 16 m de profundidade. Como esperado a temperatura no fundeio mais profundo (F1) é a menor delas e a do Fundeio F4 a maior delas (Figura 51).

Figura 51: Distribuição temporal da temperatura junto ao fundo nos Fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de novembro/2018 a setembro/2019.



Embora, em média, a temperatura de fundo nos fundeios F2 e F3 seja 2 °C maior do que aquela medida no fundeio F1, os três padrões são coerentes, mas distintos da temperatura medida no Fundeio F4. Ainda como caracterização geral se observa que no verão as temperaturas foram as menores, relativamente em cada série temporal, os maiores valores foram medidos durante o outono (abril a junho) e voltaram a reduzir a partir de julho. Esse padrão reflete a dinâmica oceânica condicionada pelo balanço do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera (Figura 6) mencionada previamente.

As menores temperaturas no verão decorrem, basicamente, do processo de ressurgência costeira na região, processo mais nitidamente visualizado nos dados correntométricos do Fundeio F1 do que nos Fundeios F2 e F3. A menor temperatura do registro no Fundeio F1 foi de 18,3 °C, índice térmico característico da água de ressurgência – a Água Central do Atlântico Sul – sobre a plataforma continental. Nessa mesma data a temperatura no Fundeio F4 estava acima dos 27 °C gerando uma diferença de 9 °C entre os dois pontos. Surpreendentemente, a diferença foi praticamente nula entre os mesmos dois pontos no início de abril/2019 ou inverteu ($T_{F1} > T_{F4}$) no dia 08 de junho/2019.

A correlação cruzada entre as temperaturas medidas nos Fundeios F1 e F3 os quais apresentam uma visível coerência ao longo do tempo, apresentaram valores de 0,77. Essa mesma comparação entre esses fundeios nos períodos de primavera-verão e outono-inverno mostram valores menores (0,65 e 0,62 respectivamente). Já a correlação das séries de temperatura em F1 e F3 com F4, que aparentemente apresentou um padrão de temperatura oposto aos demais fundeios, apresentaram valores de 0,05 de correlação entre F1 e F4 e 0,08 entre F3 e F4. Os valores dessas correlações aumentaram quando as séries temporais de temperatura foram divididas em períodos, apresentando

valores de correlação de 0,15 no período de primavera-verão e 0,14 em outono-inverno entre as séries de F1 e F4 e, valores de 0,44 e 0,53 pra os mesmos períodos entre F3 e F4.

Uma análise mais cuidadosa mostra a série temporal como uma sequência de eventos de resfriamento (aquecimento) térmico, ou pulsos de resfriamento (aquecimento), condicionados basicamente, mas não somente, pela atuação da tensão de cisalhamento do vento nordeste. Os aumentos (quedas) de temperatura podem ser de mais de 4 °C em questão de horas (por exemplo, 22 de março/2019 e 07 de julho/2019).

A entrada de frentes frias associada com a reversão do padrão de ventos induziu aumento na temperatura dos Fundeios F1, F2 e F3 e redução no Fundeio F4 (por exemplo, no dia 10 de dezembro/2018 e 15 de fevereiro/2019). Uma possível explicação para esse padrão é que os ventos oriundos do quadrante sul, favoráveis à subsidência costeira, tendem a afundar água quente superficial. Ao mesmo tempo, essa tensão de cisalhamento do vento advectaria águas relativamente mais frias para norte diminuindo a temperatura no Fundeio F4.

O padrão observado na Figura 51 sugeriu que a região ao norte da foz do Rio Doce até Degredo seja uma área limítrofe entre dois padrões termohalinos e/ou dinâmicos cuja complexidade ainda necessita ser plenamente compreendida.

2.3.6 Ondas

Entre novembro/2018 e setembro/2019 foram realizadas medições de ondas de gravidade superficiais na região entre a APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz e Degredo. Devido à perda de um dos perfiladores acústicos durante a campanha de novembro/2018, as medições de ondas no fundeio F2 estão disponíveis apenas a partir de dezembro/2018. Em uma análise conjunta das alturas significativas de ondas (H_s) e período de pico (T_p) em relação às direções de pico (Figura 52 e Figura 53), os quatro fundeios apresentam resultados semelhantes. As ondulações com maiores valores de altura significativa (> 3 m) e período de pico (> 15 s) concentraram-se nos quadrantes SE-S e SE-E. Ondulações < 3 m apresentaram um espalhamento direcional maior, compreendendo desde ondas do quadrante S até o quadrante NE-N.

Figura 52: Distribuição de alturas significativas de ondas (Hs) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para todo o registro (novembro/2018 a setembro/2019). Em F2, o registro inicia-se em dezembro/2018. As cores representam as faixas de variação de valores de Hs.

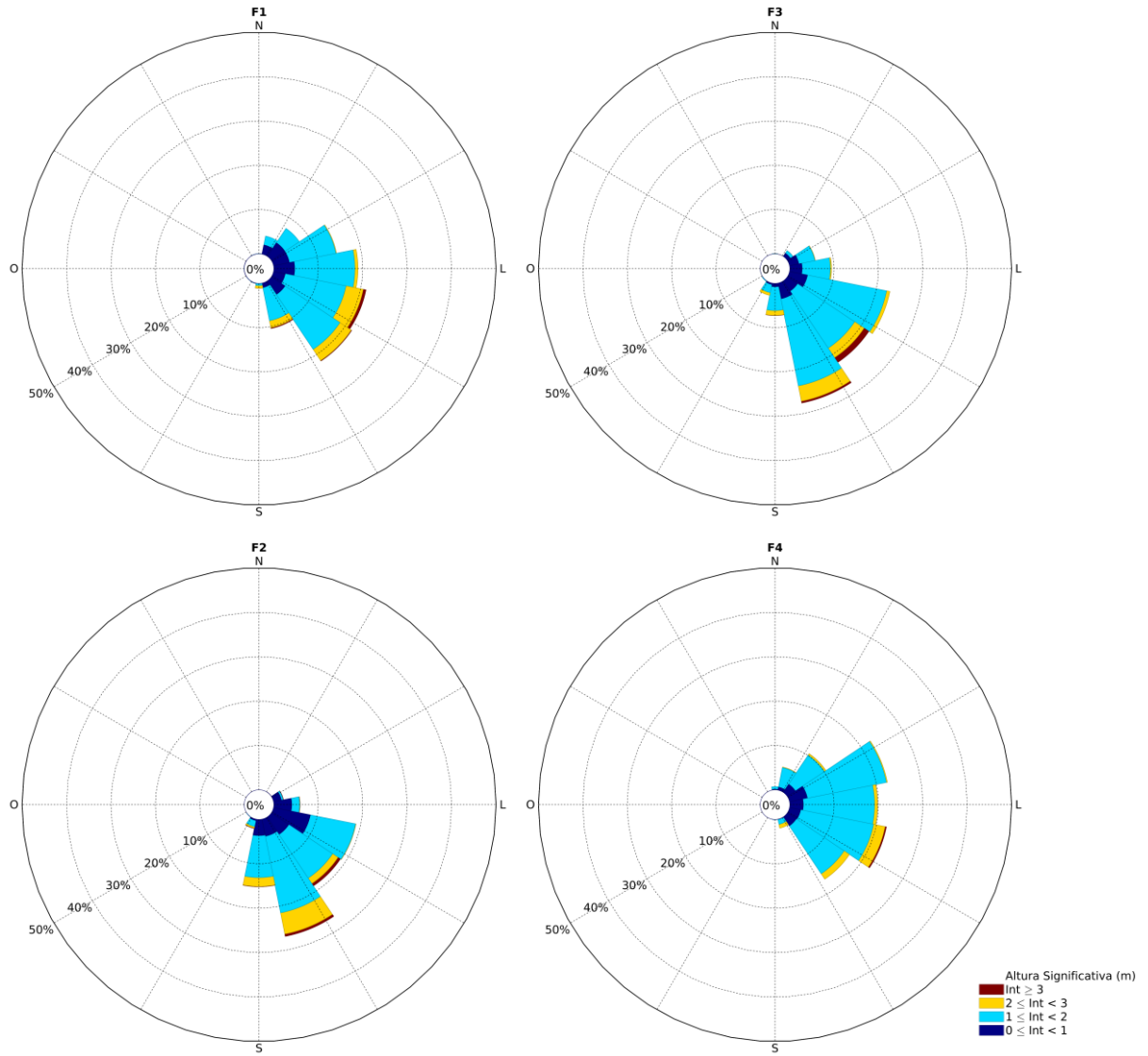
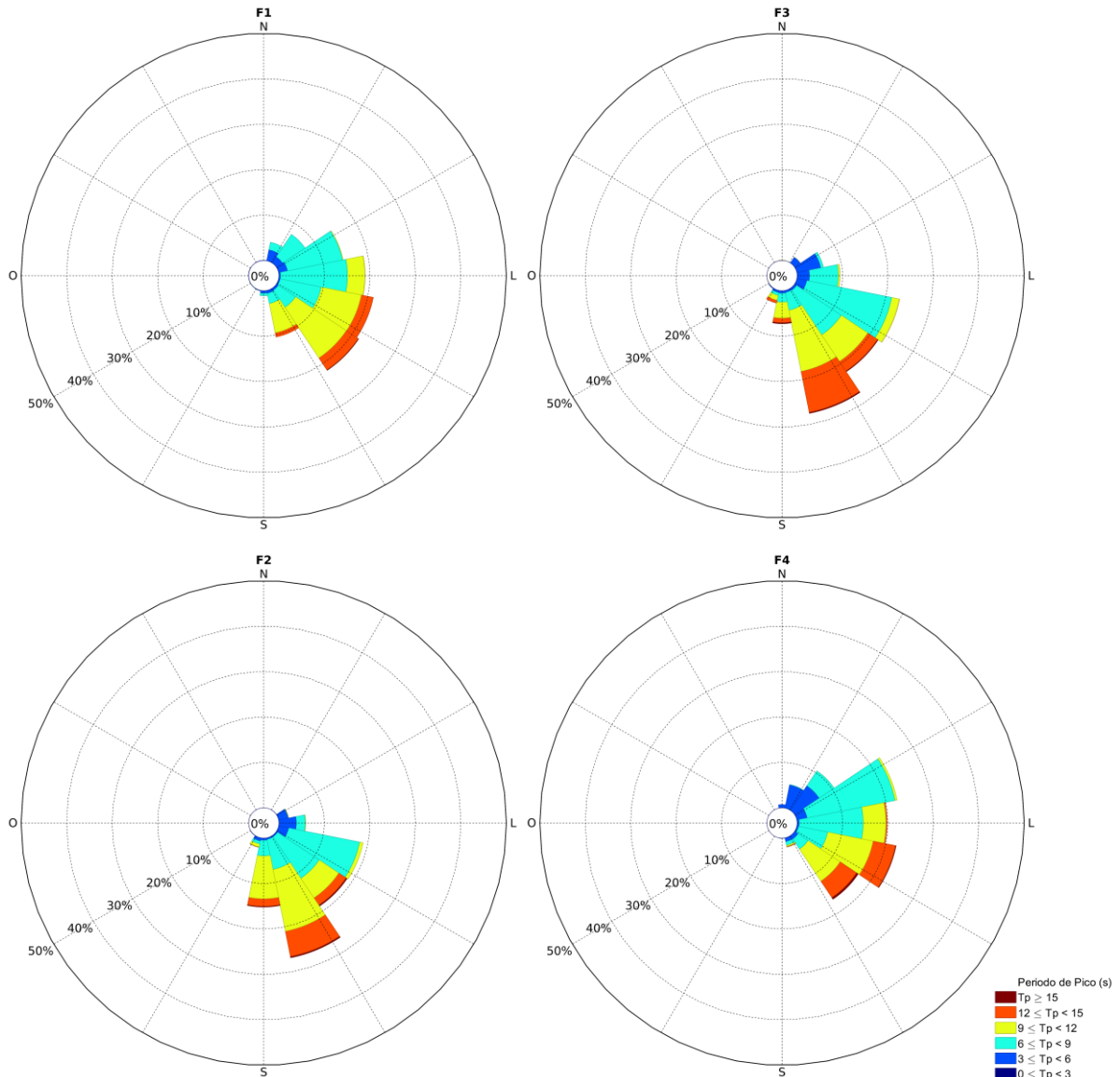


Figura 53: Distribuição de período de pico de ondas (T_p) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para todo o registro (novembro/2018 a setembro/2019). Em F2, o registro inicia-se em dezembro/2018. As cores representam as faixas de variação de valores de T_p .



No entanto, é possível apontar algumas diferenças regionais das ondas, destacando-se as diferenças nas direções de pico em F2 se comparadas àquelas dos demais fundeios. Em F2, a direção de propagação das ondas concentra-se nos quadrantes entre E e S, enquanto nos demais pontos ondas de NE podem ocorrer. Essa diferença está intimamente ligada à inflexão da linha de costa da região de F2, próxima à Foz do Rio Doce, que cria uma zona abrigada em F2 para ondulações de NE. Outra influência a ser considerada na análise direcional das ondas é a refração. Os Fundeios F1, F2, F3 e F4 encontram-se posicionados aproximadamente sobre as isóbatas de 44 m, 16 m, 18 m e 18 m, respectivamente. A partir da teoria linear de ondas, calcula-se o comprimento de ondas de período ~ 12 s para águas profundas $L = \frac{gT^2}{2\pi} = 224 \text{ m}$, sendo L o comprimento de onda, g aceleração da gravidade e T o período das ondas. Considerando que $0,04 < \frac{h}{L} < 0,5$ (sendo h a profundidade local) representa

uma faixa de profundidades intermediárias na qual efeitos como refração e empinamento das ondas tornam-se importantes, profundidades a partir de 112 m já representam o limite para a transformação das ondas de período de ~12 s ao se propagarem para as regiões mais rasas da plataforma continental. Portanto, mesmo algumas ondas com período inferior a 12 s já chegam aos locais dos fundeios transformadas pela refração e empinamento.

Separando-se temporalmente as características das ondas de gravidade para o período primavera-verão (de novembro/2018 a março/ 2019) e outono-inverno (de abril/ 2019 a setembro/ 2019), a análise direcional de altura significativa (Figura 54) e período de pico (Figura 55) mostra mudanças significativas entre as estações. Os maiores períodos de ondas e altura significativa ocorreram no período de outono-inverno, associados principalmente a chegada de ondulações remotas decorrentes da presença de sistemas frontais na região sul da costa brasileira. As ondulações com maiores valores de altura significativa (> 3 m) e período de pico (> 15 s) ocorreram somente no outono-inverno, indicando que as condições hidrodinâmicas desse período apresentam maior energia e, por consequência, maior capacidade de remobilização do fundo marinho nas áreas adjacente à foz do Rio Doce. O Quadro 1 sumariza os principais parâmetros de onda, destacando os valores para todo o registro e para outono-inverno e primavera-verão. Destaca-se que o maior valor de altura de ondas no registro ocorreu no período de outono-inverno em F3 com valor de 7,9 m e período máximo de 20,1 s em F1.

Figura 54: Distribuição de alturas significativas de ondas (Hs) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para verão (à esquerda) e inverno (à direita). As cores representam as faixas de variação de valores de Hs.

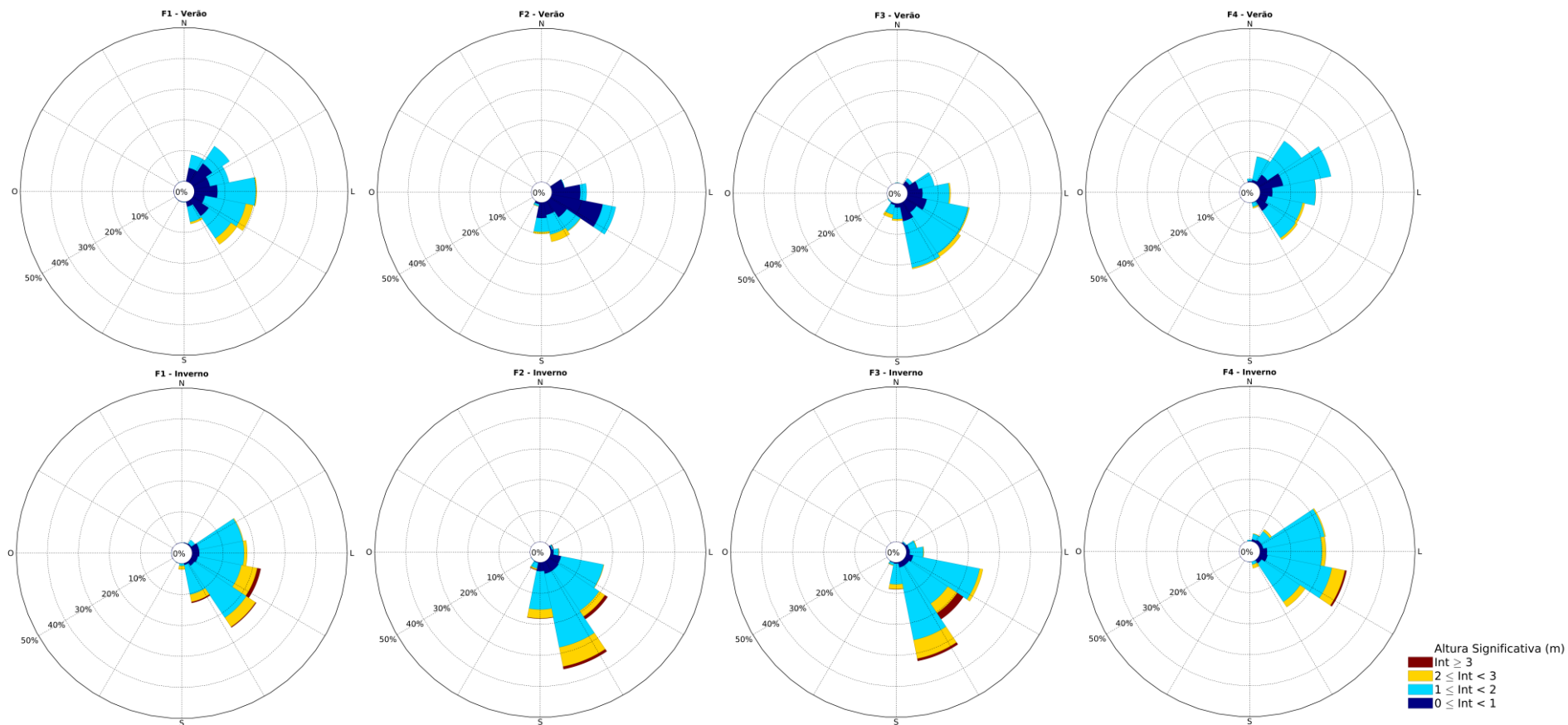
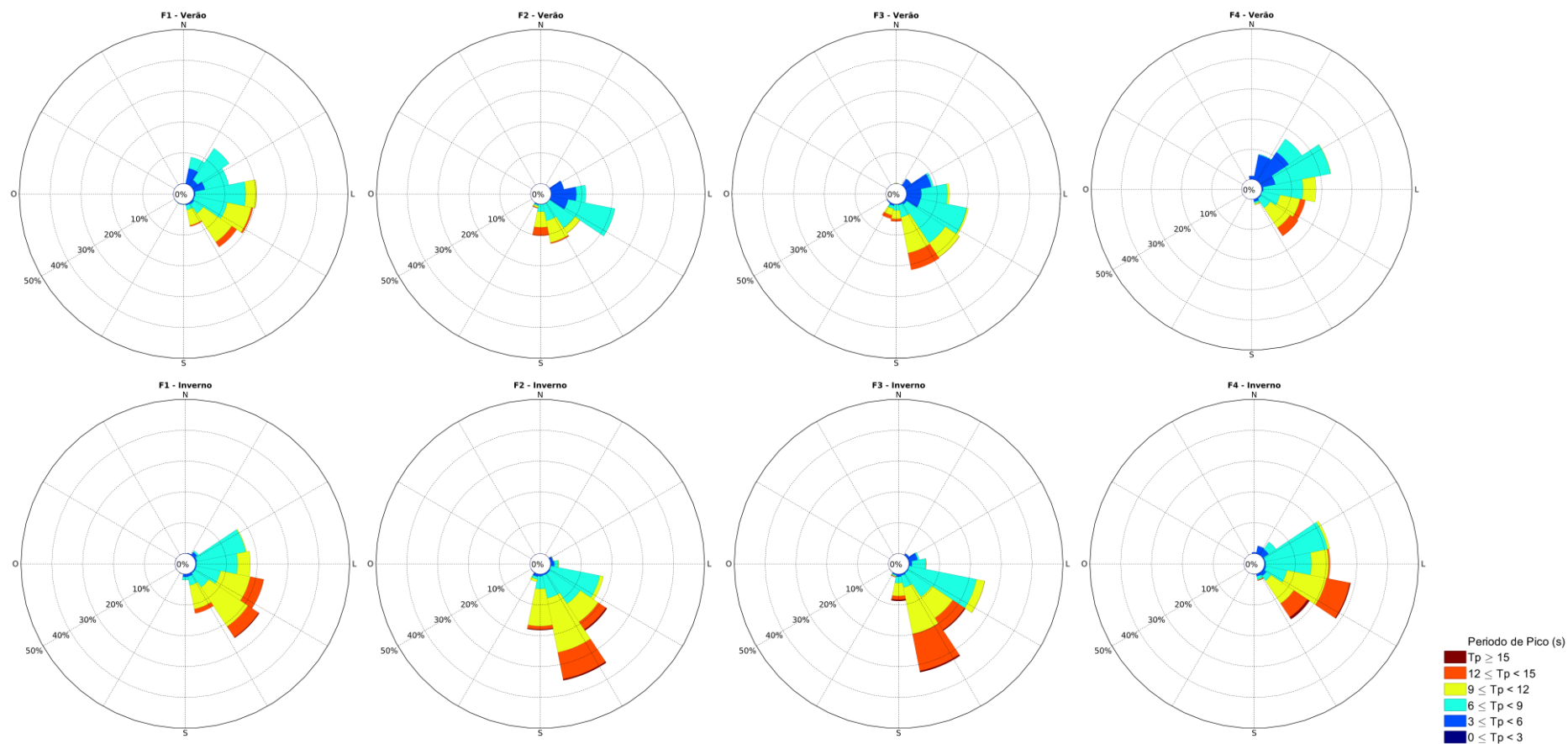


Figura 55: Distribuição de período de pico de ondas (T_p) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para verão (à esquerda) e inverno (à direita). As cores representam as faixas de variação de valores de T_p .



Quadro 1: Estatísticas de altura significativa (Hs), período de pico (Tp) e direção de pico (Dp) das ondas para cada um dos fundeios, para todo o período de observação, para os intervalos primavera-verão e outono-inverno. As colunas de valores máximos (*) apresentam os valores de Hs e Tp máximos e entre parênteses o maior valor individual de altura e período de onda (Hmáx e Tmáx).

		Total			Primavera e Verão			Outono e Inverno		
		Média (Desvio)	90° Percentil	Máximo*	Média (Desvio)	90° Percentil	Máximo*	Média (Desvio)	90° Percentil	Máximo*
Fundeio 1	Hs (m)	1,33 (0,49)	2,01	3,59 (6,00)	1,12 (0,41)	1,80	2,92 (4,61)	2,52 (0,53)	2,25	3,59 (6,00)
	Tp (s)	8,6 (2,1)	11,5	15,8 (20,5)	8,05 (1,98)	10,95	13,59 (14,2)	12,05 (2,09)	12,05	15,8 (20,5)
	Dp (°)	103 (38)	-	-	93 (41)	-	-	113 (32)	-	-
Fundeio 2	Hs (m)	1,33 (0,54)	2,05	4,25 (7,1)	1,08 (0,4)	1,75	2,92 (4,51)	1,45 (0,55)	2,26	4,25 (7,1)
	Tp (s)	8,93 (2,4)	12,25	17,56 (17,95)	7,7 (2,3)	11,5	15,05 (-)	9,5 (2,25)	12,63	17,56 (17,95)
	Dp (°)	142 (31)	-	-	129 (34)	-	-	148 (26)	-	-
Fundeio 3	Hs (m)	1,4 (0,55)	2,00	6,02 (7,91)	1,22 (0,35)	1,7	2,83 (4,40)	1,55 (0,62)	2,24	6,02 (7,91)
	Tp (s)	8,8 (2,6)	12,5	17,83 (17,8)	8,04 (2,48)	11,73	15,12 (15,6)	9,6 (2,5)	13,09	17,83 (17,8)
	Dp (°)	131 (34)	-	-	127 (38)	-	-	136 (29)	-	-
Fundeio 4	Hs (m)	1,34 (0,40)	1,81	5,82 (4,82)	1,22 (0,31)	1,61	2,67 (4,56)	1,44 (0,44)	2,04	5,82 (4,82)
	Tp (s)	8,44 (2,5)	12,1	17,1 (17)	7,6 (2,3)	11,34	15,09 (15,0)	9,16 (2,5)	12,71	17,08 (17,0)
	Dp (°)	90 (34)	-	-	82 (36)	-	-	97 (29)	-	-

A evolução das características médias mensais das ondas reflete as mudanças oceânicas e atmosféricas que ocorrem com as estações do ano, alterando as chegadas dispersivas de ondas remotas, intensificando processos de entradas de frentes atmosféricas que geram essas ondulações remotas e alterando os ventos locais que geram o mar local e quase-local na região. Em todos os fundeios, com exceção de F2, os maiores valores de altura significativa de ondas médias mensais ocorreram em julho/2019, durante o inverno (Figura 56 e Figura 57). Os menores valores ocorrem no período de janeiro a fevereiro para todos os fundeios.

Figura 56: Evolução mensal da média de altura significativa de ondas nos fundeios F1 e F2, com os respectivos desvios-padrão.

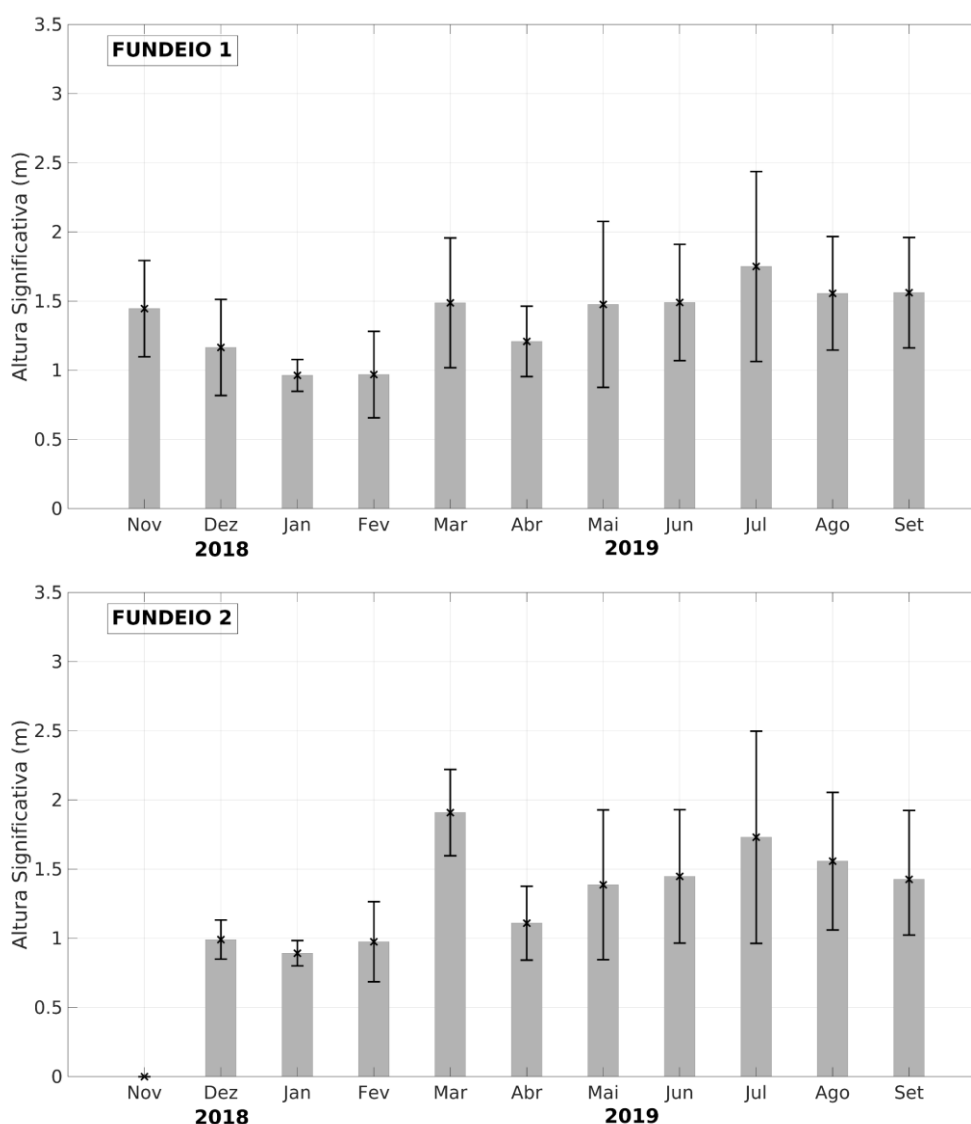
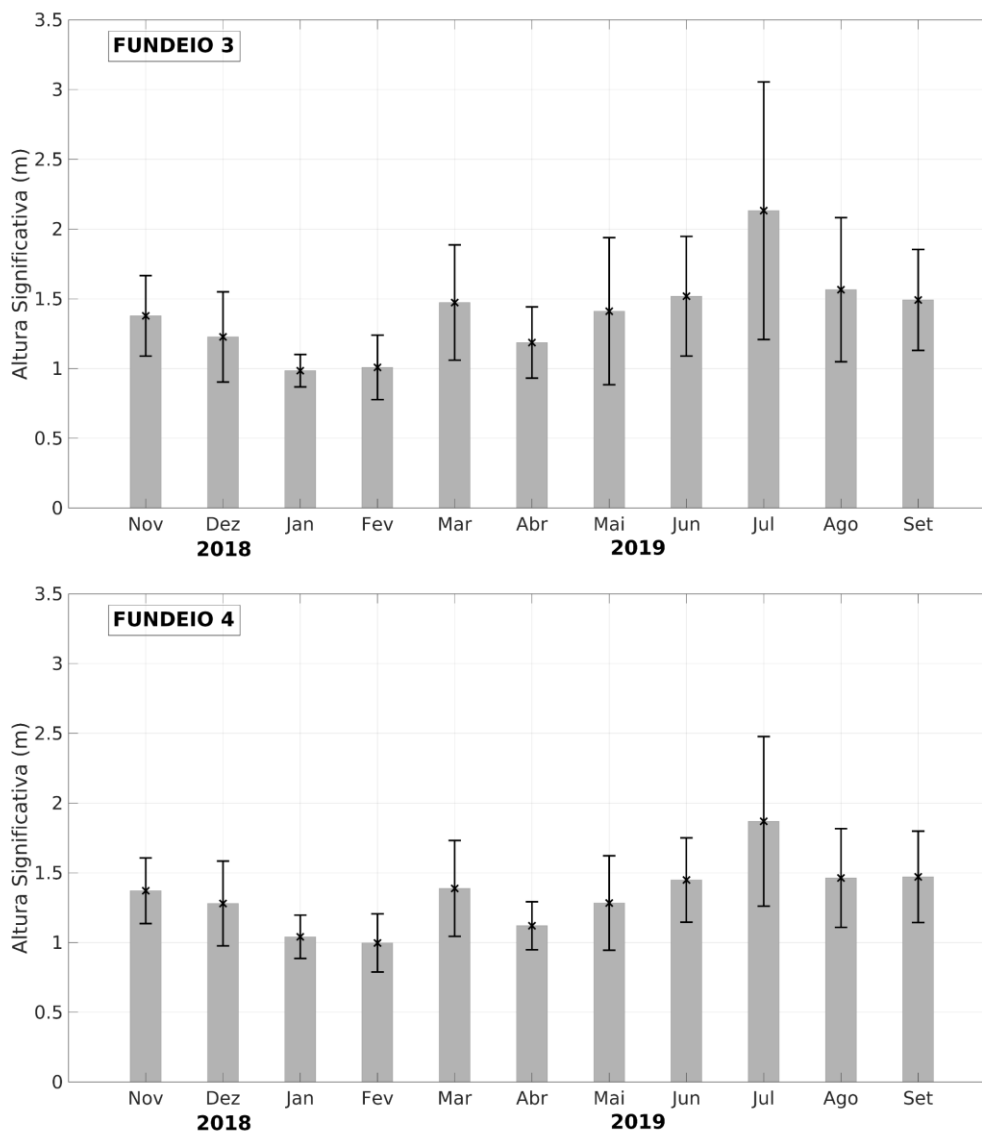


Figura 57: Evolução mensal da média de altura significativa de ondas nos fundeios F3 e F4, com os respectivos desvios-padrão.



No entanto, é importante destacar que em março/2019 todos os fundeios apresentaram maiores valores médios de altura significativa se comparados a abril, fugindo da tendência de progressivo aumento de altura com o do final do verão para o início do outono. Na segunda quinzena de março ocorreu na região a Tempestade Tropical Iba, que alterou os ventos na região, antecedido por um evento de entrada de frente fria. A subsequência desses eventos manteve durante cerca de 15 dias a altura significativa de ondas acima de 1,5 m na região, com picos de Hs próximos de 3 m. Embora os valores de Hs não tenham sido os maiores do registro de ondas nos 4 fundeios ao longo dos 9 meses, a duração de cerca de 15 dias de valores elevados de Hs pode ter ocasionado uma constante remobilização do fundo, diferente dos episódicos aumentos de Hs devido a entrada exclusiva de frentes frias, que costumam elevar os valores de Hs na região por, no máximo, 5 a 6 dias. As medições nos 4 fundeios

mostram um aumento da turbidez no fundo que durou cerca de 11 dias durante a segunda quinzena de março.

Semelhante ao Hs, a evolução mensal do período de pico (Figura 58 e Figura 59) mostra um progressivo aumento dos valores a partir do final do verão e início do outono, com valores máximos de Hs ocorrendo em julho nos 4 fundeios (~10 s). Com exceção de F2, os menores valores de Tp mensais ocorreram em janeiro/2019. Na análise direcional mensal (Figura 60 e Figura 61) destaca-se a característica em F4 de um mar com direção média mensal de E. Em março, a influência do lba não foi tão clara nos parâmetros Tp e Dp.

Figura 58: Evolução mensal da média do período de pico nos fundeios F1 e F2, com os respectivos desvios-padrão.

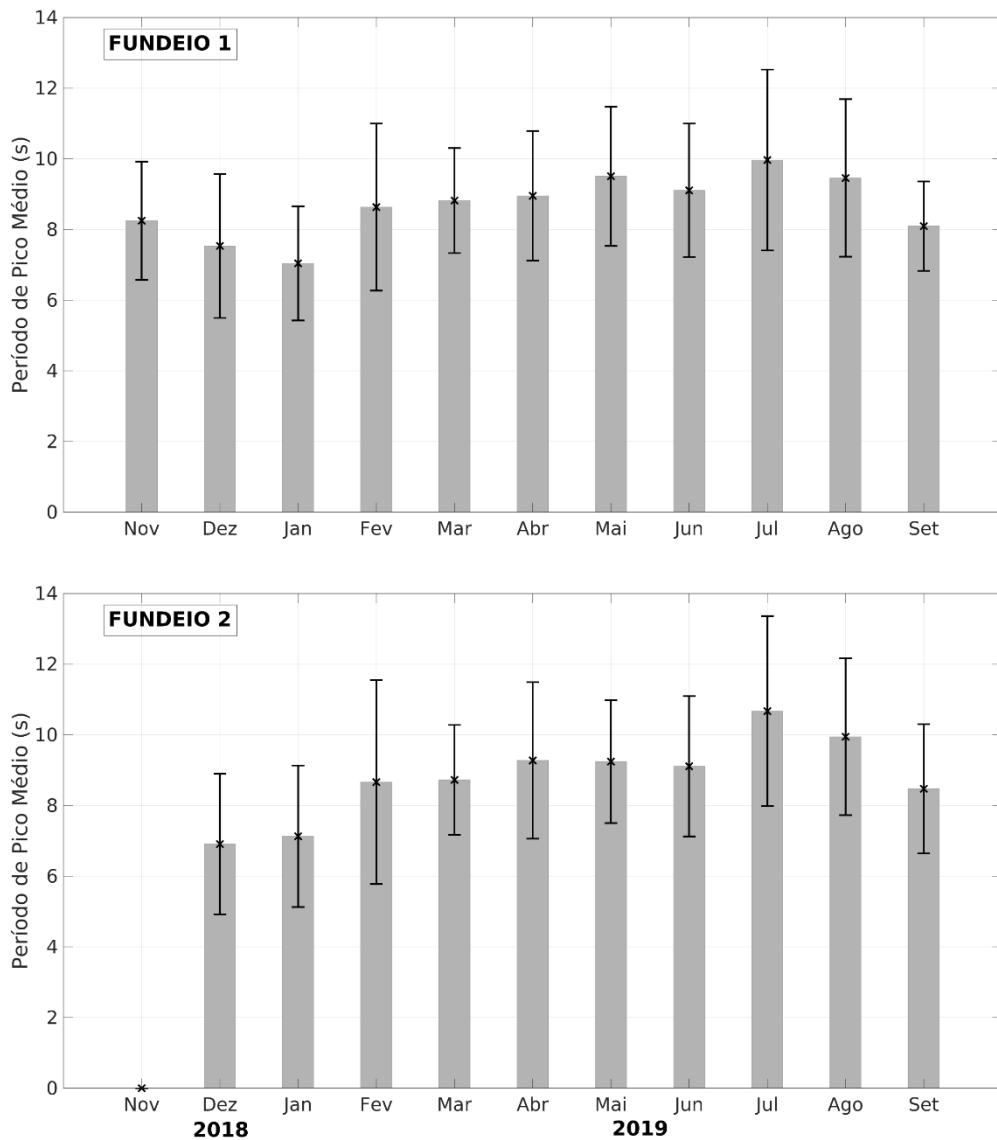


Figura 59: Evolução mensal da média do período de pico nos fundeios F3 e F4, com os respectivos desvios-padrão.

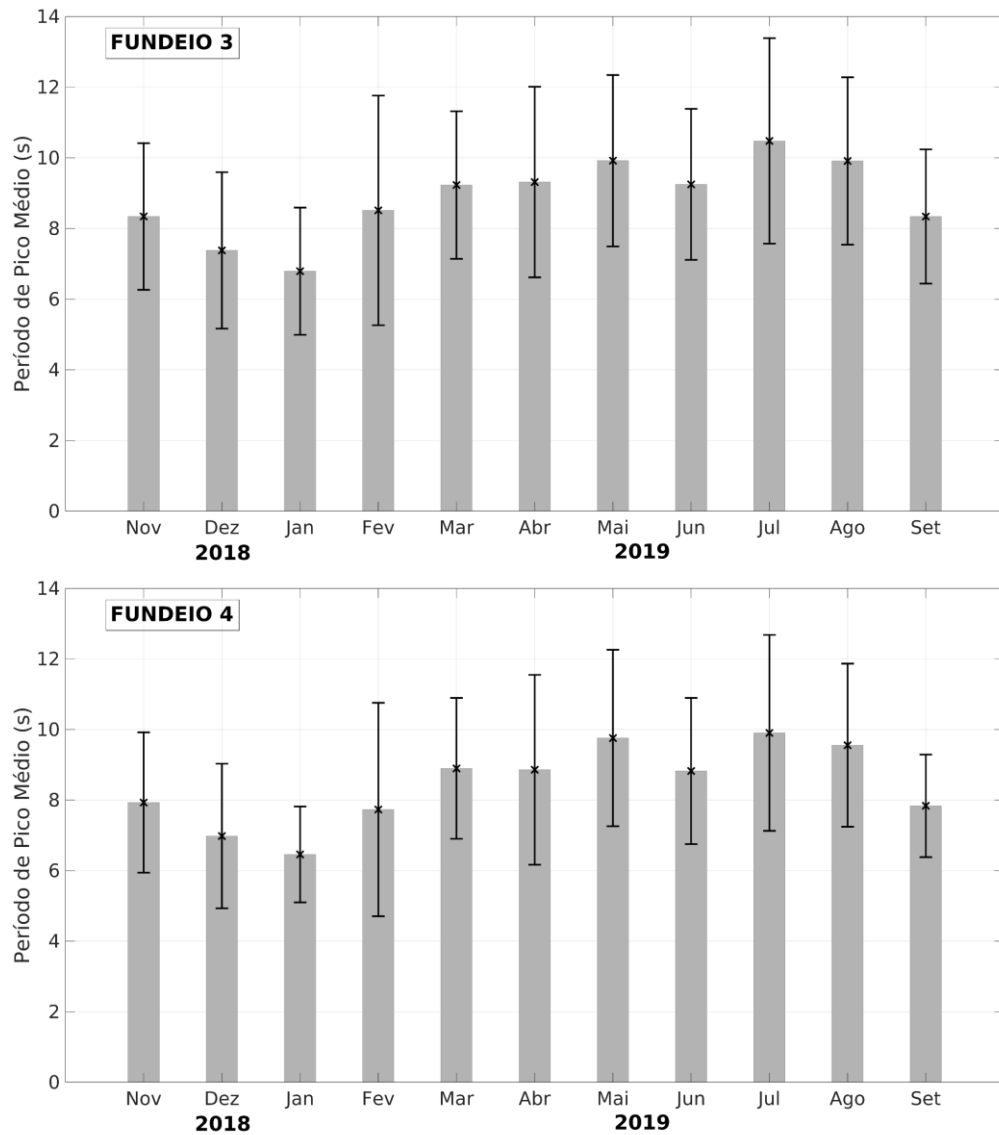


Figura 60: Evolução mensal da média da direção de pico nos fundeios F1 e F2, com os respectivos desvios-padrão.

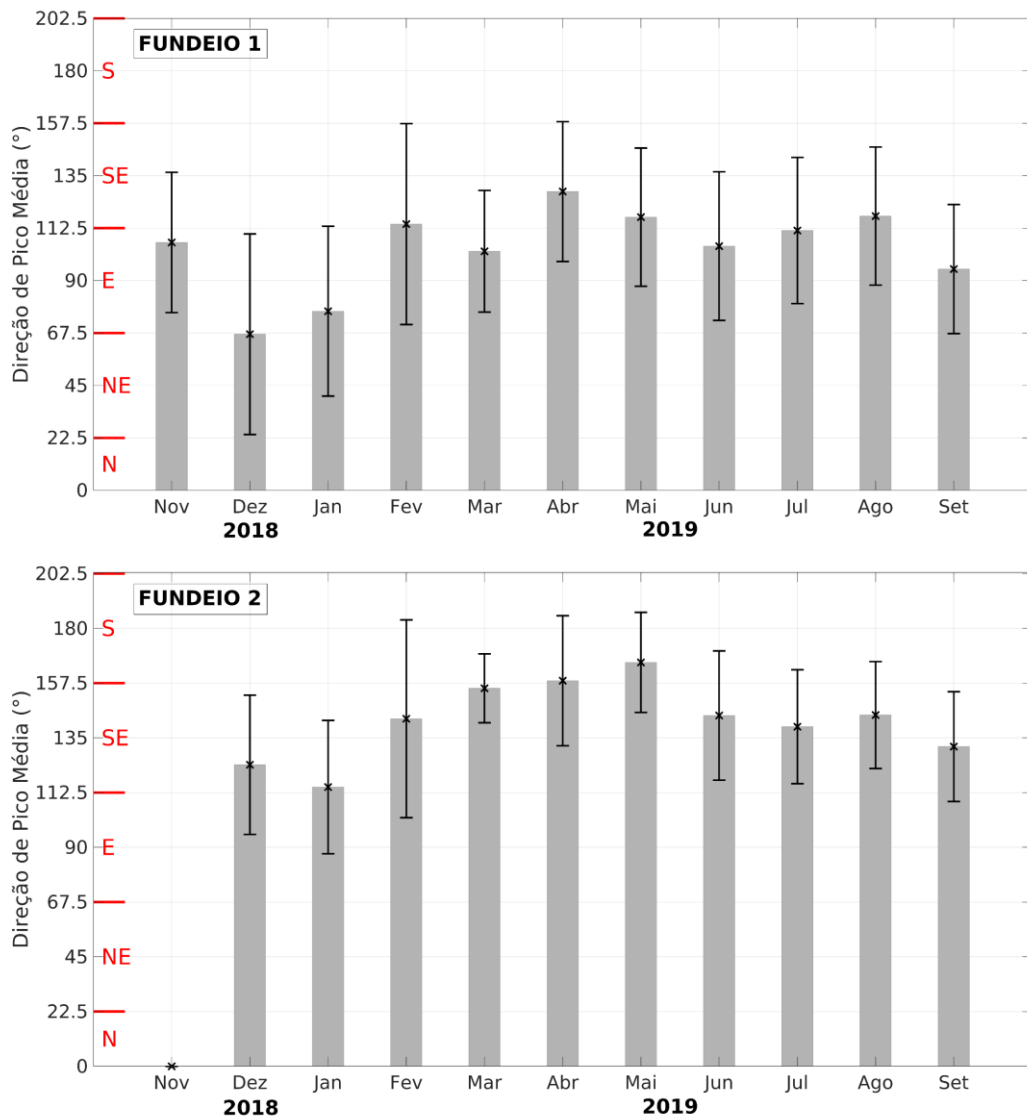
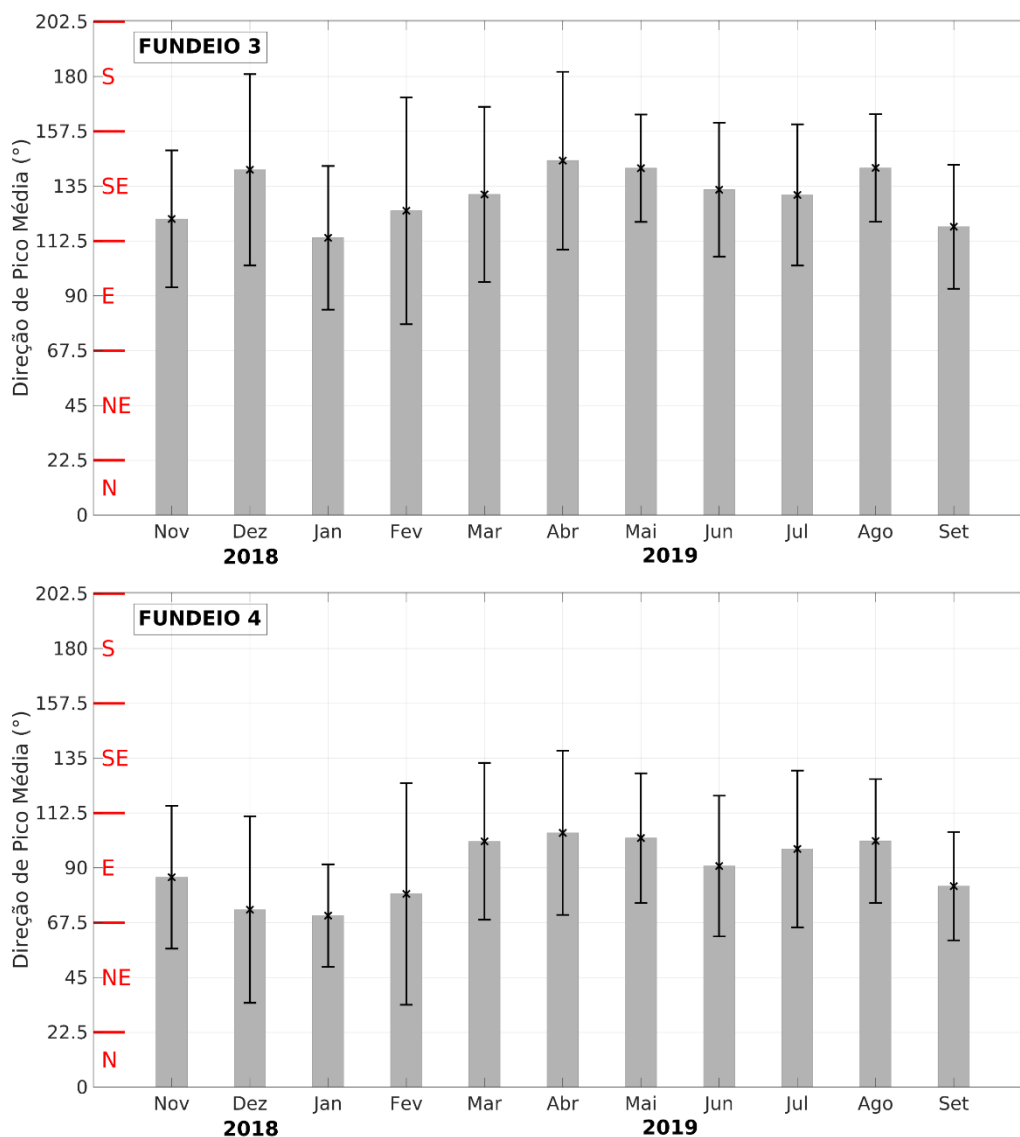


Figura 61: Evolução mensal da média da direção de pico nos fundeios F3 e F4, com os respectivos desvios-padrão.



A influência do Iba torna-se um pouco mais clara no registro de ondas quando se analisam faixas de variação de Hs, Tp e Dp dentro de cada mês (Figura 62). Para simplificar a análise, apresentam-se apenas resultados para F1. No mês de março, embora as faixas de Hs não mostrem claramente a influência da tempestade tropical, os parâmetros de Tp e Dp mostram mudanças significativas. Há um aumento da ocorrência de ondas com período de 8 - 10 segundos e ondas de E. Parte significativa dessa mudança ocorreu devido ao posicionamento do Iba, que gerou ventos intensos (>10 m/s) de leste na região, gerando um mar quase-local e local com valores de Hs expressivos com períodos entre 8-10s. Essa influência também se observa na distribuição mensal de limiares de Hs em F1 (Figura 63). No mês de março, ondas com Hs superior a 2 m apresentaram frequência relativa superior aos meses de fevereiro e abril. A Figura 63 também revela que valores de Hs superiores a 3 m ocorreram apenas a partir de maio/2019.

Figura 62: Ocorrência (em %) de faixas de Hs (superior), de Tp (central) e de Dp (inferior) para cada mês entre novembro/2018 e setembro/2019 em F1. As cores representam cada faixa de variação de Hs, de Tp e de Dp.

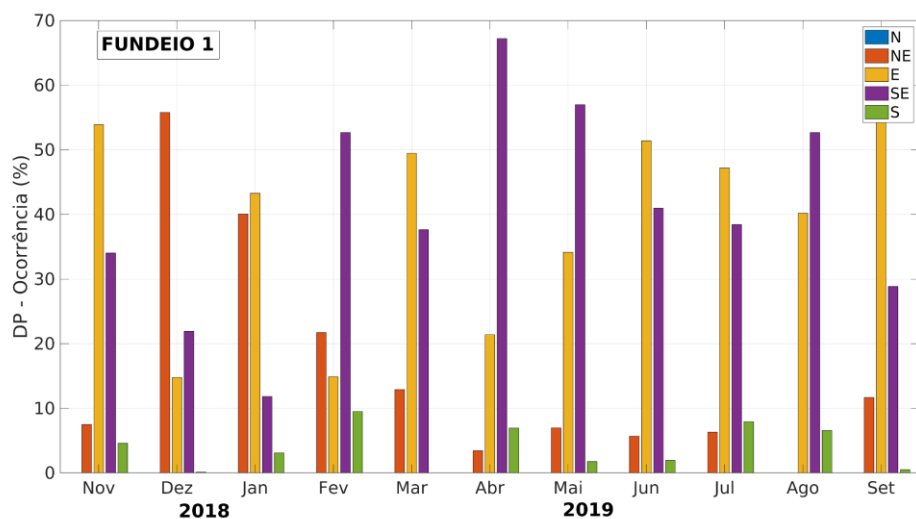
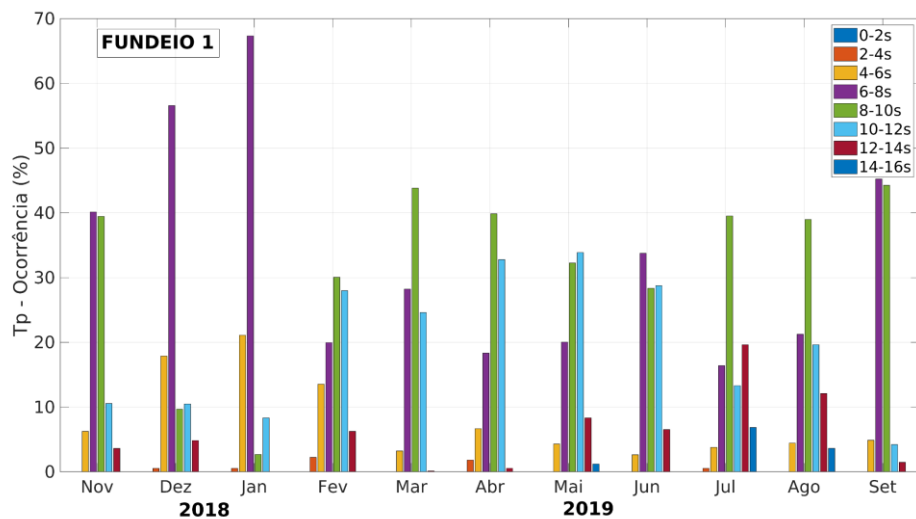
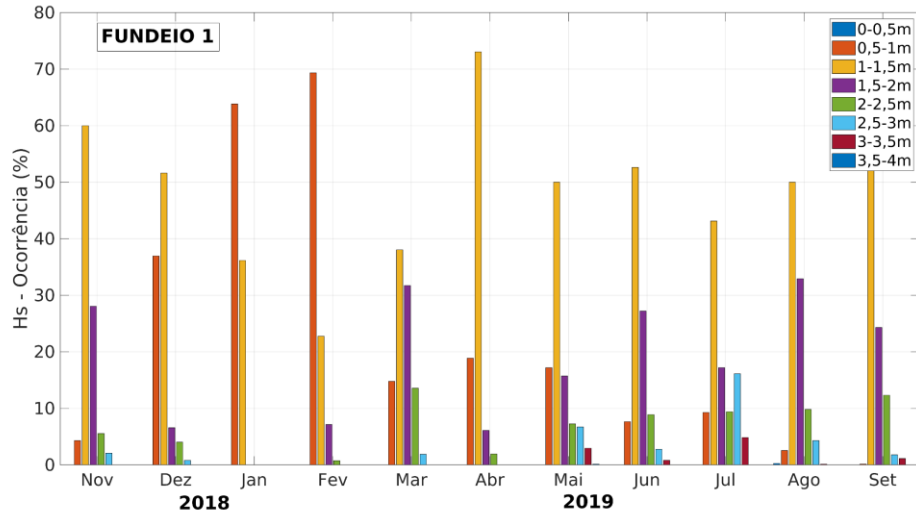
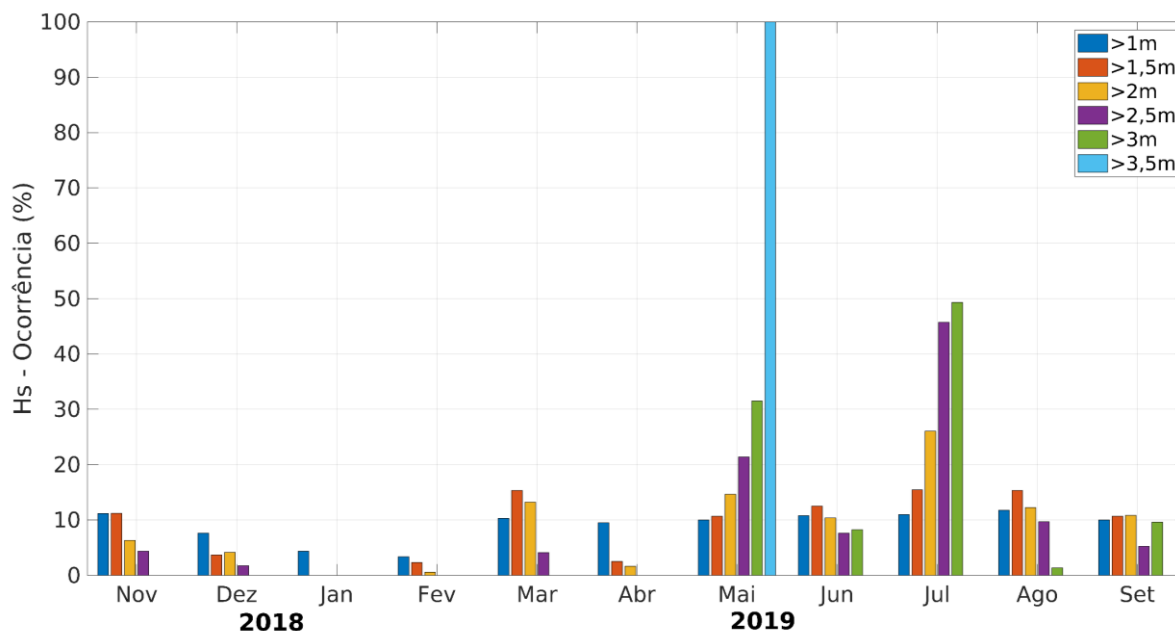


Figura 63: Ocorrência (em %) de limiares de Hs para cada mês entre novembro de 2018 e setembro de 2019 em F1. As cores representam cada limiar considerado.



2.3.7 Comparação dos períodos de variabilidade das correntes nos fundeios F1, F2, F3 e F4

A seção anterior analisou as observações realizadas nas quatro diferentes áreas, descrevendo as principais características e evolução temporal do registro de correntes e temperatura junto ao fundo em cada um dos locais. Nesta seção são apresentadas comparações entre as diferentes áreas, analisando os principais períodos de variabilidade e relacionando-os às principais forçantes regionais.

As correntes superficiais médias nas quatro regiões apresentaram um alinhamento paralelo às isóbatas, com uma rotação da direção do vetor médio conforme a batimetria local. As correntes médias superficiais na APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz apresentaram uma magnitude de 0,38 m/s no período de primavera-verão, e de 0,25 m/s no período de outono-inverno. Em ambos os períodos, o sentido médio foi para sul (Quadro 2). A região de lançamento do fundeio F2, ao sul da Foz do Rio Doce, apresentou os menores valores de corrente média superficial, de aproximadamente 0,14 m/s no período de primavera-verão e, 0,2 m/s no período de outono-inverno. A média no período de primavera-verão foi para sul e a moda para SW. Já no período de outono-inverno a média foi para SE e moda para E. Destaca-se que neste período não houve ao longo do registro uma clara direção preferencial das correntes na região. Ao norte da foz do Rio Doce a corrente média superficial mostrou valores maiores se comparado ao sul da foz, com magnitude de 0,39 m/s no período de primavera-verão e 0,3 m/s no período de outono-inverno, com orientação preferencial para sudoeste em ambos os períodos. Na região de Degredo, as correntes superficiais apresentaram magnitudes médias de 0,3 m/s e orientação para sul no período de primavera-verão e, 0,28 m/s com orientação para sudoeste, apresentando o menor espalhamento direcional das 4 regiões.

As correntes junto ao fundo apresentaram mudanças em relação às correntes superficiais, tanto na direção quanto na magnitude das correntes. As correntes médias nos fundeios F1, F2, F3 e F4 apresentaram magnitudes inferiores às de superfície, com valores médios de 0,13 m/s, 0,16 m/s, 0,11 m/s e 0,18 m/s respectivamente (Quadro 2).

Quadro 2: Medidas estatísticas de corrente superficial e de fundo de cada fundeio para o período total amostrado e particionado-o para os períodos primavera-verão e outono-inverno.

			Total			Primavera-Verão			Outono-Inverno		
			Média	Desvio Padrão	Moda	Média	Desvio Padrão	Moda	Média	Desvio Padrão	Moda
F1	Sup	Dir(°)	190 (S)	73	198 (S)	193 (S)	61	198 (S)	187 (S)	82	200 (S)
		Int(m/s)	0,31	0,19	0,29	0,37	0,21	0,13	0,26	0,16	0,16
	Fun	Dir(°)	176 (S)	87	224 (SW)	181 (S)	82	212 (SW)	173 (S)	91	231 (SW)
		Int(m/s)	0,14	0,08	0,13	0,13	0,06	0,13	0,14	0,09	0,11
F2	Sup	Dir(°)	161 (S)	88	68 (E)	170 (S)	83	231 (SW)	155 (SE)	90	68 (E)
		Int(m/s)	0,19	0,14	0,1	0,15	0,1	0,13	0,21	0,15	0,1
	Fun	Dir(°)	180 (S)	94	73 (W)	188 (S)	93	279 (W)	174 (S)	95	72 (E)
		Int(m/s)	0,16	0,09	0,14	0,13	0,08	0,14	0,18	0,1	0,17
F3	Sup	Dir(°)	183 (S)	89	206 (SW)	198 (SW)	77	209 (SW)	171 (S)	97	206 (SW)
		Int(m/s)	0,35	0,2	0,38	0,38	0,19	0,38	0,3	0,2	0,16
	Fun	Dir(°)	185 (S)	99	220 (SW)	198 (SW)	99	220 (SW)	173 (S)	99	219 (SW)
		Int(m/s)	0,11	0,06	0,09	0,11	0,06	0,09	0,11	0,07	0,07
F4	Sup	Dir(°)	213 (SW)	87	162 (S)	199 (S)	81	166 (S)	224 (SW)	90	162 (S)
		Int(m/s)	0,29	0,19	0,13	0,3	0,19	0,21	0,28	0,18	0,13
	Fun	Dir(°)	219 (SW)	93	162 (S)	215 (SW)	87	164 (S)	222 (SW)	98	162 (S)
		Int(m/s)	0,18	0,12	0,08	0,2	0,13	0,08	0,17	0,11	0,1

Na APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz e ao sul e norte da foz do Rio Doce, houve uma rotação da direção principal das correntes entre superfície e fundo, aumentando a contribuição das componentes perpendiculares à costa no período de primavera-verão (Figura 64, Figura 65 e Figura 66). Já para a região de Degredo (Figura 67), as diferenças de direção e magnitude das correntes entre superfície e fundo foram comparativamente menores e as mudanças ocorreram ao longo da coluna d'água inteira, com pequeno cisalhamento vertical de correntes. Nessa região, a direção preferencial foi noroeste-sudeste sem um sentido preferencial bem definido. Esse comportamento das correntes reflete uma forte influência de forçantes suprinerciais, como a maré, em toda a coluna d'água. Além disso, destaca-se que as correntes junto ao fundo em F4 têm maior intensidade se comparadas aos demais fundeios. O fundeio F2 permaneceu sem uma direção preferencial bem definida, porém com uma tendência para oeste no período de primavera-verão e leste no outono-inverno.

Figura 64: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeio F1.

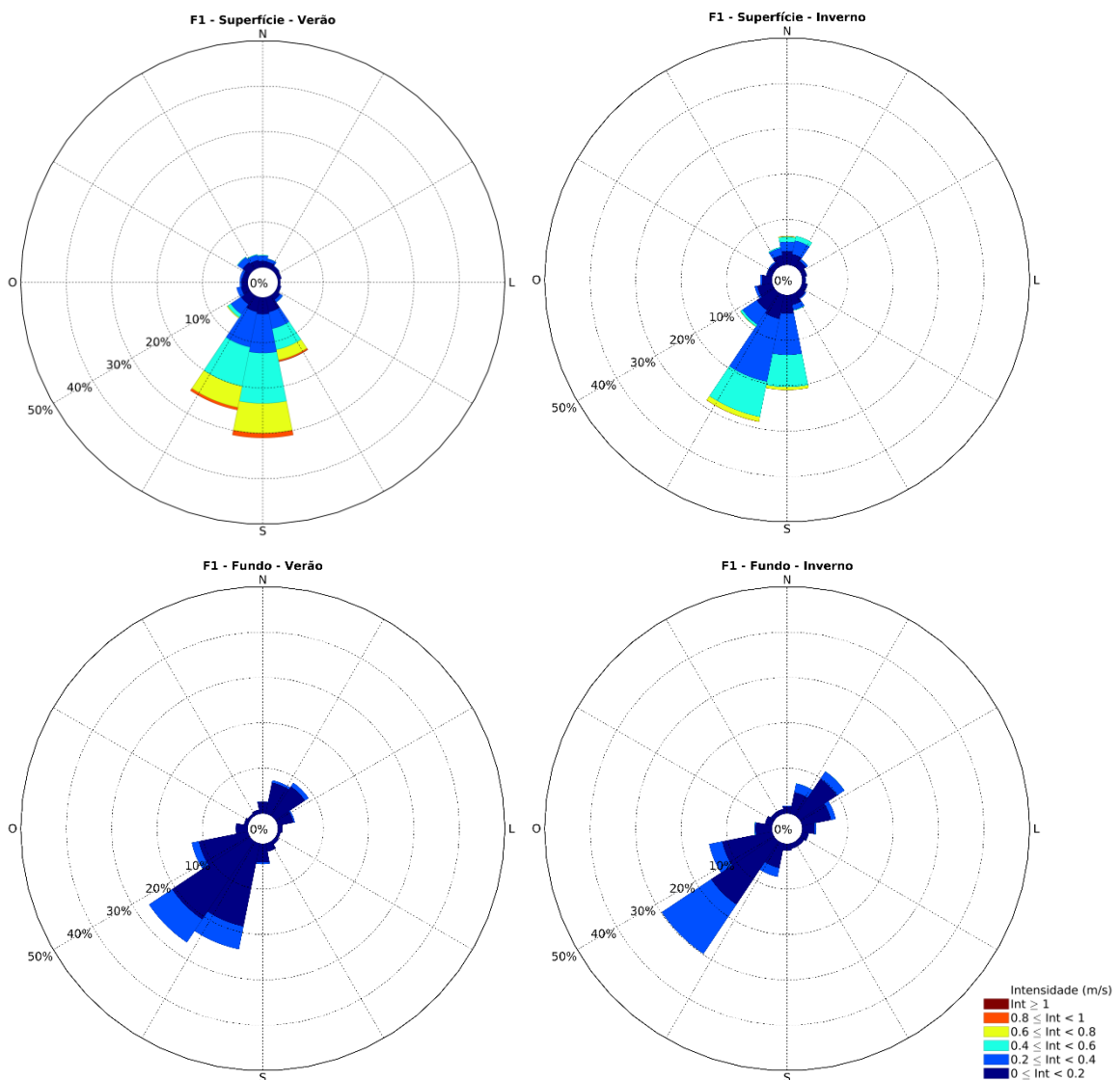


Figura 65: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeiros F2.

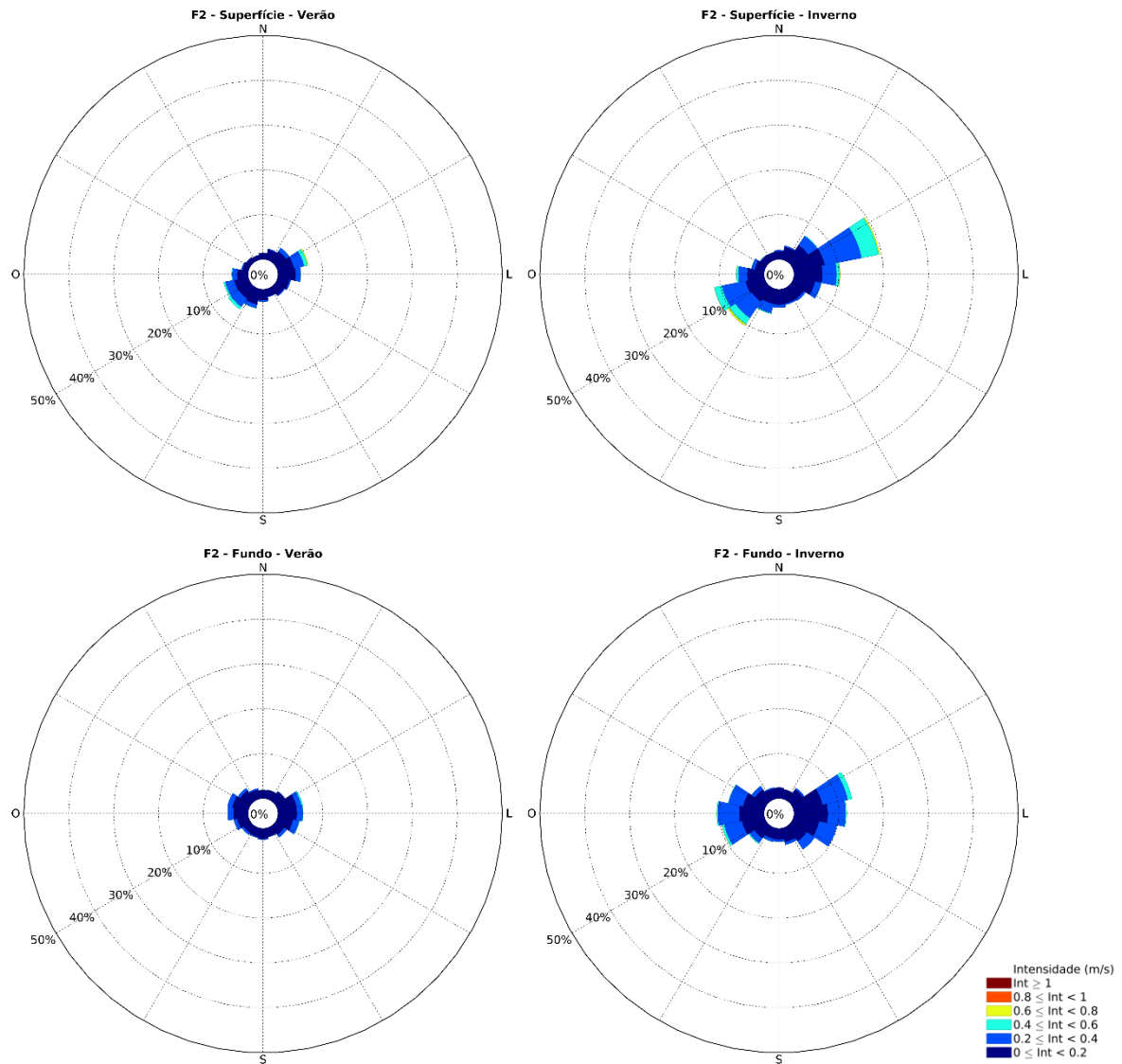


Figura 66: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeio F3.

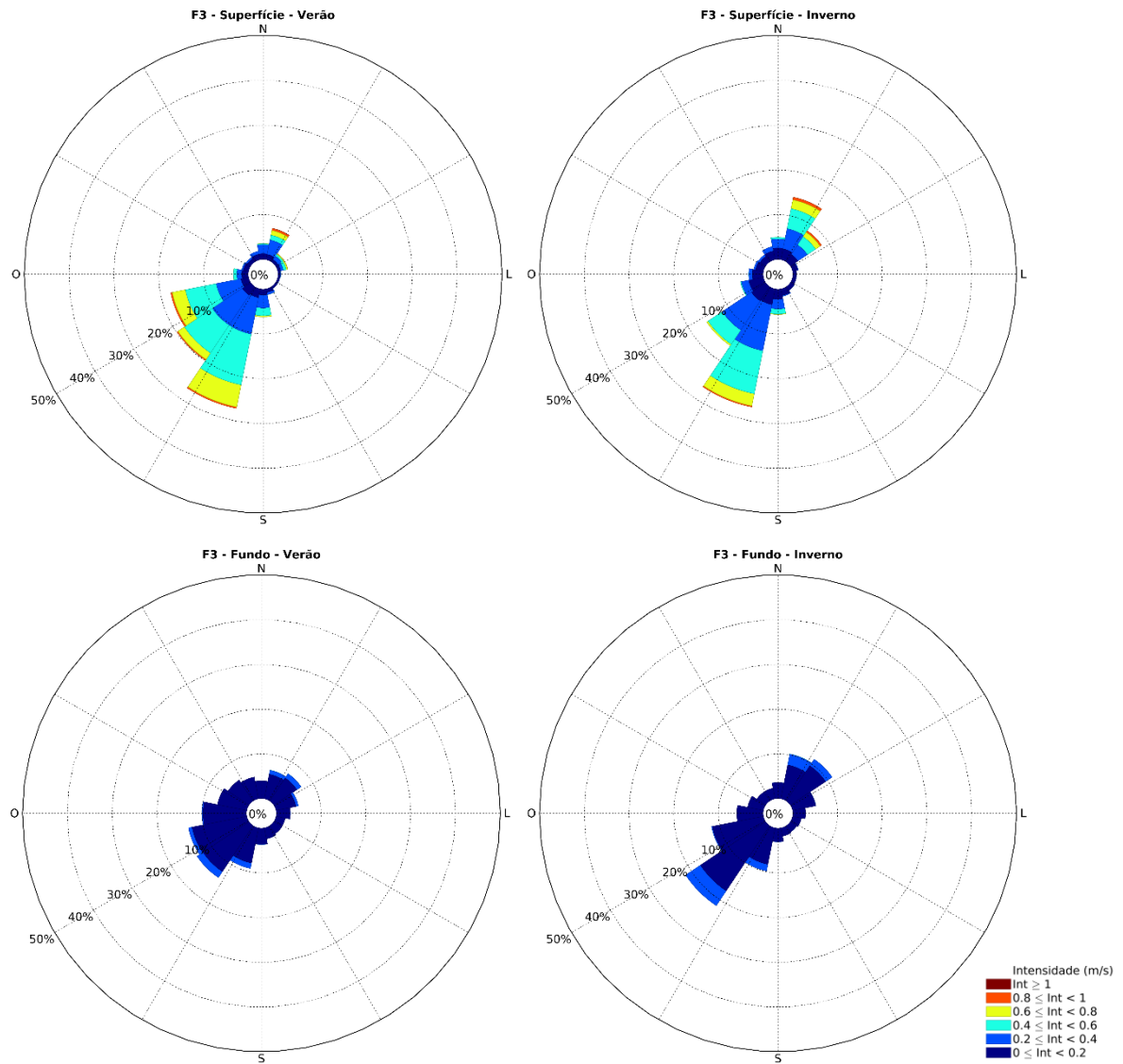
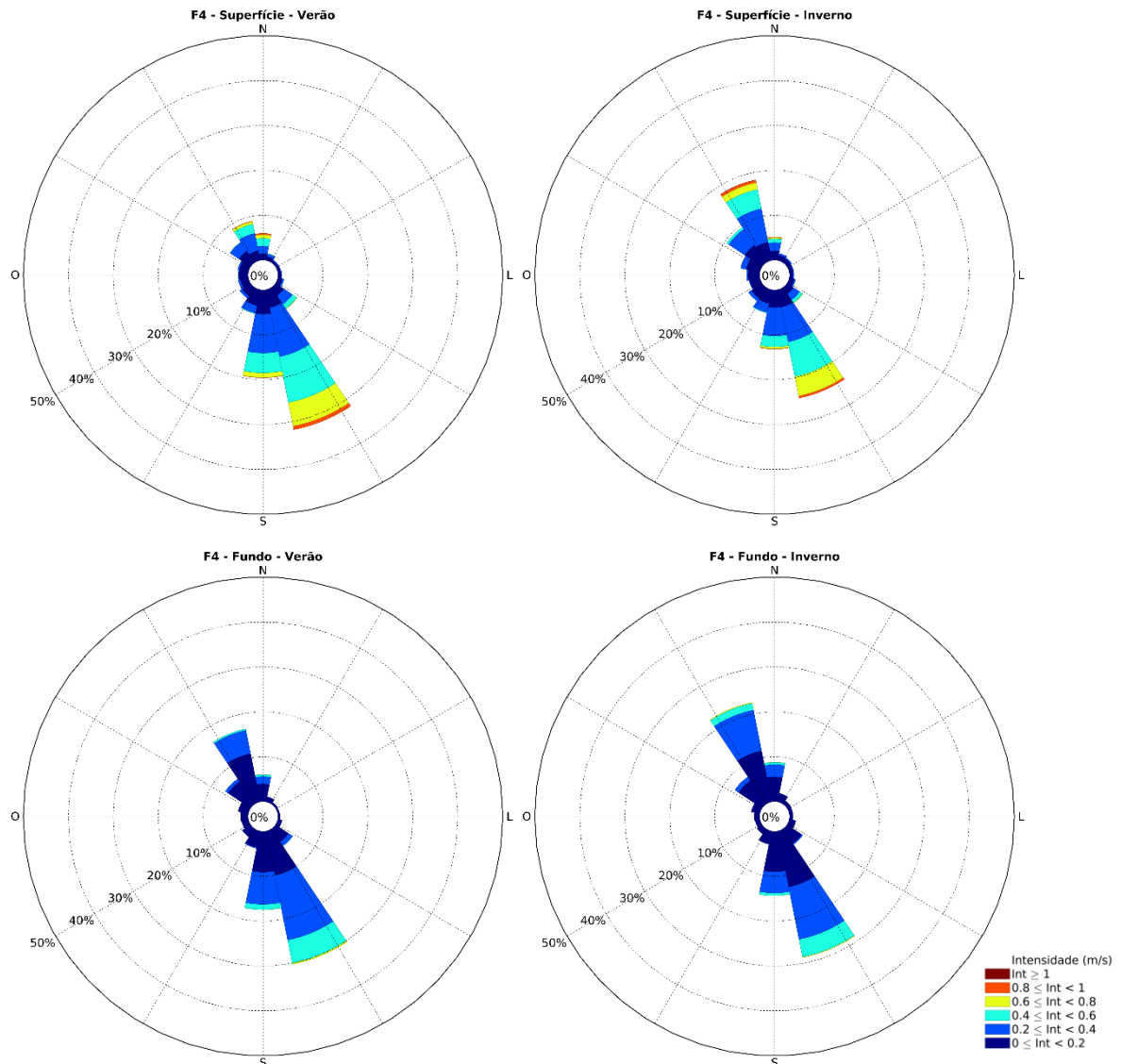


Figura 67: Distribuição de frequência de intensidade de correntes na superfície e no fundo nos períodos de primavera-verão e outono-inverno no fundeio F4.



De acordo com mudanças direcionais entre superfície e fundo, esses resultados indicam que a região entre a Costa das Algas (F1) e o norte da foz (F3) se comportou como um sistema dinâmico de duas camadas, uma superficial e outra próxima ao fundo. Embora no momento não se tenha disponível uma evolução temporal do perfil de massa específica na região, as perfilagens realizadas entre outubro/2018 e março/2019 (Item 2.2.2) apontaram uma forte estratificação vertical na região, reforçando a ideia de um sistema costeiro de duas camadas. No entanto, a região mais ao norte, próxima a Degredo, não apresentou essas características e as diferenças verticais foram menores.

Para o período de outono-inverno as magnitudes das correntes em todos os fundeios diminuíram em relação ao período anterior. Foi possível observar uma tendência a modificação de direção preferencial nas correntes de superfície e fundo entre os períodos de primavera-verão e outono-inverno, enquanto o fundeio F4, da mesma forma que no período anterior, não apresentou diferença significativa de

direção entre superfície e fundo (Figura 64, Figura 65, Figura 66 e Figura 67). No entanto, correntes nas direções norte-nordeste passam a apresentar maiores porcentagens de ocorrência nos fundeios F1 e F3, sendo que no fundeio F2 o aumento de ocorrência passa a ser no sentido entre nordeste e leste, enquanto no fundeio localizado em Degredo (fundeio F4), o sentido noroeste aumentou significativamente, principalmente na superfície.

Quantificando os períodos de variabilidade de correntes na região, destacam-se os diferentes processos oceanográficos na região. Na escala suprainercial (períodos < 35 h), a variabilidade das correntes é dominada pela influência da maré. A análise espectral das componentes paralela (Figura 68) e perpendicular à costa (Figura 69) das correntes mostra picos de energia em períodos semidiurnos (~ 12 h), com picos secundários em períodos quarto-diurnos (~ 6 h) e diurnos (~ 24 h). Foram realizadas análises harmônicas de séries temporais de corrente e nível nos quatro fundeios, mostrando a dominância da constituinte harmônica M2 (principal lunar) na banda semidiurna dos espectros.

Figura 68: Espectro das componentes paralelas à costa das correntes na superfície e no fundo nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).

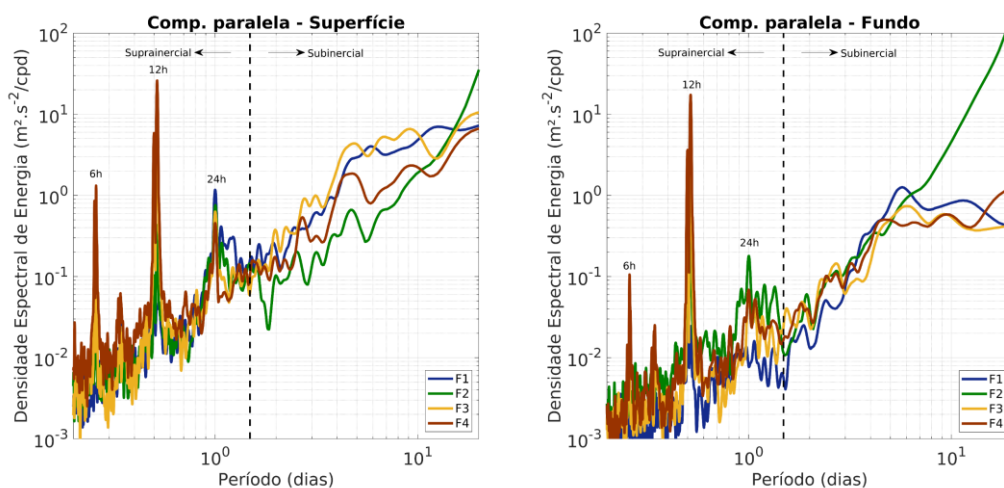
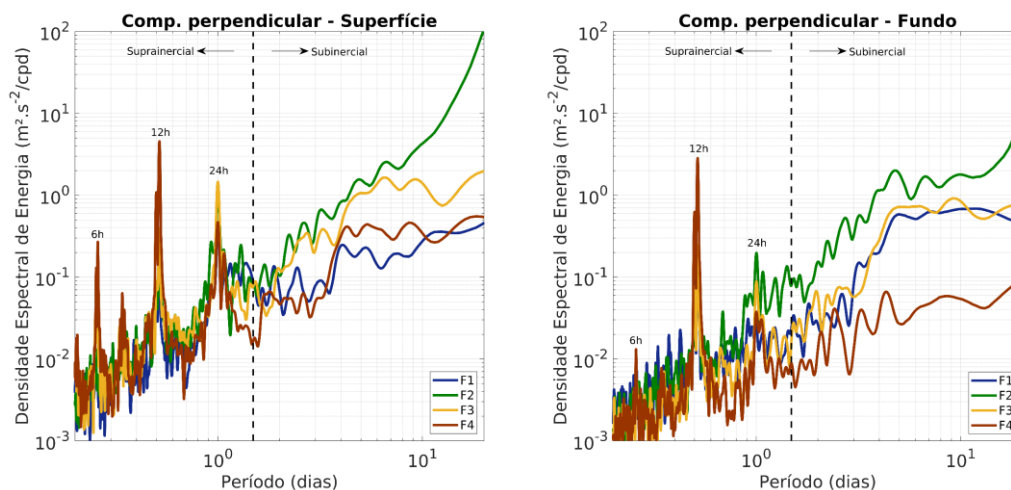


Figura 69: Espectro das componentes perpendiculares à costa das correntes na superfície e no fundo nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).



Comparando a energia da escala suprainercial entre os fundeios é possível observar que existem diferenças regionais da influência da maré na variabilidade total das correntes. As bandas semidiurna e quarto-diurna apresentam maiores densidades espectrais de energia na região de Degredo (F4) do que sobre a porção sul do Banco de Abrolhos. A energia associada à maré decresce em direção aos fundeios mais ao sul. Inversamente, na escala subinercial (períodos >35 h) a energia cresce nos fundeios ao sul do Banco de Abrolhos. Diferente da faixa suprainercial na qual os processos determinísticos associados à maré dominam e geram picos espectrais de banda estreita, a banda subinercial apresenta uma faixa de períodos de variabilidade (> 3 dias), gerando picos não tão evidentes. Nessa faixa, os processos não são determinísticos e podem ter períodos diferentes ao longo do ano, associados principalmente a variações do vento local e a passagem de ondas confinadas costeiras geradas remotamente à plataforma continental capixaba.

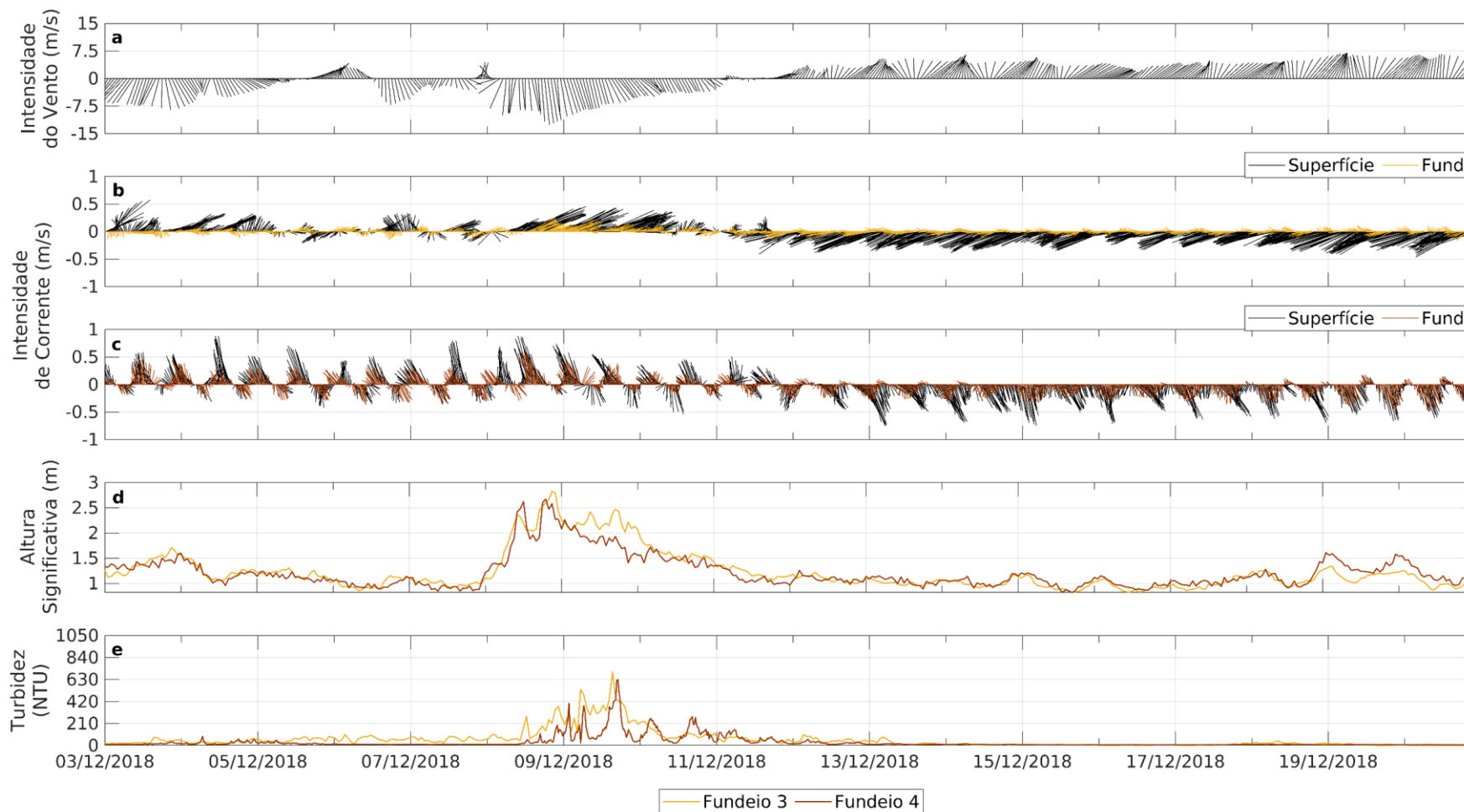
2.3.8 Eventos de ressuspensão

No período de medição de dados, destacaram-se eventos de aumento da turbidez no fundo que ocorreram no início de dezembro de 2018, dois eventos em março de 2019, um em meados de abril/2019 e eventos nos meses de julho, agosto e setembro/2019. Embora tenham ocorrido em momentos distintos, os eventos apresentaram semelhanças nas forçantes da tensão de cisalhamento do vento, correntes e altura de onda e estiveram associados a entradas de frentes frias na região. Na maioria das observações, após o pico máximo de altura significativa de onda registradas nas regiões dos fundeios, em cerca de 24 a 48 horas foram observados também os picos de turbidez junto ao fundo, exceto no fundeio F2 cuja turbidez no fundo mostrou-se fortemente influenciada pelo aporte fluvial do Rio Doce e será discutido ao longo dessa seção.

Do dia 6 a 11 de dezembro/2018 houve a passagem de uma frente fria na região, alterando a direção dos ventos (Figura 70a) e intensificando as correntes para norte em Fundeio 3 (Figura 70b), com

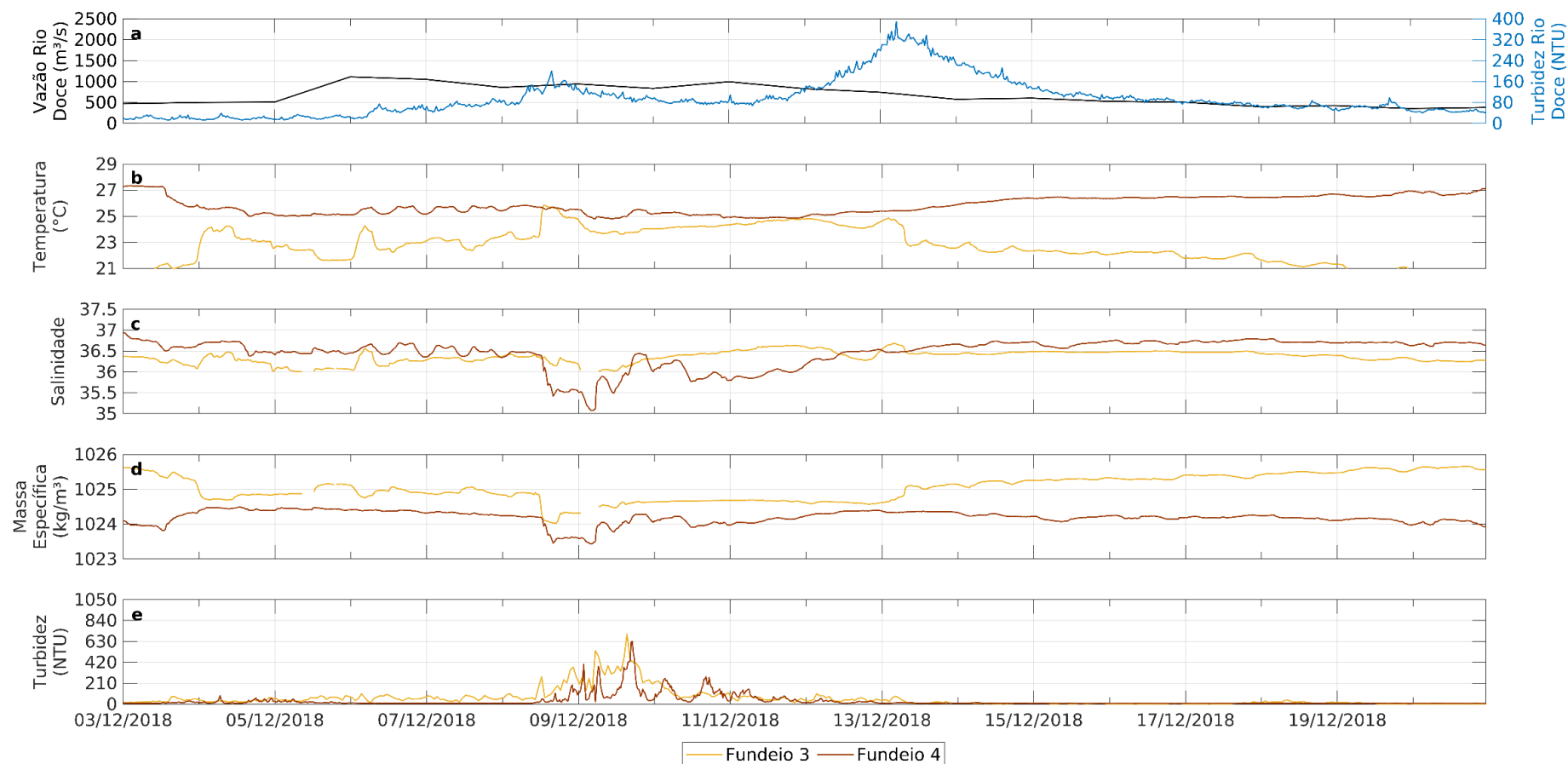
menores alterações em Fundeio 4 (Figura 70c). Essas mudanças foram acompanhadas por um aumento da altura significativa de ondas (> 2 m – .e) e do período de pico (> 12 s). A partir do dia 8 de dezembro, a turbidez junto ao fundo ao norte do Rio Doce mostrou uma tendência progressiva de aumento, com picos superiores a 700 NTU no dia 9 de dezembro (Figura 71b).

Figura 70: Série temporal da (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3, (c) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (vermelho) medidas no F4, (d) Altura significativa de onda medida no F3 (amarelo) e no F4 (vermelho) e, (e) turbidez no período de 03 a 20 de dezembro/2018.



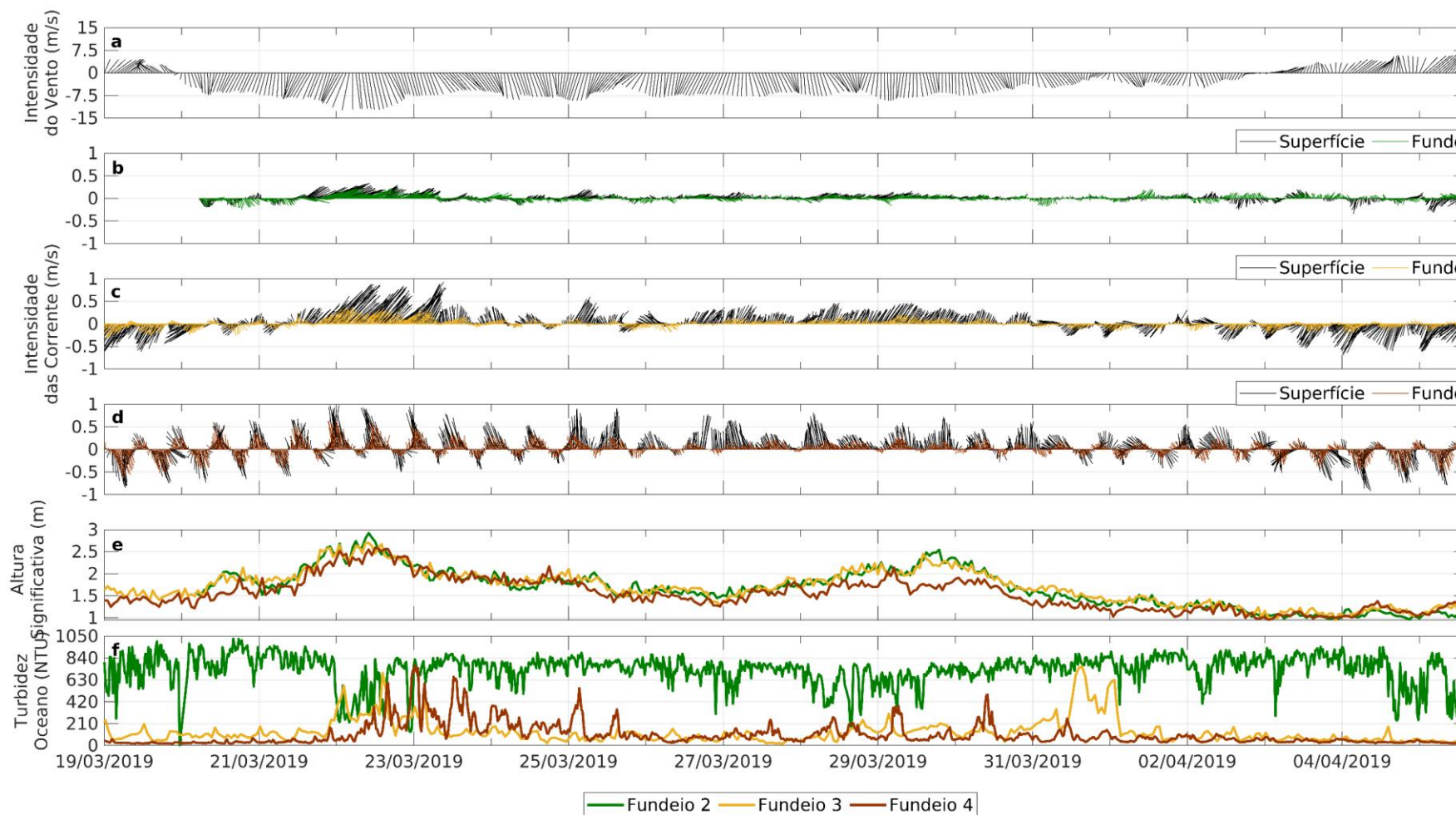
Nos dias 6 e 7 de dezembro o Rio Doce exibiu picos de vazão superiores a $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 71a). Ao mesmo tempo houve uma queda significativa da salinidade junto ao fundo (Figura 71c) no fundeio F3 (diminuição de 0.5) e especialmente em fundeio F4 (diminuição de 1.4). A comparação desses resultados sugeriu que esse evento de aumento da turbidez combinou um efeito de ressuspensão promovido essencialmente pela ação das ondas junto ao fundo com um evento de advecção para norte do aporte fluvial proveniente do Rio Doce pelo efeito dos ventos de sul no período. O gradiente térmico horizontal entre os fundeios F3 e F4 foi o menor do registro do período de primavera-verão, o que pode também ter contribuído para diminuir a barreira imposta ao transporte pela estratificação.

Figura 71: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (preto) e turbidez medida na estação automática RDO-16 boia (ciano), (b) Temperatura, (c) Salinidade, (d) Massa específica e, (e) Turbidez medidas nos fundeios F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 03 a 20 de dezembro/2018.



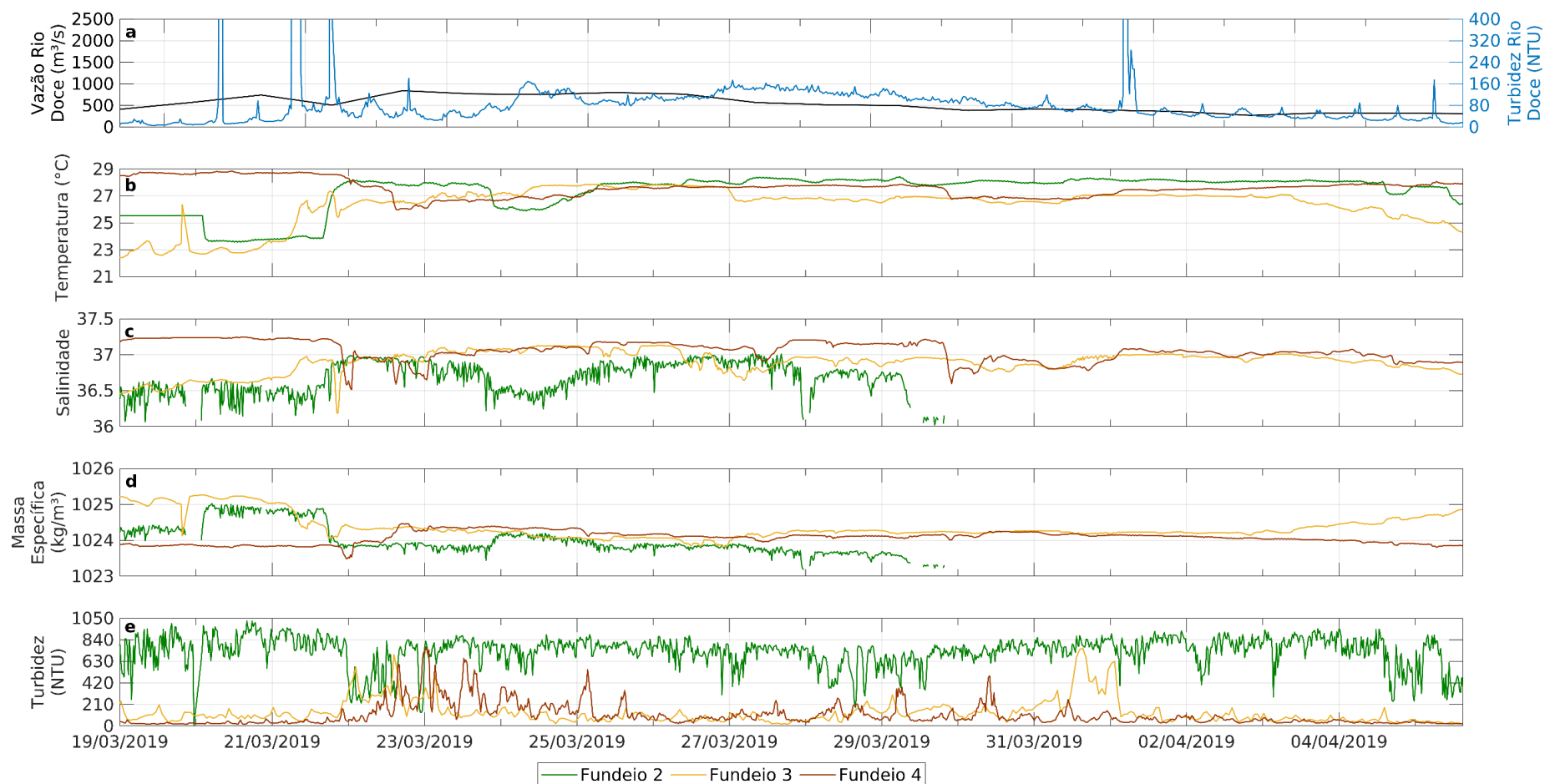
O mesmo efeito foi observado nos eventos de aumento de turbidez no fundo que ocorreram em março/2019. Seguido de uma entrada de frente fria cujos efeitos tiveram maior duração, também foram observadas inversões no sentido do vento (Figura 72a – em 20 de março de 2019) e das correntes tanto na superfície quanto no fundo (Figura 72b, c e d) além de um aumento na altura significativa de ondas locais (Figura 72e), ultrapassando 2,5 m nos fundeios F2, F3 e F4. Em decorrência desse aumento, foram observados os primeiros picos de turbidez entre os dias 22 e 25 de março ultrapassando 600 NTU nos fundeios F3 e F4 (Figura 72f), acompanhado de uma diminuição da turbidez no fundo em F2. Essa diminuição sugere que o aumento turbidez observado em F3 na mesma época deve-se a uma combinação da ressuspensão com a advecção para norte dos sedimentos provenientes do aporte fluvial. Um segundo momento de aumento de turbidez foi observado entre os dias 29 de março e 01 de abril. Esse aumento esteve associado a uma situação atípica, a passagem da Tempestade Tropical IBA. Ela provocou efeitos semelhantes aqueles observados durante a entrada de frentes frias na região (vento sul e correntes norte e nordeste), além de provocar um novo aumento na altura significativa de ondas, Esse aumento, no entanto, foi menor do que as alturas anteriormente medidas, já que no fundeio F4 a altura significativa não passou de 2 m, chegou a 2,5 m no fundeio F3, passando de 2,5 m apenas no fundeio F2 (Figura 72e).

Figura 72: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (verde) medidas no F2, (c) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3, (d) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (vermelho) medidas no F4, (e) Altura significativa de onda medida no F3 (amarelo) e no F4 (vermelho) e, (f) turbidez no período de 19 de março/2019 a 05 de abril/2019.



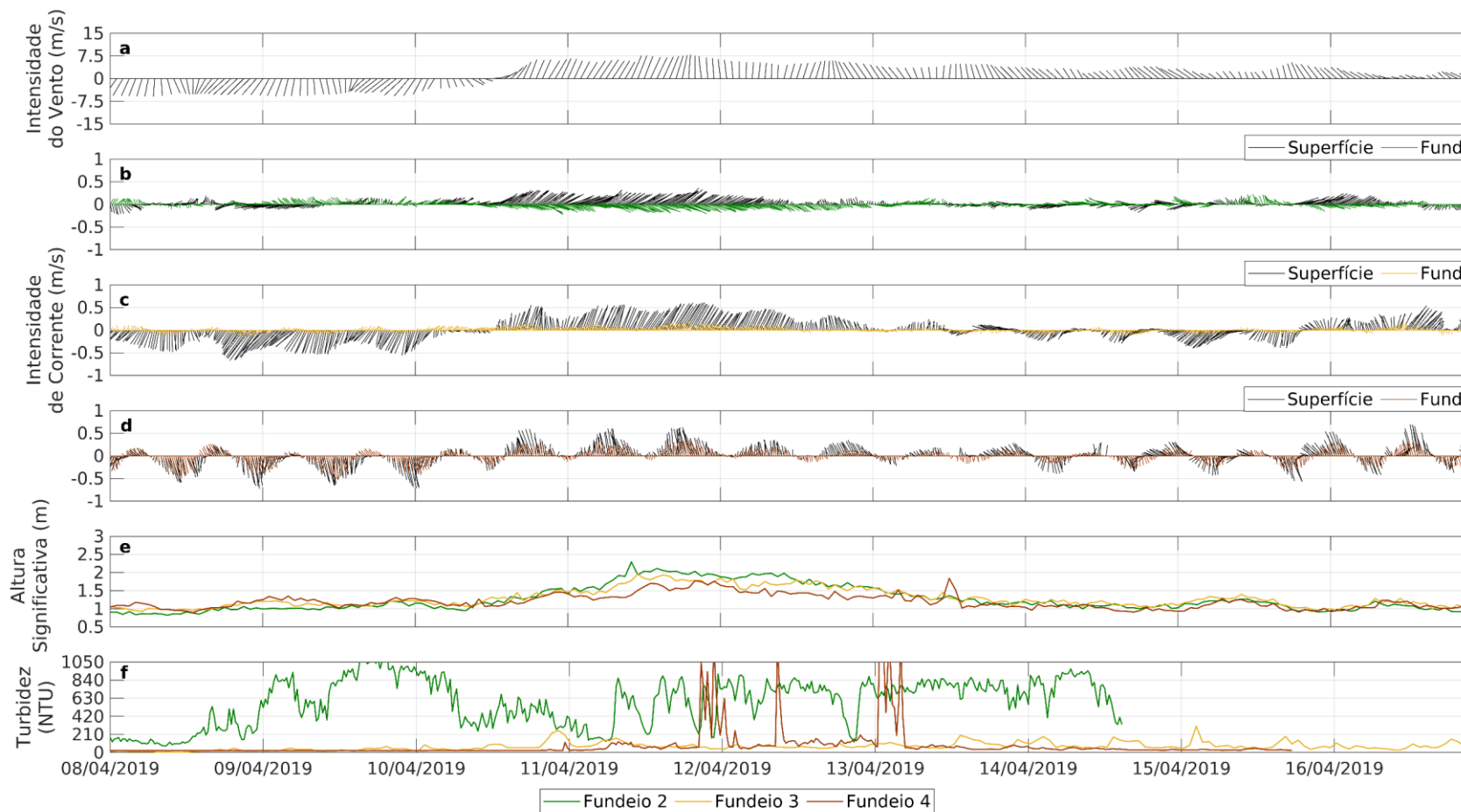
Novamente, após a passagem das frentes frias seguiu-se aumentos significativo da temperatura junto ao fundo ao sul e ao norte da foz do Rio Doce (fundeio F1 e F3) acompanhados de fortes diminuições da temperatura no fundo em Degredo (fundeio F4) (Figura 73b), diminuindo consideravelmente o gradiente horizontal de massa específica (Figura 73d) entre os fundeios F3 e F4. Nesse momento, a vazão do Rio Doce apresentava-se próxima a 1500 m³/s até o dia 27 de março quando começou a decair gradativamente, mantendo-se superior a 700 m³/s (Figura 73a). Exceto próximo do dia 22 de março, não foi observada, porém, uma relação clara das mudanças da vazão do rio com o aumento de turbidez medido nos fundeios F3 e F4.

Figura 73: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (preto) e turbidez medida na estação automática RDO-16 boia (ciano), (b) Temperatura, (c) Salinidade, (d) Massa específica e, (e) Turbidez medidas nos fundeios F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 19 de março a 04 de abril/2019.



Entre os dias 11 e 15 de abril/2019 foram observados valores de turbidez superiores a 1000 NTU no fundeio F4. Valores menores foram observados no fundeio F3 (~200 NTU - Figura 74f). Nesse período ocorreu uma nova entrada de frente fria mantendo o vento de sul (Figura 74a) e as correntes para nordeste em ambos os pontos analisados (Figura 74b, c e d). A altura significativa de onda no período aumentou em relação aos dias anteriores, porém não chegou a 2 m no fundeio F4 (Figura 74e).

Figura 74: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do ECMWF para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (verde) medidas no F2, (c) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3, (d) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (vermelho) medidas no F4, (e) Altura significativa de onda medida no F2 (verde), F3 (amarelo) e no F4 (vermelho) e, (f) turbidez no período de 19 de março de 2019 a 05 de abril/2019.



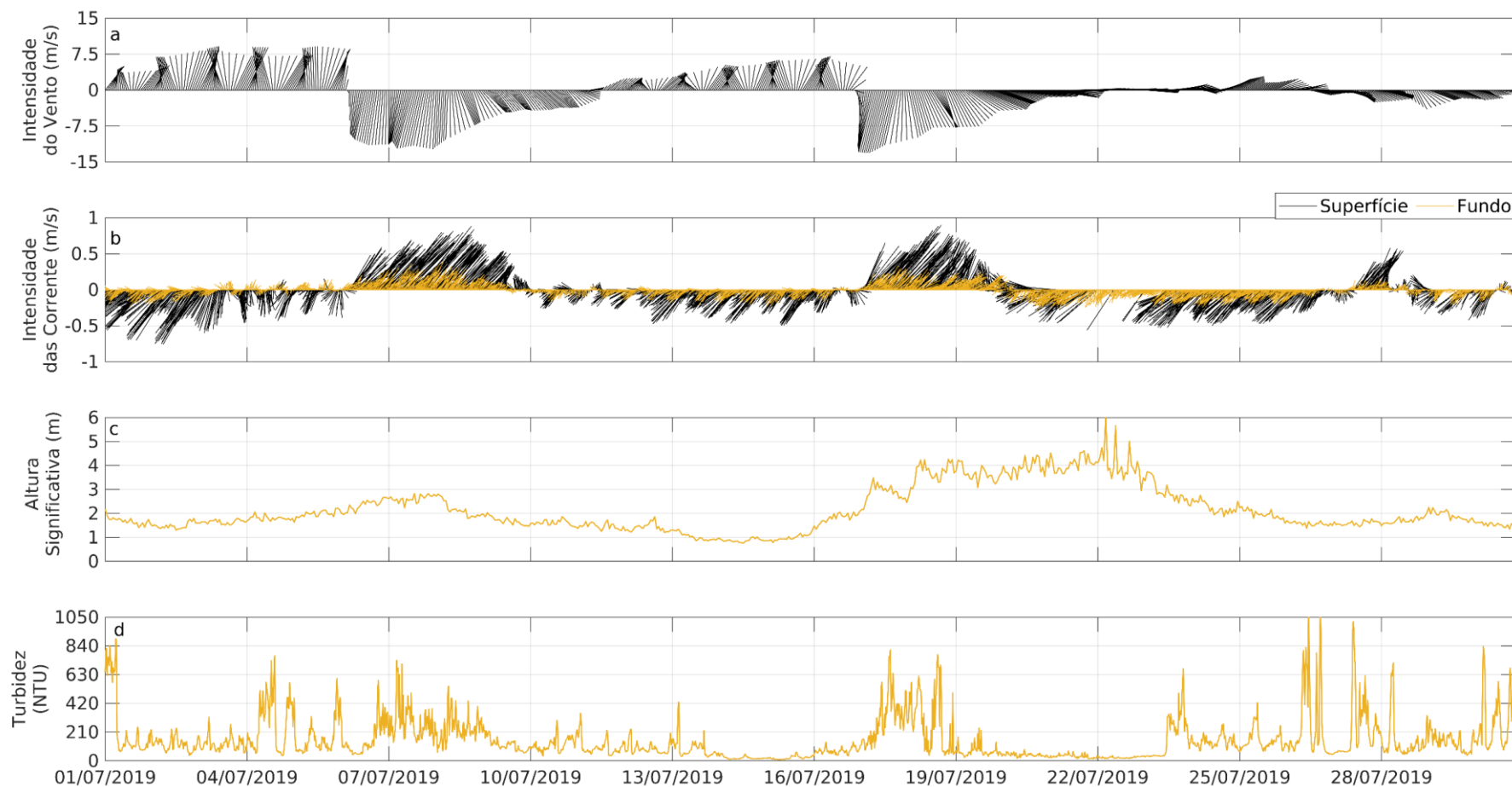
A vazão do Rio Doce entre 08 e 16 de abril/2019 chegou a um máximo de 1200 m³/s, mantendo-se acima de 900 m³/s (Figura 75a). As variações de temperatura ocorreram da mesma forma que as observadas nos momentos de entradas de frentes frias e maior turbidez nos períodos anteriormente citados, aumentando para os fundeios F2 e F3 e diminuindo para o fundeio F4 (Figura 75b). No fundeio F2, o sensor acabou não funcionando adequadamente não fornecendo valores confiáveis de salinidade, porém, para os fundeios F3 e F4, não foram verificadas diferenças na salinidade durante esse período, a qual manteve valores próximos a 36,5 em ambos os fundeios (Figura 75c). Da mesma forma, os valores de massa específica entre F3 e F4 se aproximaram de 1024 em ambos os fundeios, resultado de uma diminuição em fundeio F3 e um aumento em fundeio F4 (Figura 75 d).

Figura 75: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (preto) e turbidez medida na estação automática RDO-16 boia (ciano), (b) Temperatura, (c) Salinidade, (d) Massa específica e, (e) Turbidez medidas nos fundeios F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 08 a 16 de abril de 2019.



Os aumentos de turbidez no mês de julho foram observados no fundeio F3 (Figura 76). Nesse mês houve a passagem de frentes frias sequenciais favorecendo as mudanças de direção vento em sentido sul (Figura 76a) e das correntes de fundo e superfície para nordeste (Figura 76b). As maiores alturas significativas registradas foram de 3 m no primeiro aumento observado (8 de julho) e acima de 6 m em 22 de julho (Figura 76c). Nesse último momento foram registrados 20 s de períodos máximo de onda. Entre esses períodos a turbidez ultrapassou 700 NTU entre os dias 4 e 7 de julho e 17 e 18 de julho, chegando a 1050 NTU nos dias 27 e 28 de julho. Entre as frentes frias que ocorreram nesse período algumas não chegaram a passar através das latitudes de localização dos fundeios (Figura 9 e Figura 10), mas o reflexo dessas frentes foi registrado nos parâmetros de onda, como na altura significativa e no período.

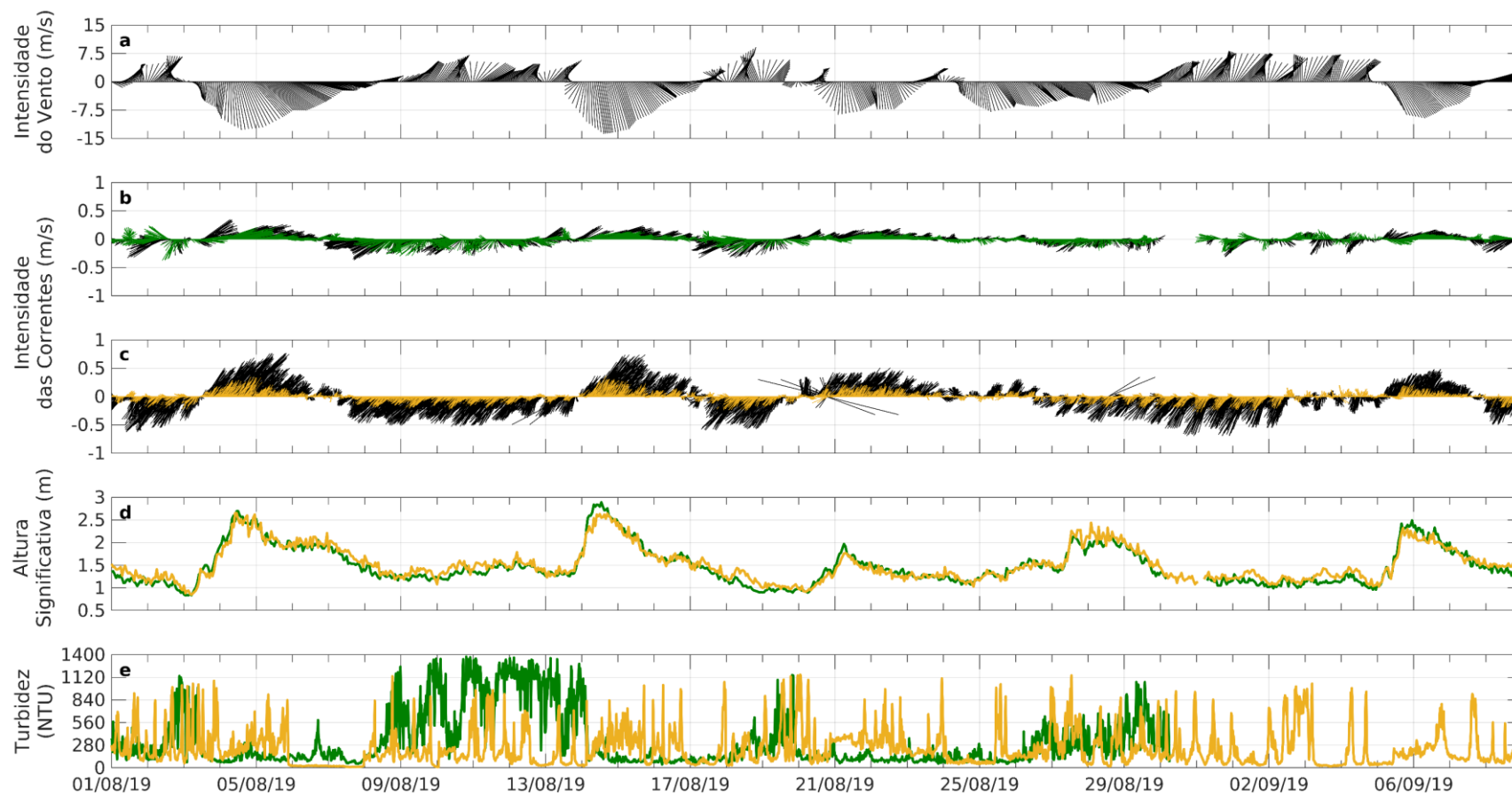
Figura 76: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do ECMWF para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3 (c) Altura significativa de onda medida no F3 e, (d) turbidez no período de 01 a 30 de julho/2019.



A partir do início do mês de agosto até o dia 09 de setembro foram registradas cinco entradas de frentes frias identificadas pela inversão dos ventos e correntes além do aumento das alturas significativas de ondas (Figura 77 a, b c e d). Os registros de turbidez nos fundeios F2 e F3 revelaram ressuspensão de sedimentos no fundo nos mesmos períodos de ocorrência dessas frentes frias, mantendo a turbidez alta mesmo após o reestabelecimento dos ventos nordeste e diminuição das alturas significativas de onda, observado principalmente no Fundeio 3 (Figura 77e).

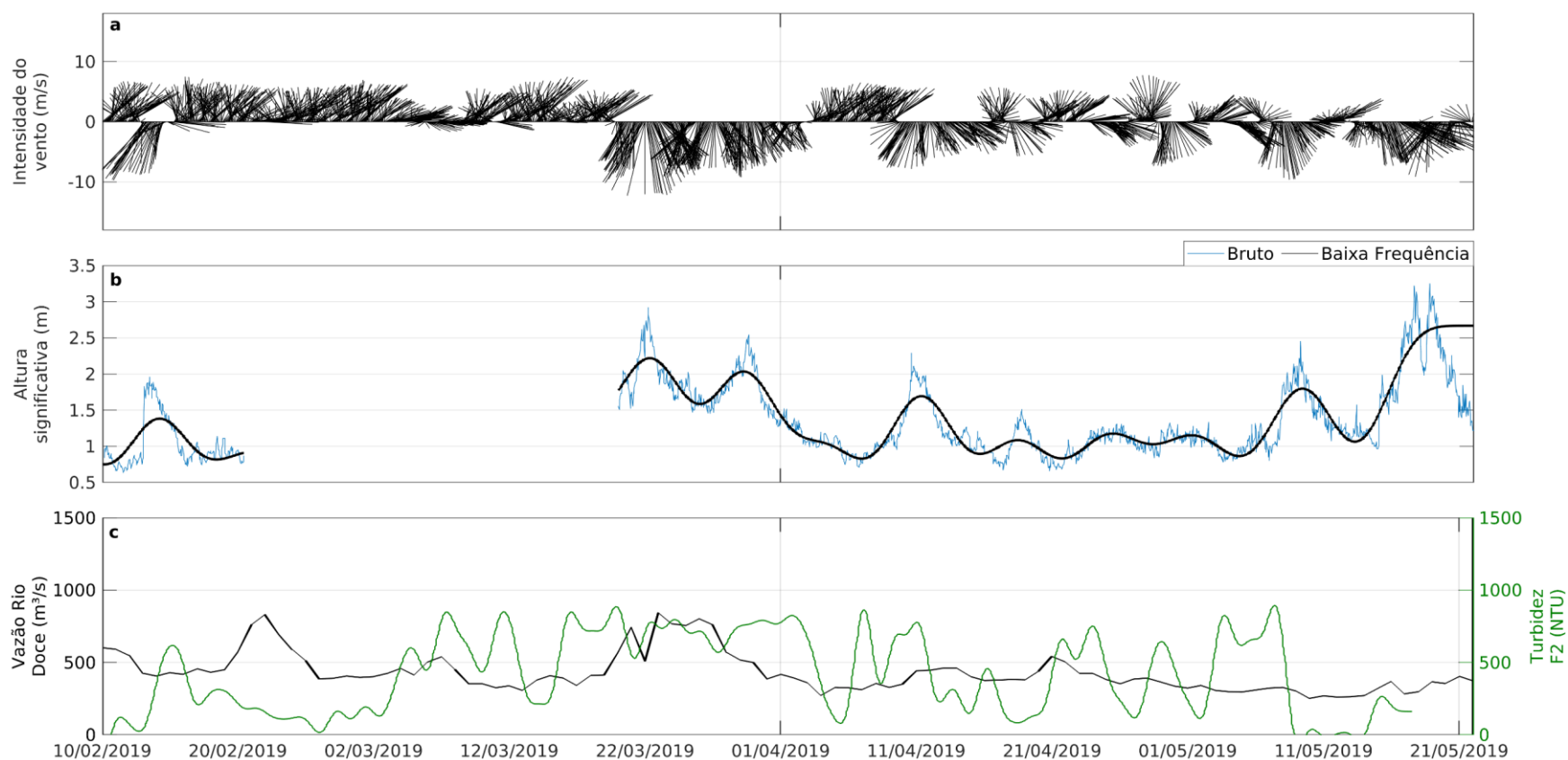
A turbidez no Fundeios 2 no mês de agosto se comportou de forma semelhante a turbidez no Fundeio 3, o que não foi observado nos meses anteriores. A possível diminuição da vazão do Rio Doce nesse período pode ter sido determinante para uma resposta da turbidez à dinâmica meteoceanográfica.

Figura 77: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do ECMWF para o ponto 39,75 °O e 19,75 °S, (b) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3 (c) Altura significativa de onda medida no F3 e, (d) turbidez no período de 01 a 10 de setembro/2019.



Em contraste a todas as análises de turbidez no fundo, o comportamento da turbidez no fundeio F2 não se mostrou semelhante ao observado nos demais fundeios de novembro/2018 a julho/2019. O fundeio F2 localizado ao sul da desembocadura do Rio Doce, apresentou alta turbidez (>100 NTU em 90% do tempo) em todo o período analisado como resultado da combinação do efeito da vazão do rio (devido à proximidade do fundeio à desembocadura do rio), e ação local das ondas (Figura 78). Entre o final de março e início de abril/2019, por exemplo, a ação combinada de uma alta vazão do rio com a entrada de uma frente fria resultou em maiores alturas significativas de onda (Figura 78b) e turbidez medida no fundo (acima de 1000 NTU - Figura 78c). Em outros momentos, por exemplo, como em 22 de fevereiro de 2019, uma alta vazão do rio Doce, porém com o vento padrão de nordeste, fez com que a turbidez não ultrapassasse 700 NTU. Da mesma forma, em um evento de vento sul entre os dias 15 e 22 de maio (Figura 78a), com a vazão do rio menor que 900 m³/s os valores de turbidez permaneceram relativamente baixos (em relação a série observada), próximo a 600 NTU.

Figura 78: Série temporal de (a) vento da reanálise e previsão do *ECMWF* para o ponto 39,75°O e 19,75°S, (b) Altura significativa bruto (azul) e baixa frequência (preto) e, (c) vazão do Rio Doce (preto) x Turbidez no fundo do fundeio F2 (verde) no período de 10 de fevereiro a 22 de maio/2019.



Apesar da menor quantidade de dados de turbidez superficial, uma análise para o período entre 29 de março e 16 de abril/2019 mostrou uma tendência de variação semelhante tanto em superfície quanto no fundo nos fundeios F3 e F4 (Figura 79 e Figura 80). Como citado anteriormente nessa seção, o aumento de turbidez no fundo entre os dias 29 de março e 02 de abril, bem como o observado entre os dias 10 e 16 de abril são reflexos das entradas de frente fria e consequente inversões nas direções de ventos e correntes e no aumento de altura significativa e período de onda (Figura 72 e Figura 74). Em superfície, foram observadas nesses mesmos períodos, aumentos significativos de turbidez, chegando a 15 NTU e 12 NTU nos fundeios F3 e F4, respectivamente no final de março e início de abril, ultrapassando 9 NTU em ambos os fundeios em meados de abril. Nesses dois períodos foi possível constatar que, devido a eventos de ressuspensão por ondas na região, houve um aumento significativo também da turbidez superficial. Foi possível ainda verificar valores de turbidez acima de 6 NTU entre os dois maiores picos no fundeio F3 e acima de 3 NTU no fundeio F4.

Figura 79: Distribuição temporal de turbidez na superfície (preto) e no fundo (amarelo) no fundeiro F3, de 29 de março a 16 de abril/2019.

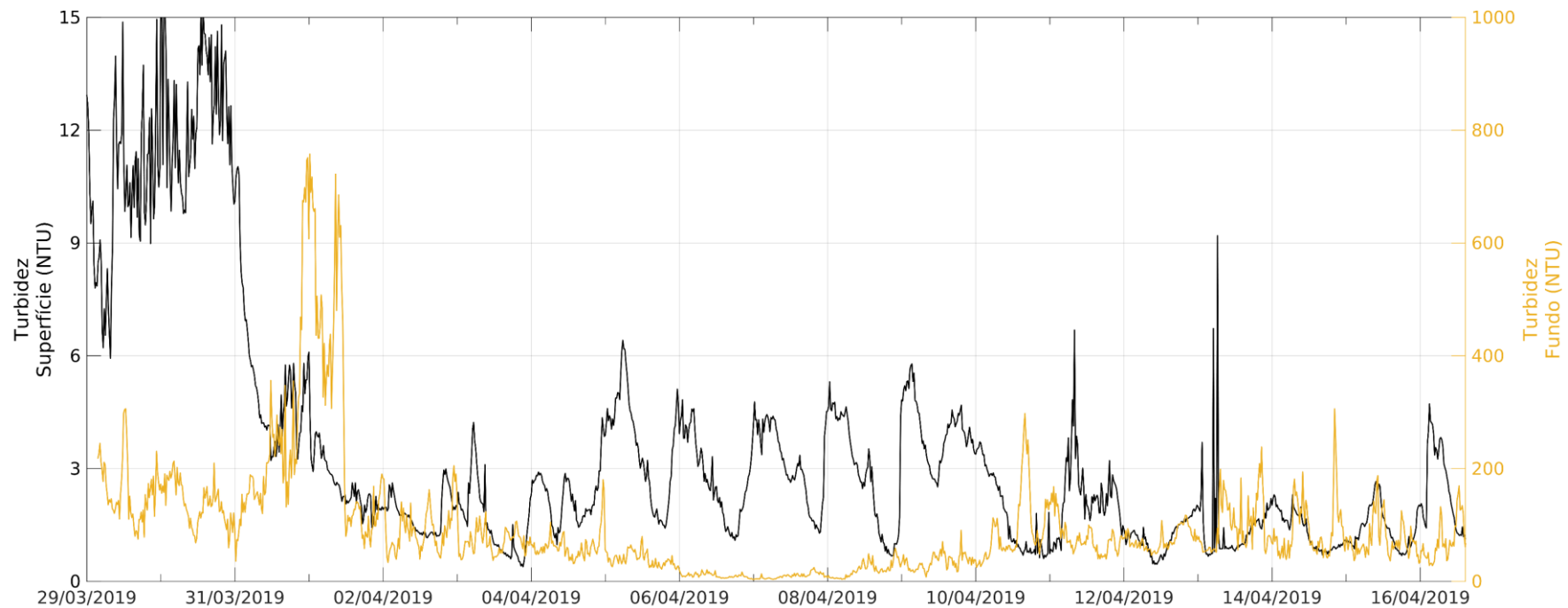
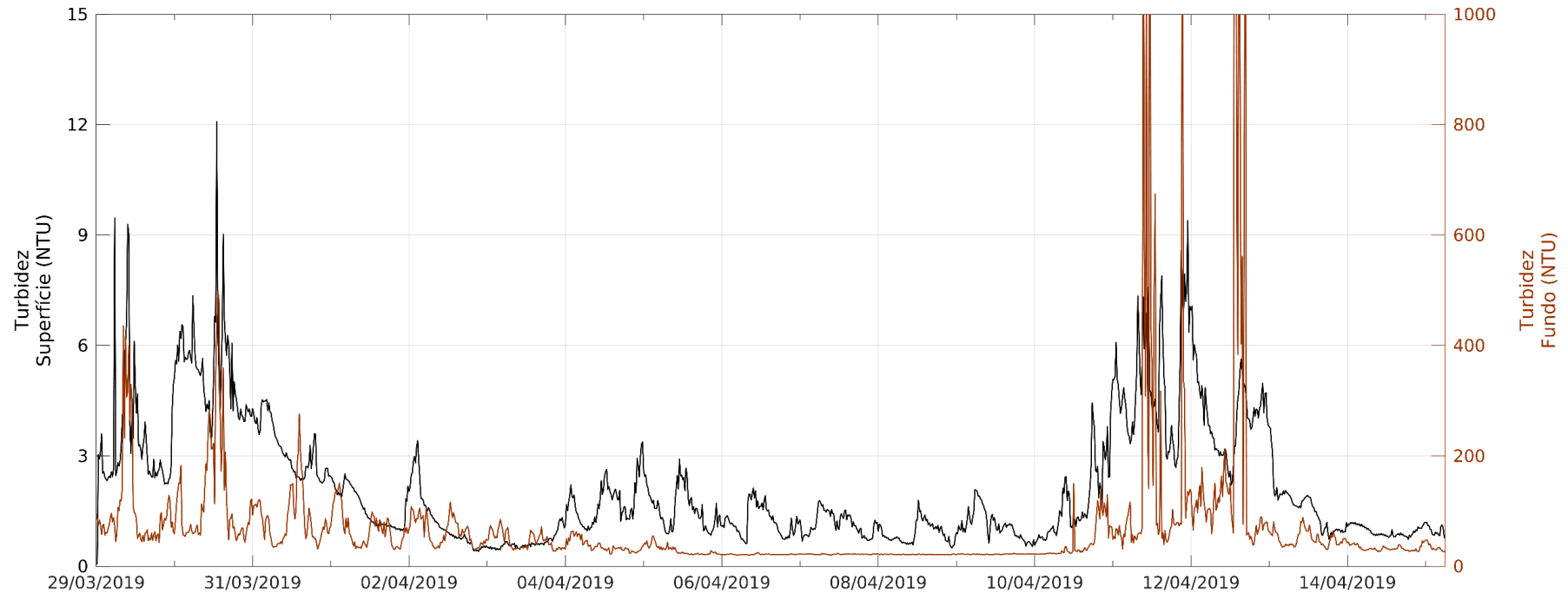
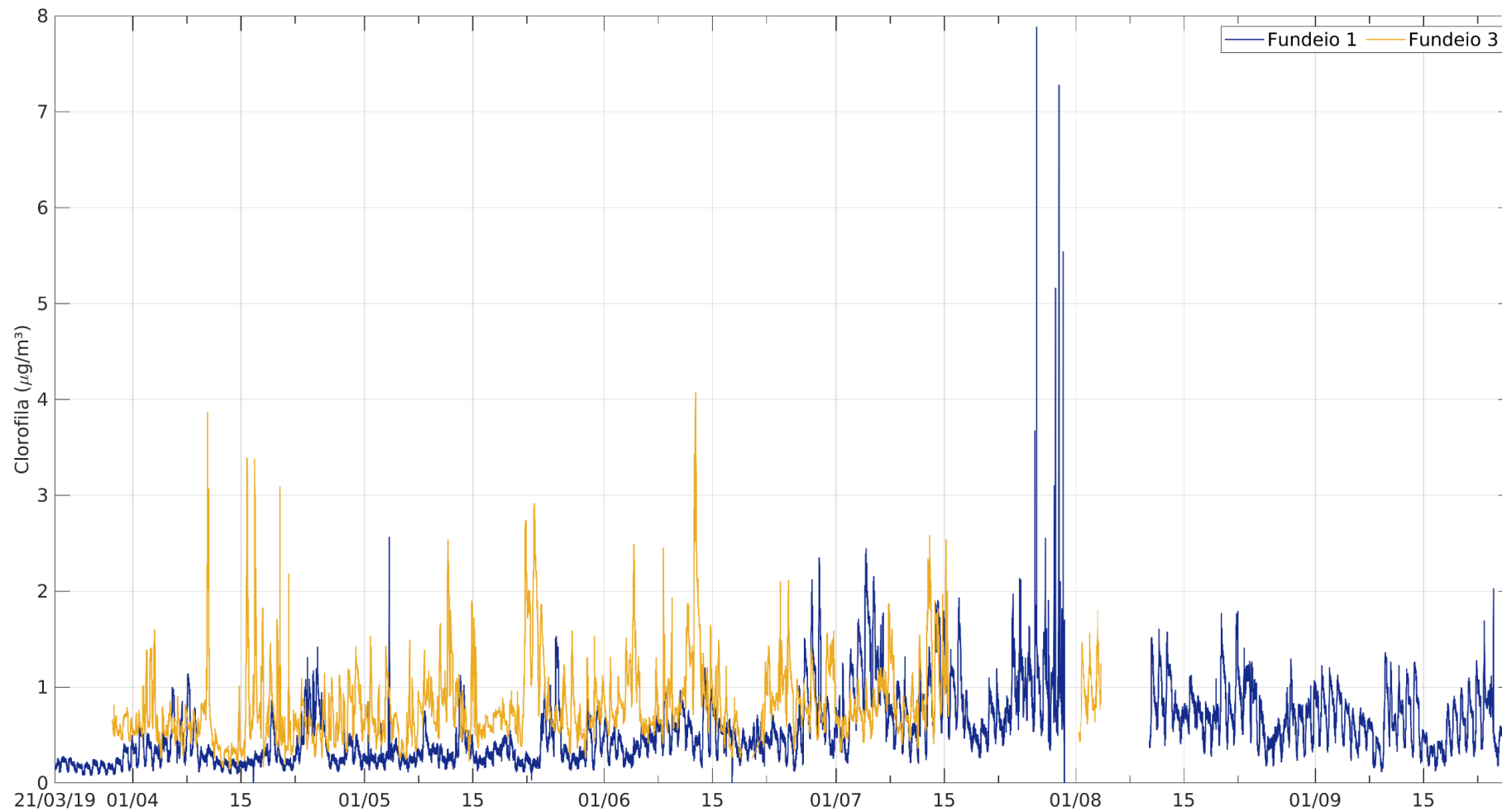


Figura 80: Distribuição temporal de turbidez na superfície (preto) e no fundo (amarelo) no fundeiro F4, de 29 de março a 16 de abril/2019.



Devido aos problemas nos sensores de equipamentos utilizados na medição de alguns parâmetros, só foi possível obter medidas de clorofila-a em superfície entre 21 de março e 31 de julho/2019 nos fundeios F1 e F3. Não foi possível analisar, dessa forma, possíveis diferenças entre os períodos de primavera-verão e outono-inverno. As séries de clorofila-a não apresentaram variação significativa concomitante aos demais parâmetros anteriormente analisados. Na maior parte do período analisado, os valores de clorofila-a encontrados para o fundeio F3 estiveram acima dos valores encontrados no fundeio F1, estando ambas as séries com valores médios abaixo de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, apresentando valores máximos de $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fundeio F3 e $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fundeio F1 (Figura 81). Há uma marcante variabilidade diurna da clorofila-a em ambos os fundeios. Em momentos distintos, as mudanças diurnas são acompanhadas por aumentos locais de maior duração, sem uma relação clara entre as áreas dos fundeios.

Figura 81: Série temporal da clorofila-a medida em superfície nos fundeios F1 (azul) e F3 (amarelo) no período de 21 de março a 31 de julho/2019.



2.4 MODELAGEM NUMÉRICA

2.4.1 Validação do modelo hidrodinâmico

Conforme mencionado por Marta-Almeida *et al.* (2016), o período que precedeu o rompimento da barragem de rejeitos é caracterizado por apresentar grande escassez de dados correntométricos medidos na região da plataforma continental adjacente a desembocadura do Rio Doce, fato esse que impossibilitou a calibração do modelo utilizado pelos autores supracitados para esta região de estudo. Uma série de dados brutos de correntes pré-monitoramento não foi disponibilizada. O conjunto que nos foi entregue já estava processado ou, no mínimo, pré-processado sem informações de metadados que possibilitassem uma avaliação prévia para seu uso em uma validação do modelo numérico.

No presente estudo, para a validação do modelo hidrodinâmico foram utilizados dados de velocidade de corrente obtidos na boia Vitória (parte do Programa Nacional de Boias - PNBOIA) fundada na região da quebra de plataforma na costa do Espírito Santo (19°55' S e 39°41' O). O período de dados disponíveis e, dessa forma, utilizados nesta validação do modelo foi de 14 de outubro de 2015 a 15 de junho/2016.

A dinâmica da plataforma continental adjacente a desembocadura do Rio Doce é dominada pela influência da Corrente do Brasil, a corrente de contorno oeste que fecha o giro subtropical oceânico no Atlântico Sul. As séries temporais das componentes zonal e meridional das velocidades medidas e modeladas são mostradas na Figura 82. Ambos os resultados mostram a variabilidade da Corrente do Brasil próximo à localização da boia. As velocidades meridionais apresentaram valores negativos em quase todo o registro, mostrando uma boa comparação entre velocidades medidas e modeladas. Os valores do erro médio quadrático para as componentes zonal e meridional foram iguais a 0,16 m/s e 0,28 m/s. A componente zonal é menos concordante tanto em termos de amplitude e sinal ao longo de todo o registro. No entanto, quando o espectro de energia das frequências de oscilação resultante da série temporal é comparado entre si os resultados mostram uma boa similaridade com os dados observados (Figura 83).

É importante destacar que diferenças entre as correntes medidas e modeladas são esperadas, especialmente para simulações que não levam em conta assimilação de dados para datação de estruturas, como se configura a presente simulação. Além disso, a comparação pontual entre dados e resultados de modelos numéricos é invariavelmente difícil, visto que nem sempre um modelo consegue reproduzir fielmente uma determinada dinâmica exatamente no ponto da medição, mas pode apresentar resultados melhores para pontos próximos.

Figura 82: Série temporal dos dados do PNBOIA na Boia Vitória e resultados da modelagem das componentes zonal e meridional da velocidade superficial entre novembro/2015 e junho/2016.

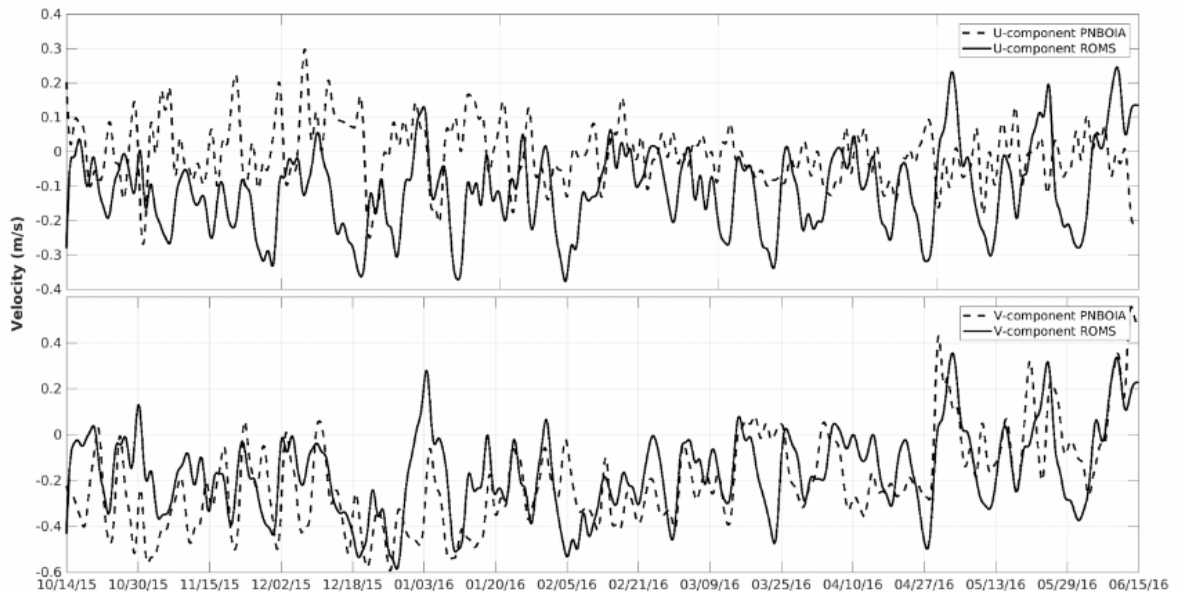
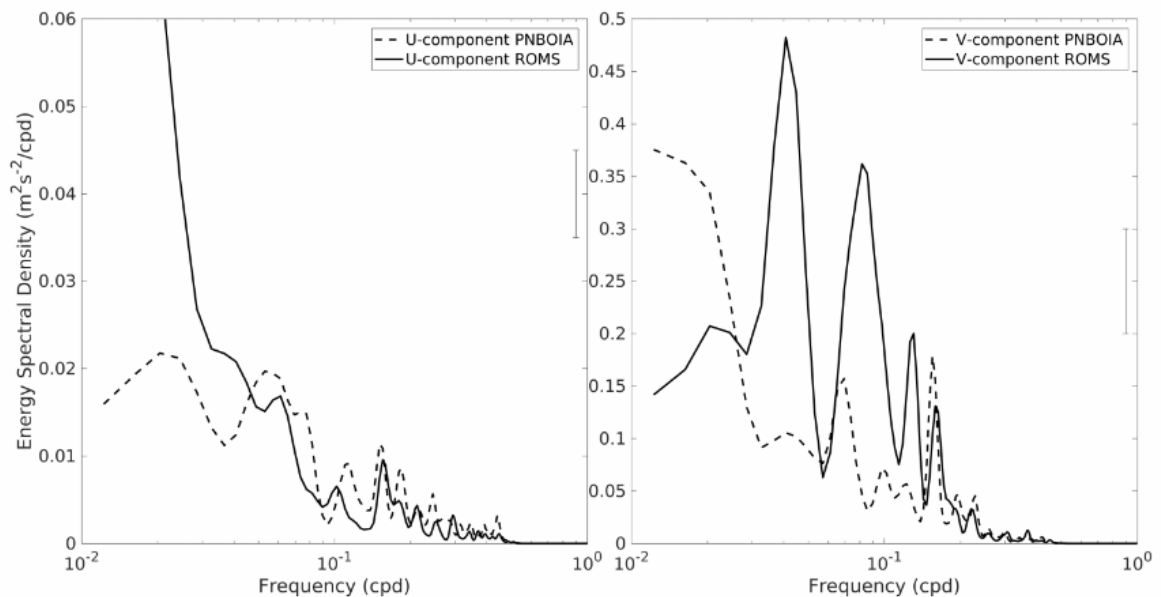


Figura 83: Espectro de energia das componentes zonal e meridional da velocidade superficial de corrente para os dados do PNBOIA na Boia Vitória e os resultados da modelagem numérica.



2.4.1.1 Hidrodinâmica da plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce

A fim de analisar a hidrodinâmica na plataforma adjacente à foz do Rio Doce, nas Figura 84 e Figura 85 são apresentadas médias sazonais de magnitude da corrente para os períodos de verão e inverno, simulados na grade de maior resolução (Grade 2). O campo médio é importante porque ele salienta as condições predominantes na área de interesse. Os resultados referem-se aos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018 para o campo superficial (nível sigma 40) e de fundo (nível sigma 1).

Figura 84: Campo médio sazonal da corrente superficial para o verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Observe que um campo médio com velocidades próximas de zero não implica, necessariamente, que as velocidades são nulas, mas que o campo dinâmico pode ser muito variável.

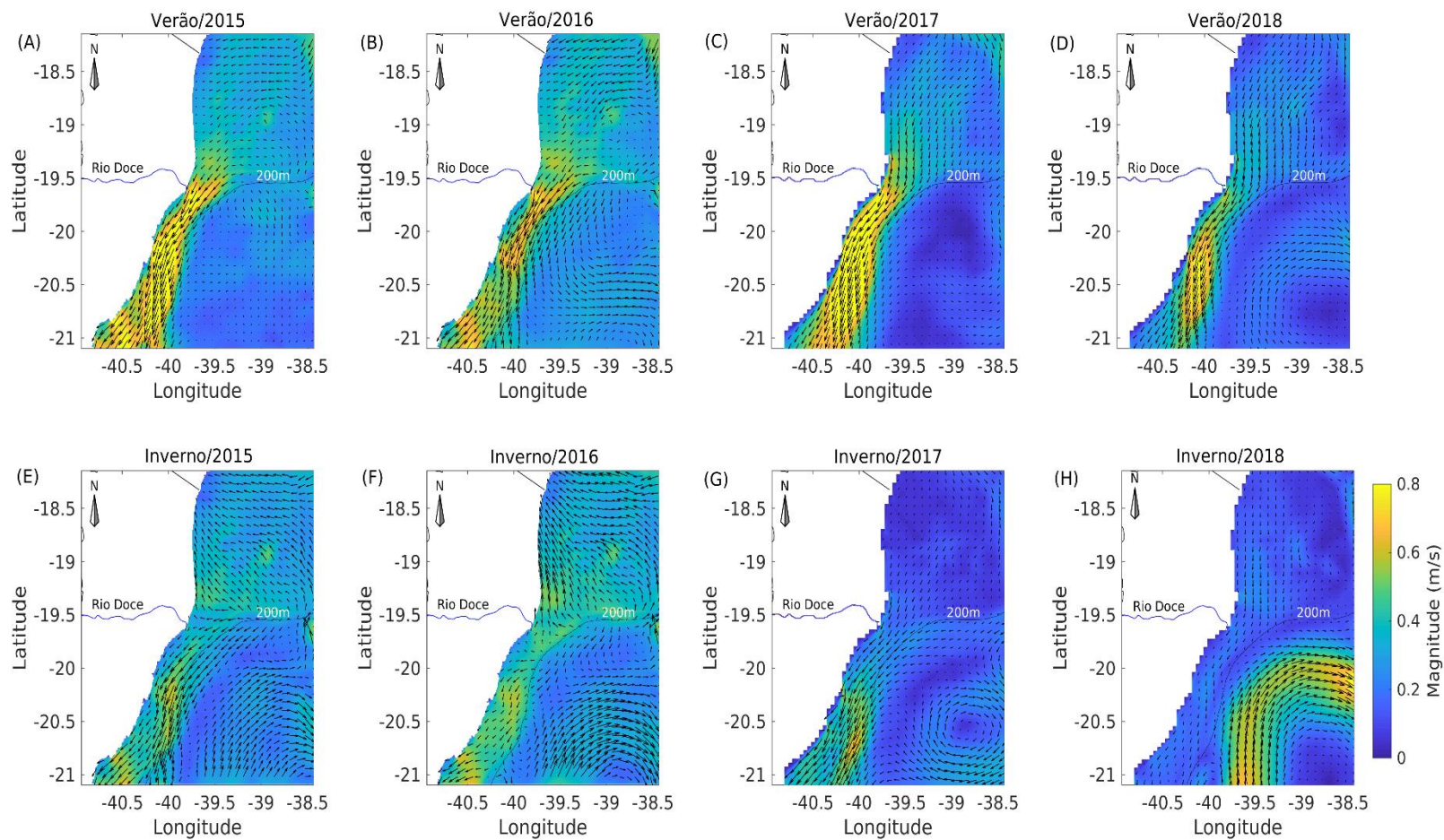
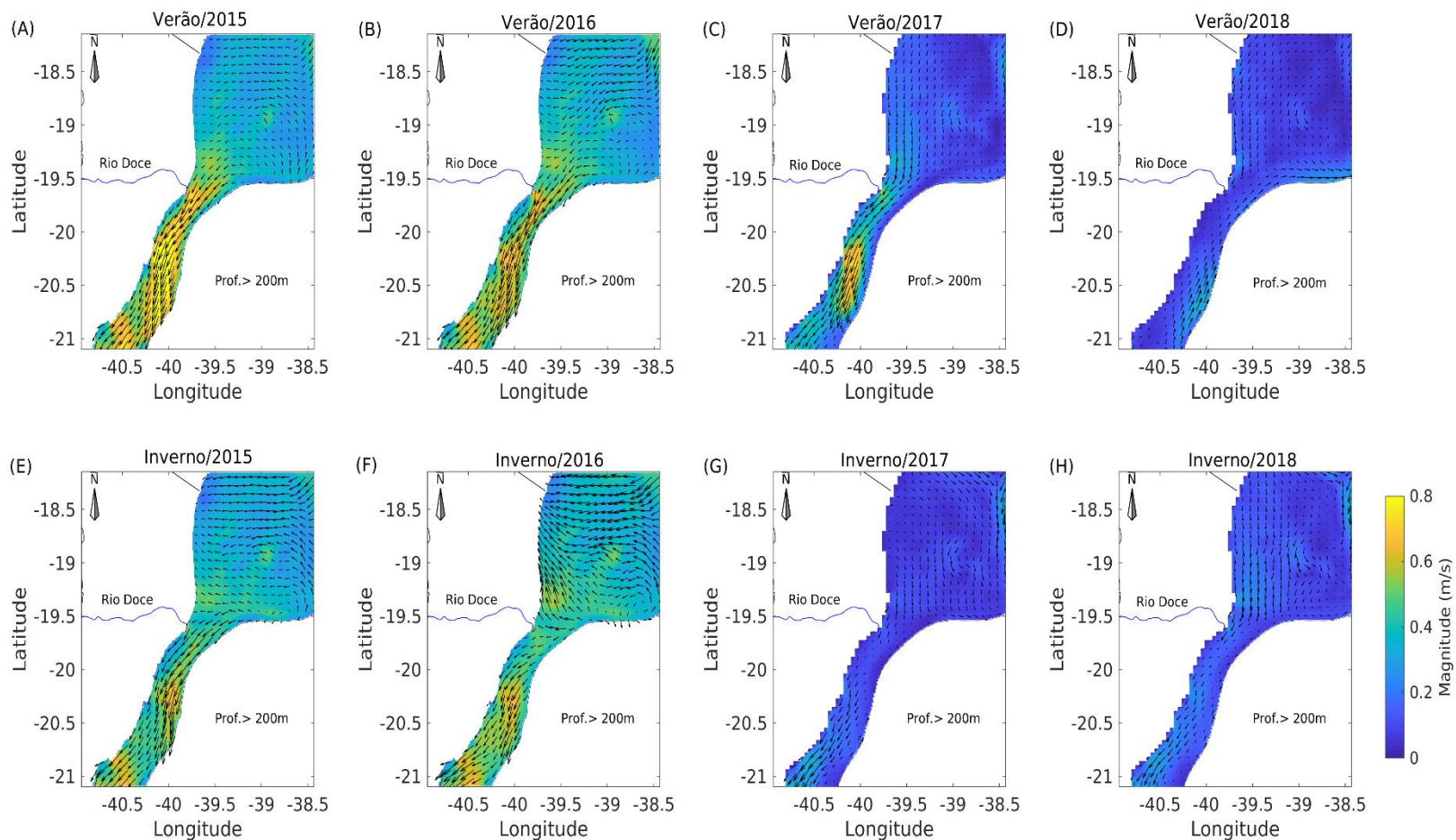


Figura 85: Campo médio sazonal da corrente de fundo para o verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Observe que um campo médio com velocidades próximas de zero não implica, necessariamente, que as velocidades são nulas, mas que o campo pode ser muito variável.



A circulação média superficial apresentada na Figura 84 evidencia que as correntes fluem preferencialmente ao longo da costa na direção sudoeste, seguindo os contornos batimétricos da plataforma continental capixaba. A magnitude das correntes no verão tendeu a ser maior do que no inverno, tanto em superfície quanto no fundo. Especialmente, o campo hidrodinâmico também se diferencia ao norte e ao sul da foz do Rio Doce (especificamente na latitude de 19,6 °S). Para todo o período investigado as intensidades médias das correntes foram maiores ao sul desta latitude (Figura 84 e Figura 85). Junto ao fundo (Figura 85) houve penetração de águas oceânicas no limite *offshore* ao longo de, praticamente, toda a região.

Os campos médios sazonais de temperatura simulados para o verão e inverno em superfície (Figura 86) e fundo (Figura 87) são mostrados a seguir.

Figura 86: Temperatura média simulada para a camada sigma 40 (Superfície), considerando os períodos de verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

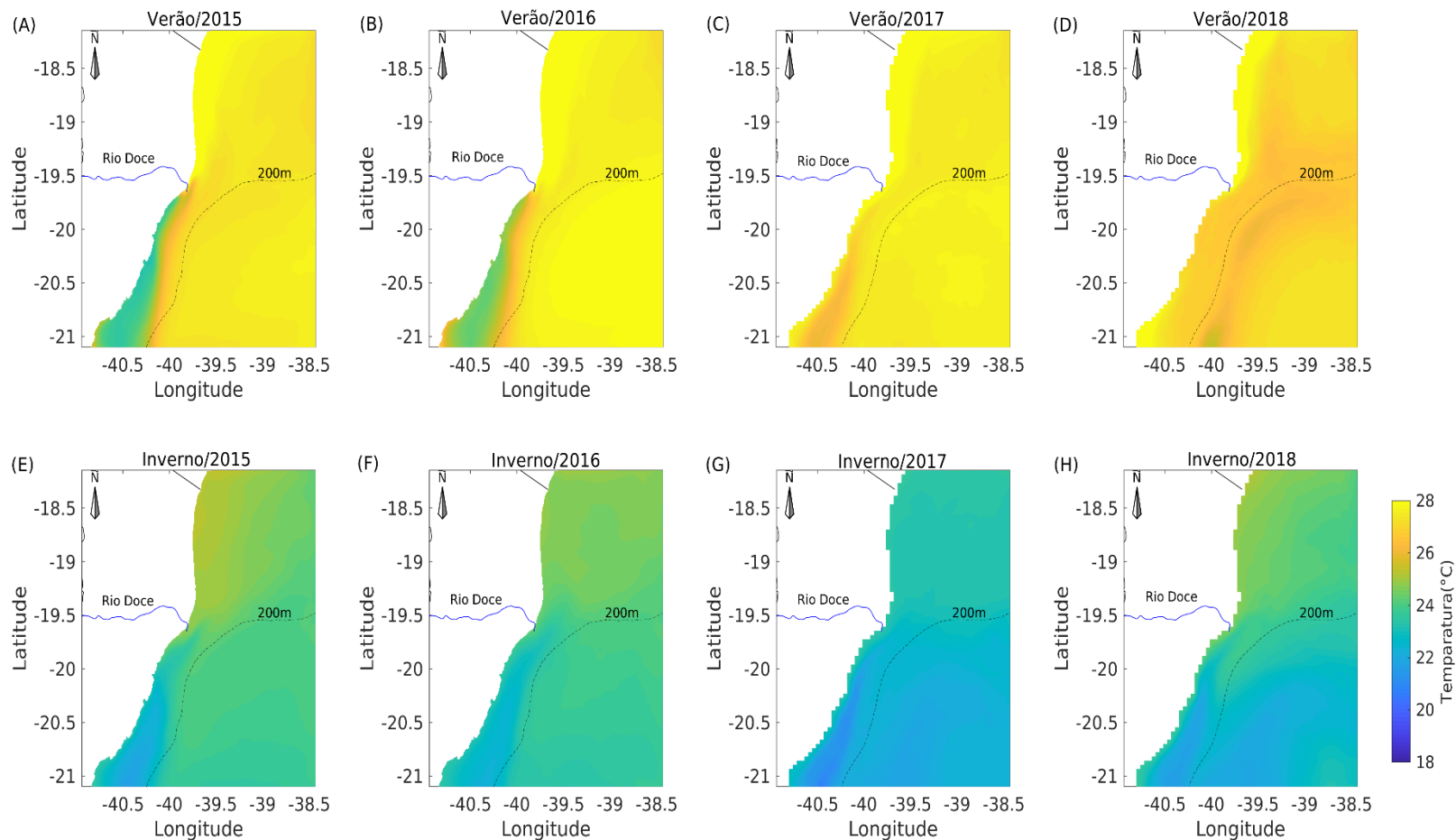
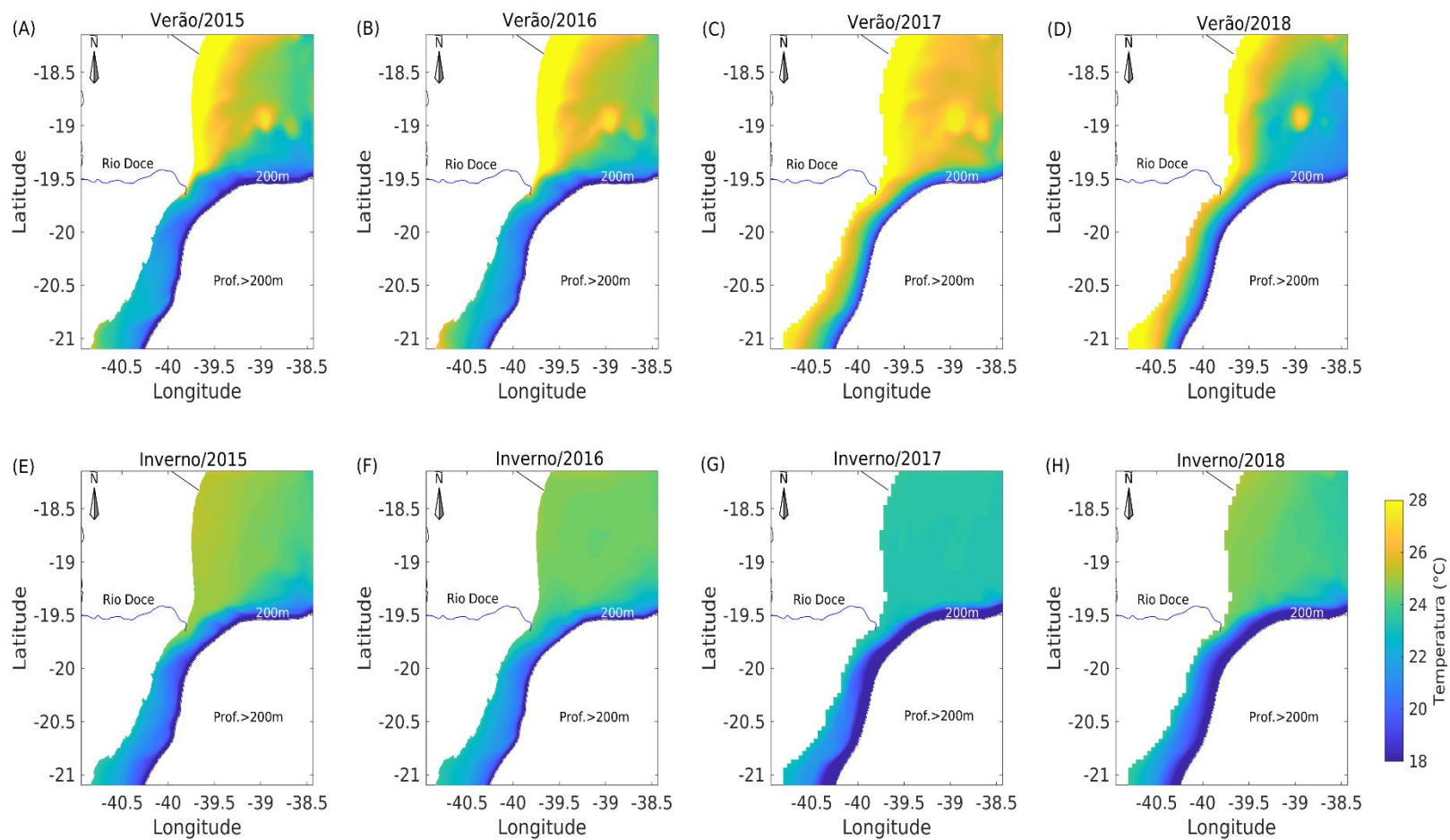


Figura 87: Campo térmico médio sazonal junto ao fundo para o verão (A, B, C e D) e inverno (E, F, G e H) dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.



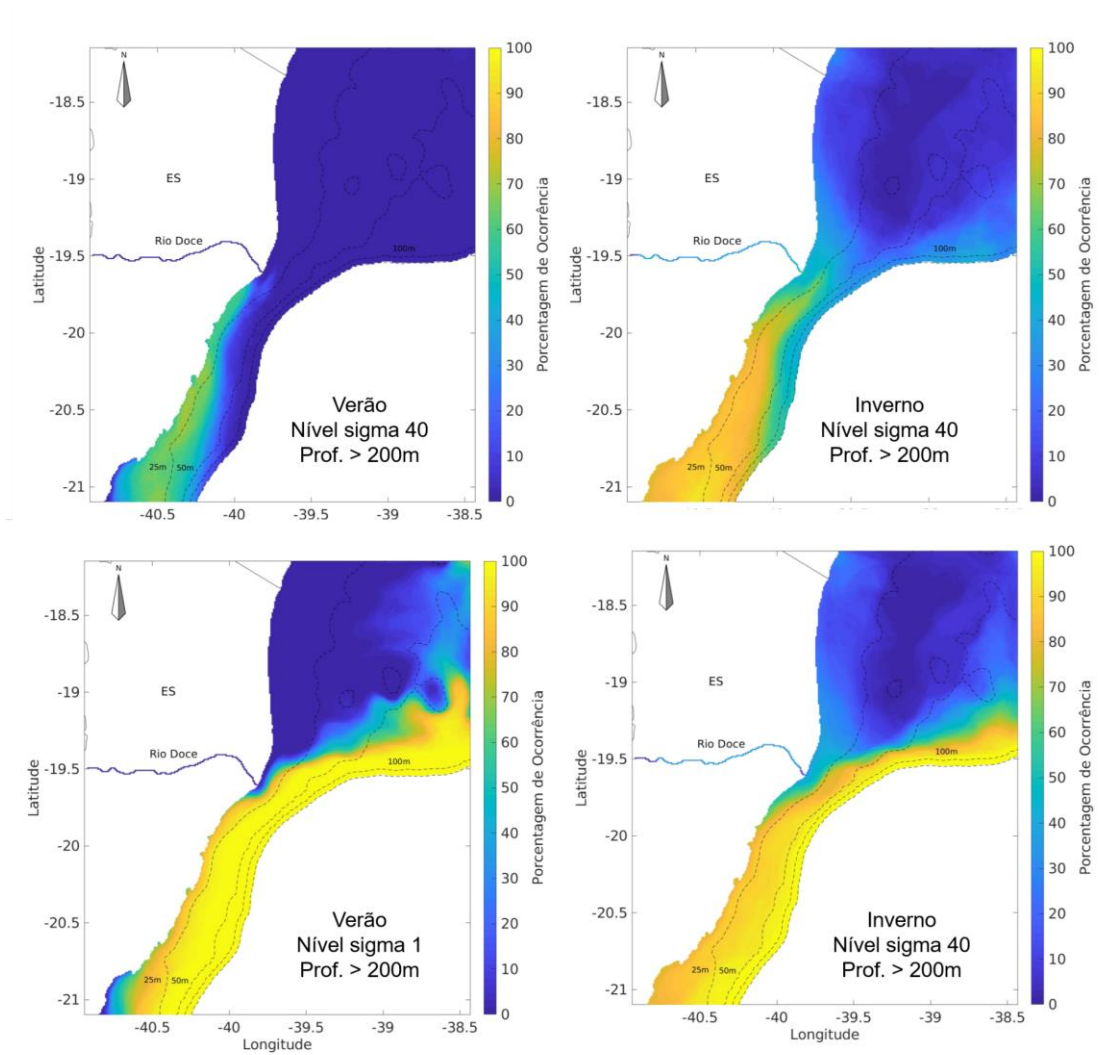
O padrão de distribuição espacial de temperatura média em superfície mostrou a presença de águas caracteristicamente mais quentes ao norte da desembocadura do Rio Doce e de águas mais frias na região da plataforma localizada ao sul da foz do rio (Figura 86 e Figura 87). O resfriamento próximo à costa, entre as latitudes de 22 °S e 19,5 °S, representa o sinal superficial de um processo de ressurgência costeira que ocorre na região, conforme reportado por Palóczy et al. (2016). Houve entrada de águas mais frias junto ao fundo ($T < 22$ °C) ao longo do talude continental (Figura 87), cujas águas afloraram à superfície no processo oceanográfico dirigido essencialmente pela ação da tensão de cisalhamento do vento local oriundos dos quadrantes norte-nordeste. Embora durante o outono e inverno as inversões de vento na região foram mais frequentes comparativamente ao verão, houve um sinal médio superficial de entrada de águas frias junto ao fundo, sugerindo que o processo ocorre ao longo do ano na região.

Da mesma forma como mostrado no campo dinâmico da região a norte da foz do Rio Doce, que possui correntes médias sazonais mais fracas, essa área também apresentou junto ao fundo a ocorrência de águas mais quentes sobre o Banco de Abrolhos ($T < 24$ °C) e águas mais frias restritas apenas a plataforma externa (Figura 87). Nesta mesma figura ficou marcada uma feição térmica que se destacou diagonalmente para dentro do Banco de Abrolhos a partir da foz do Rio Doce. A feição é claramente definida no verão, mas também aparece no inverno delimitando o limite de águas termicamente distintas. O processo físico ainda está sob análise do grupo, mas se observa que ele é concordante as isobatimétricas locais.

A dominância espaço-temporal das águas mais frias ($T < 24$ °C) é mostrada na Figura 88. Observa-se que a porcentagem de ocorrência dessas águas sobre a região da plataforma continental foi maior no inverno (Figura 88B). Por exemplo, enquanto que no verão a ocorrência na área adjacente à desembocadura do Rio Doce foi em torno de 10%, esse percentual subiu para 50% no inverno. Esta variabilidade é explicada em função do resfriamento natural do oceano condicionado pela inversão do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera (Figura 6). No inverno o oceano sofre resfriamento radiativo e o fluxo líquido de calor é negativo (GHISOLFI *et al.*, 2015), o que favorece a homogeneização da coluna de água, pois a água mais densa afunda. Segundo esses autores o condicionamento térmico anteriormente citado favorece a ação local da tensão de cisalhamento do vento facilitando a transferência vertical de *momentum* reduzindo o gradiente térmico vertical.

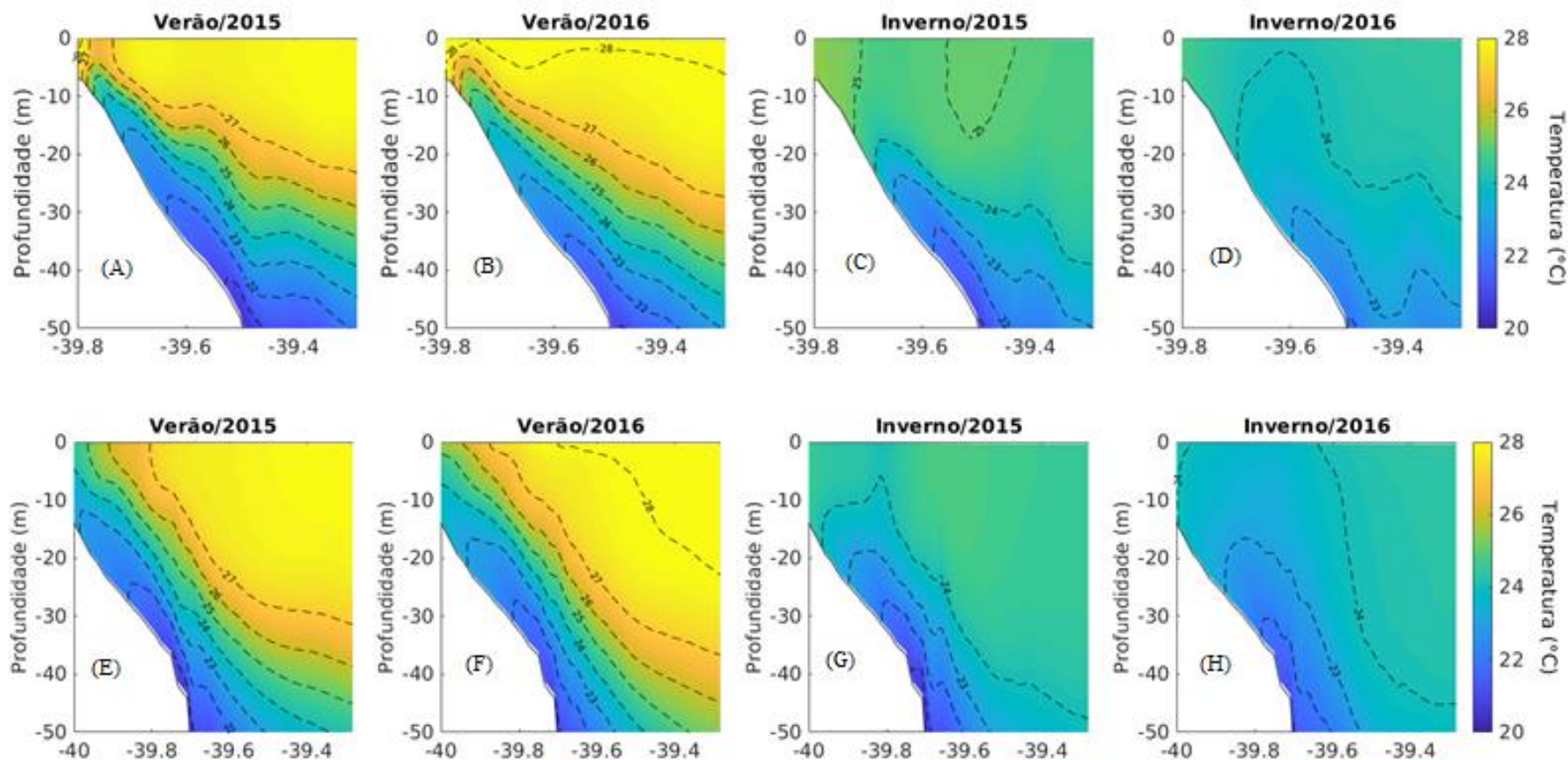
Observa-se que durante o inverno (Figura 86 e Figura 87) a coluna d'água tornou-se consideravelmente misturada se comparada à estratificação que ocorre no verão, período quando se identificou diferenças de temperatura superiores a 5°C entre a superfície e o fundo. Deste modo, pode-se afirmar que durante o verão, as baixas temperaturas identificadas próximo à desembocadura do Rio Doce decorreram essencialmente do afloramento da ACAS na plataforma continental, enquanto nos invernos as menores temperaturas foram consequência da conjunção dos processos de resfriamento sazonal do oceano e do afloramento da ACAS sobre a plataforma continental.

Figura 88: Porcentagem de ocorrência de águas com temperaturas inferiores a 24°C sobre a plataforma continental considerando os anos de 2015 e 2016. O nível sigma 40 representa a superfície e o nível sigma 1 o fundo.



A distribuição térmica ao longo de duas seções perpendiculares à costa na região da foz do Rio Doce durante o verão (Figura 89A, B, E e F) evidenciou o processo de ressurgência costeira. As águas mais frias localizadas no fundo chegaram à superfície próximo à costa ao mesmo tempo que se desenvolveu a estratificação vertical na plataforma média e externa.

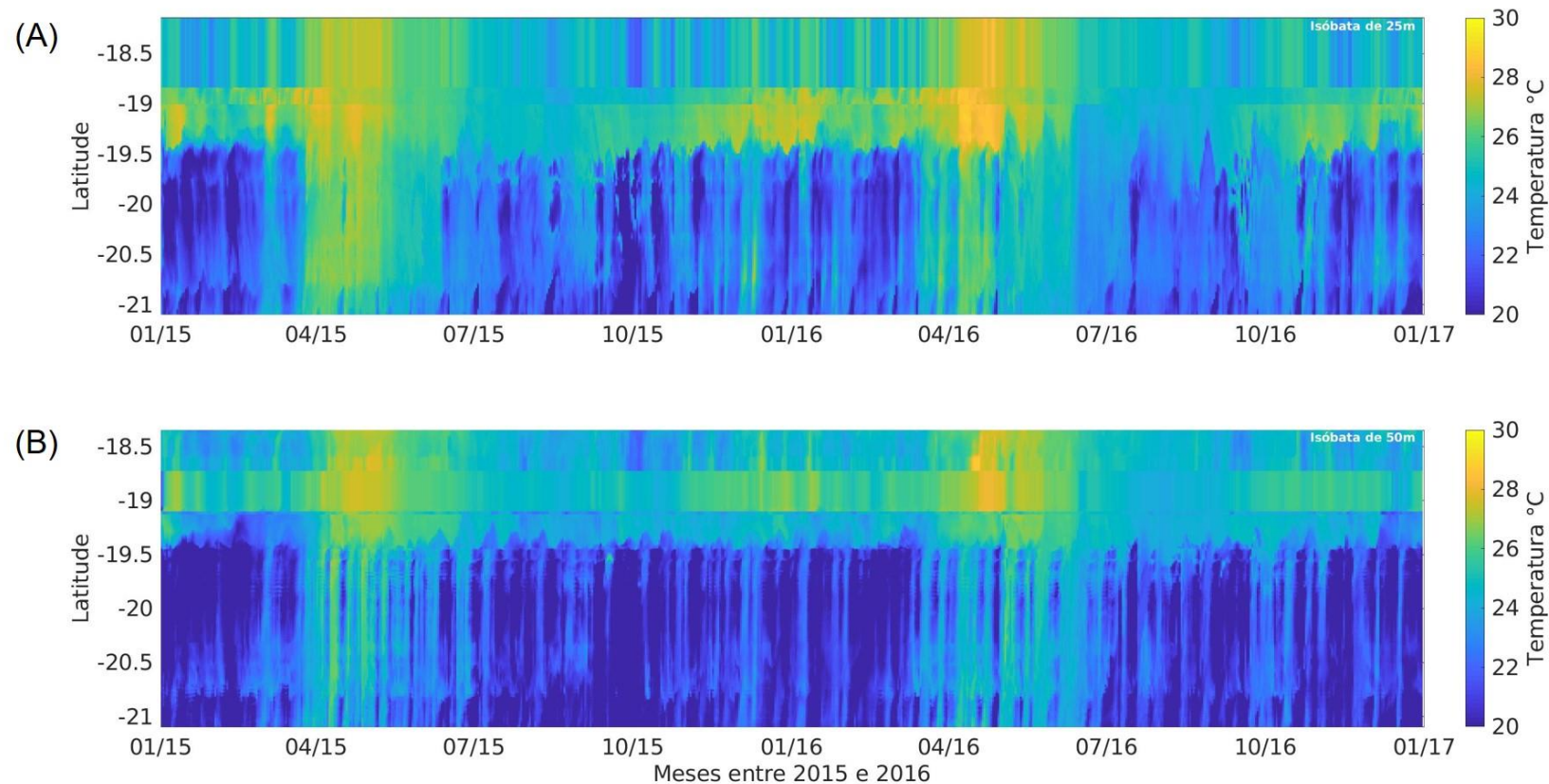
Figura 89: Seções verticais médias de temperatura para o período de Verão e Inverno dos anos de 2015 e 2016, para uma seção transversal à costa localizada em frente à desembocadura do Rio Doce (A, B, C e D) e para uma seção transversal à costa localizada ao sul da desembocadura do Rio Doce, passando pela APA Costa das Algas (E, F, G e H).



Durante o inverno a água com temperatura menor que 23 °C esteve presente no fundo da porção externa da plataforma continental em ambas as seções (Figura 89C, D, G e H). Entretanto a estratificação vertical foi significativamente menor do que aquela simulada durante o verão, conseqüentemente a coluna de água se apresentou quase que barotrópica. Padrões térmicos verticais semelhantes aos descritos anteriormente foram obtidos para os anos de 2017 e 2018.

Na Figura 90 também ficam evidentes os distintos padrões hidrodinâmicos e termohalinos entre as porções ao sul e ao norte da desembocadura do Rio Doce. Nela é mostrada a evolução temporal da temperatura simulado junto ao fundo ao longo das isóbatas de 25 m (Figura 90A) e 50 m (Figura 90B) para os anos de 2015 e 2016.

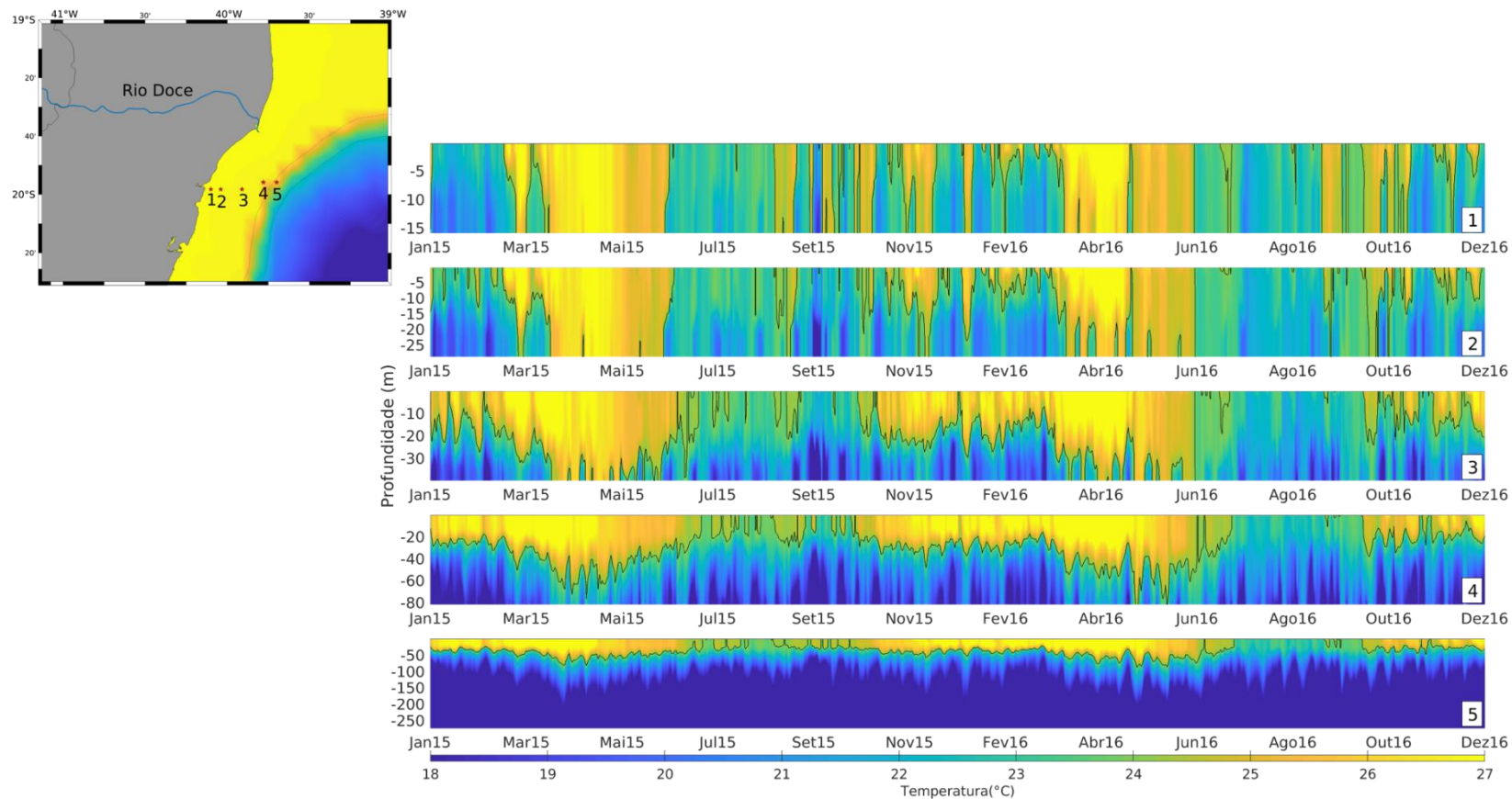
Figura 90: Evolução temporal da temperatura junto ao fundo sobre as isóbatas de 25 m (painel superior) e 50 m (painel inferior) na região oceânica próxima à foz do Rio Doce.



Especialmente, observa-se que a latitude em torno de 19,5 °S representa o limite médio entre a presença de águas frias, caracteristicamente ACAS, das águas mais quentes ao norte. Sobre esse valor médio identifica-se períodos quando a água se propagou mais para o norte e outros quando o gradiente ao longo da costa ficou reduzido. A homogeneidade ao longo da costa aconteceu predominantemente nos meses de outono (abril a junho) quando a ACAS ficou restrita às regiões externas da plataforma, em profundidades maiores que 200m.

A entrada de ACAS sobre a plataforma continental e recuo no período de outono pode ser melhor visualizada a partir da distribuição vertical temporal da temperatura dos fundeios virtuais dispostos perpendicularmente à costa (Figura 91). Nele se observa que durante os meses de verão a água fria ($T < 24$ °C) ocorreu em superfície nos dois fundeios costeiros (1 e 2). Nos três fundeios restantes a água fria se manteve abaixo dos 25 – 30 m, em média. Já nos meses de inverno a estratificação vertical foi fortemente reduzida e a coluna d'água tendeu a ficar homogênea e fria.

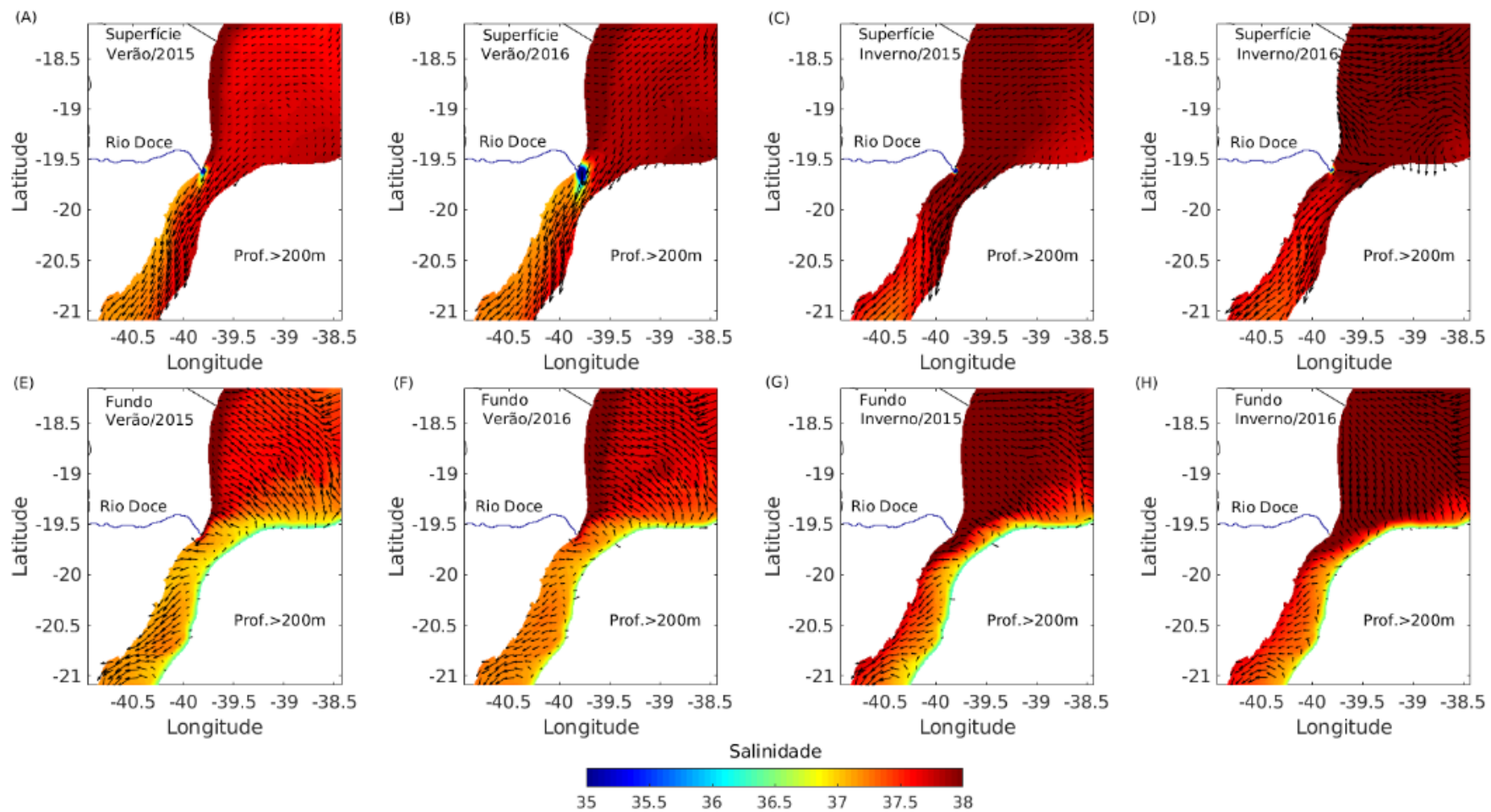
Figura 91: Evolução temporal dos perfis verticais de temperatura a partir de 5 fundeios virtuais dispostos, aproximadamente, na direção perpendicular à plataforma continental próxima da Costa das Algas (ver mapa no canto superior esquerdo). A isolinha preta marca a isoterma de 24 °C.



O mesmo se verificou nos meses de outono quando a homogeneidade térmica ocorreu até os 30 – 40 m de profundidade. Embora a variabilidade temporal térmica revelou que, em média, a ACAS estivesse presente sobre a plataforma continental na maior parte do ano, as entradas e saídas da água fria ocorreram na forma de pulsos com duração de dias associados às oscilações no campo de ventos. Logo, constata-se que a penetração de ACAS sobre a plataforma continental capixaba não é um fenômeno com ocorrências restritas ao período do verão, mas um processo que ocorreu ao longo de boa parte do ano, exceto nos meses de outono quando ela ficou restrita ao fundo na porção externa da plataforma. As condições de afloramento da ACAS próximo à costa ocorrem pela combinação da penetração da ACAS e ventos favoráveis ao desenvolvimento da ressurgência costeira completa. Mesmo que não haja o afloramento, a chegada de águas da ACAS rica em nutriente à zona fótica pode produzir efeitos ecológicos importantes na região.

Para os anos de 2015 e 2016 a distribuição média sazonal de salinidade sobre a plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce, mostrou um padrão semelhante ao descrito para o campo térmico (Figura 86 e Figura 87), com valores de salinidade maiores ao norte da foz do Rio Doce e menores ao sul (Figura 92A, B, C e D). Invariavelmente os mesmos padrões de distribuição de salinidade, não mostrados no texto, foram obtidos nos anos de 2017 e 2018. A distribuição de salinidade junto ao fundo mostra o sinal de entrada da ACAS sobre a plataforma continental para as diferentes estações (Figura 92E, F, G e H).

Figura 92: Salinidade média simulada para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015 e 2016, para o nível sigma 40 (superfície) e nível sigma 1 (fundo). Os vetores representam a circulação média para os mesmos períodos nos respectivos níveis.

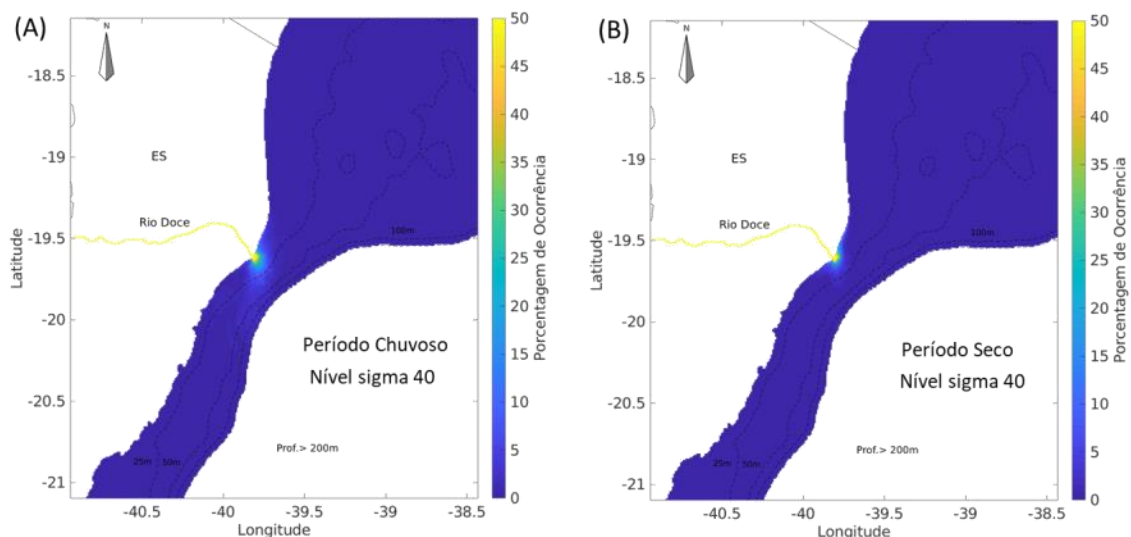


Em superfície, a salinidade média esteve acima de 37 em quase toda a região simulada (Figura 92). A pluma de água de menor salinidade associada à foz do Rio Doce teve uma maior amplitude de distribuição durante o verão, enquanto que durante o inverno ela esteve restrita à foz. O espalhamento dessa água doce sobre a região da plataforma continental foi, primordialmente, condicionado pela descarga continental aportada à plataforma continental nas estações seca e chuvosa, assim como ao regime de ventos incidentes sobre a região de estudo nas diferentes épocas do ano. Embora no verão de 2016 o aporte de água continental tenha sido mais significativo do que aquele em 2015, a distribuição espacial da água com salinidade inferior a 35 se restringiu, em média, à região da foz do Rio Doce, muito embora os campos instantâneos tenham mostrado que esse espalhamento possa ter sido maior sob específicas condições hidrodinâmicas e meteorológicas.

Quando os resultados foram agrupados nos períodos chuvoso (novembro a março) e seco (abril a outubro) o percentual de ocorrência de água com salinidade inferior a 35 (Figura 93) mostrou novamente a pluma restrita à foz do Rio Doce em ambos os períodos direcionada para sul/sudeste no período chuvoso e para o norte ao longo da costa no período seco. O direcionamento foi condicionado pela ação da tensão de cisalhamento predominante nestes dois períodos.

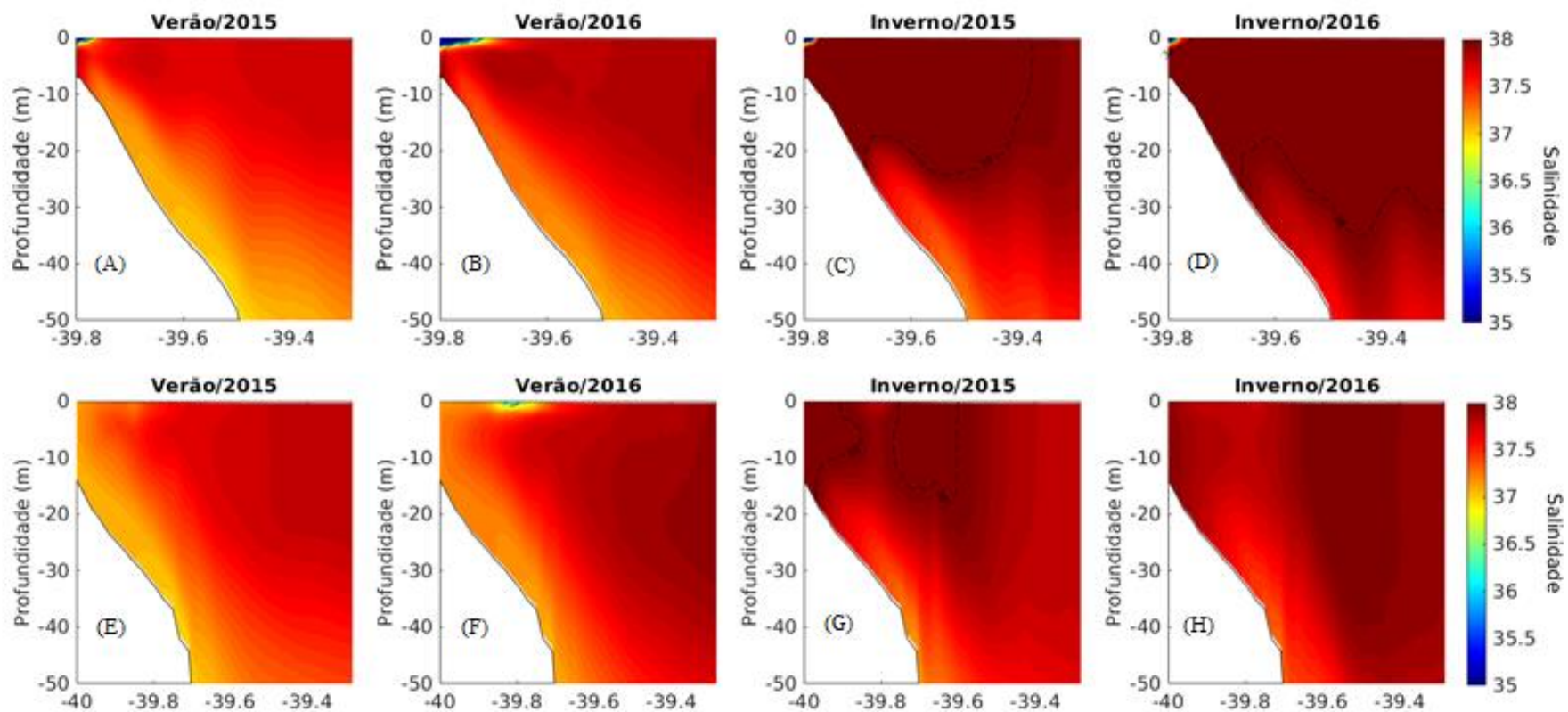
Próximo ao fundo a salinidade foi menor ao sul do que ao norte da latitude 19,5 °S (Figura 92) e menor ainda mais na porção externa da plataforma continental associada a entrada de água mais fria e menos salina.

Figura 93: Percentual de ocorrência de água com salinidade inferior a 35 em superfície sobre a plataforma continental nos períodos chuvoso (novembro a março) e seco (abril a outubro).



A água de mistura (fluvial e marinha) próxima à Foz do Rio Doce esteve, em média, confinada à plataforma continental interna, não alcançando isóbatas maiores que 20 m de profundidade (Figura 93 e Figura 94). Além disso, a água de mistura permaneceu restrita aos primeiros metros da coluna d'água, evidenciando um forte gradiente horizontal e vertical de salinidade com águas oceânicas adjacentes (Figura 94).

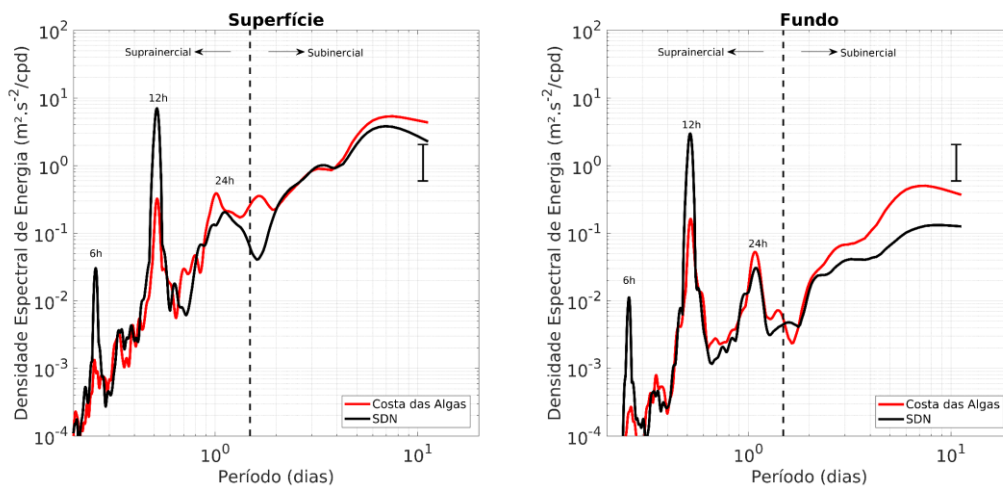
Figura 94: Seções verticais médias sazonais de salinidade simulada para o verão e o inverno dos anos de 2015 e 2016 para uma seção transversal à costa localizada em frente à desembocadura do Rio Doce (A, B, C, D) e para uma seção transversal à costa localizada ao sul da desembocadura do Rio Doce, passando pela APA Costa das Algas (E, F, G e H).



Durante o verão de 2016, período de maior vazão entre os anos analisados, a água de mistura mostrou um maior alcance zonal e foi possível evidenciar um sinal superficial na média a aproximadamente 11,8 km da desembocadura do rio.

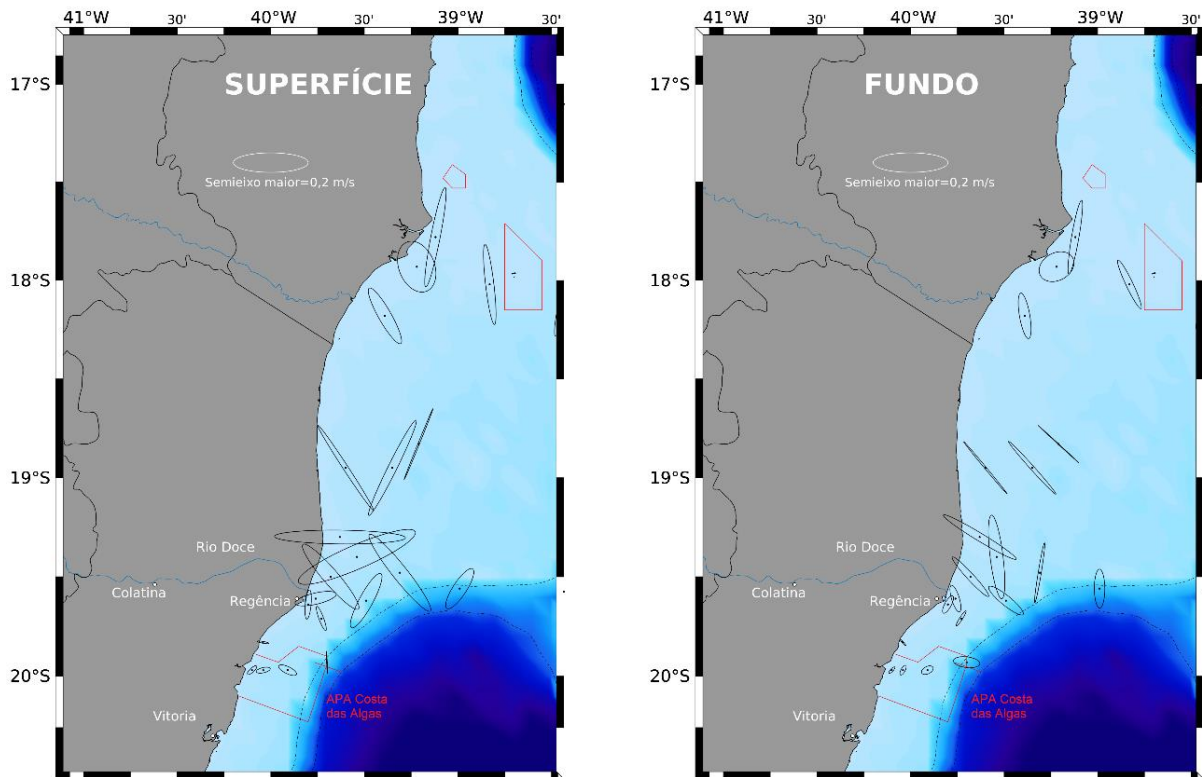
Embora, em média, a circulação costeira próxima à foz indique uma dominância de efeitos combinados de vazão e vento no campo próximo e afastado ao rio, em escalas de frequências mais altas outros processos oceanográficos atuam na região e mostram uma variabilidade que influencia a dinâmica da plataforma continental e a dispersão das águas fluviais. A partir da análise espectral de séries temporais simuladas (Figura 95) observou-se que a variabilidade de correntes em escala suprainercial (período inercial local de aproximadamente 35 h) foi dominada pela influência da maré.

Figura 95: Espectros de potência da componente *alongshore* da corrente simulada para o período de verão de 2016 na APA Costa das Algas (sul da foz) e SDN (norte da foz), próximo à isóbata de 25m. À esquerda para o campo superficial e à direita para o fundo.



A componente semidiurna (~12h) da maré mostrou-se dominante nas bandas suprainerciais do espectro de energia das correntes tanto ao sul (APA Costa das Algas) quanto ao norte da foz do rio (SDN), com contribuições secundárias de componentes diurnas (~24h) e quartodiurnas (~6h) na região. No entanto, a energia associada à maré ao norte da foz do Rio Doce foi maior quando comparada àquela ao sul da foz. Para avaliar essa diferença foram calculadas as amplitudes e fases da constituinte harmônica M_2 nos fundeios virtuais ao longo da plataforma continental e talude. As elipses dessa constituinte mostram essa diferença entre o norte e o sul da foz (Figura 96).

Figura 96: Elipses de maré da constituinte harmônica M2 calculadas para os pontos selecionados dos fundeios virtuais sobre a plataforma continental e talude: à esquerda, elipses de maré superficiais; à direita, elipses de maré junto ao fundo.



Sobre o Banco de Abrolhos, as correntes de maré associadas a M_2 excedem 0,4 m/s em alguns pontos, semelhante às observações realizadas no fundeio F4 próximo a Degredo. Além disso, é importante notar que as elipses sobre o banco apresentam grande excentricidade, mostrando uma polarização bastante acentuada da direção dos vetores de maré com a evolução dos ciclos de baixamar e preamar. As elipses se dispõem obliquamente (sudoeste-noroeste) em relação à linha de costa nessa região, principalmente próximo ao fundo.

Na região da APA, a diminuição da energia da maré na circulação costeira esteve acompanhada por um aumento da energia na banda subinercial local, com processos de 3 - 10 dias associados essencialmente ao vento local e remoto. Os comportamentos das bandas suprinericial e subinercial modelados têm grande semelhança aos resultados obtidos com a análise dos dados de correntes dos fundeios lançados na região no final de 2018. A superfície e o fundo mostraram processos de períodos semelhantes, apenas com energias diferentes.

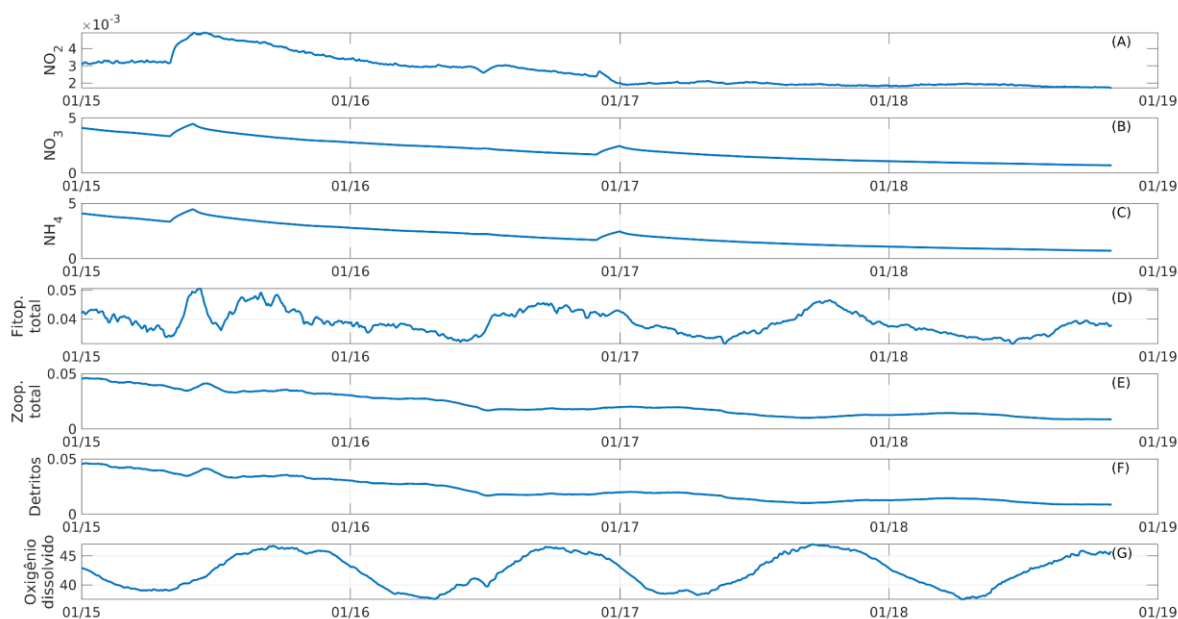
2.4.2 Modelo biogeoquímico

Os resultados da modelagem biogeoquímica com o modelo BioEBUS foram analisados a partir dos campos das concentrações de nitrito, nitrato, amônio, fitoplâncton total (soma de nanofitoplâncton e microfitoplâncton), zooplâncton total (soma de microzooplâncton e mesozooplâncton), detritos e oxigênio dissolvido. É importante salientar que nesta etapa não foi simulado o *input* de substâncias orgânicas e inorgânicas provenientes do aporte fluvial do Rio Doce na plataforma continental. Os

processos biogeoquímicos simulados refletem a dinâmica espacial e temporal de fenômenos bióticos e abióticos típicos da plataforma continental do Espírito Santo e Banco de Abrolhos. Outro detalhe importante é que, embora o BioEBUS simule trocas entre compartimentos bióticos e abióticos, os resultados são essencialmente a solução numérica de equações advectivo-difusivas de nitrogênio com os termos fonte e sumidouro desse elemento. Portanto, as unidades de fitoplâncton, zooplâncton, nitrito, nitrato, amônio e detritos são dadas em valores equivalentes de nitrogênio (mmol N/m^3).

Os resultados apresentados nesta seção referem-se ao período de simulação que se estendeu de 2015 a 2018. Os resultados apresentados na Figura 97 mostram que as variações temporais das concentrações de oxigênio dissolvido (Figura 97A) e de fitoplâncton total (Figura 97D) apresentaram variações cíclicas e estáveis a partir de 2015, enquanto as demais variáveis atingiram maior estabilidade a partir de janeiro de 2017. Embora não inviabilize as análises apresentadas neste relatório, apesar do modelo ter iniciado em janeiro de 2013, os resultados sugerem que seja necessário um tempo maior de simulação para que todas as variáveis pudessem ficar completamente estabilizadas.

Figura 97: Evolução temporal dos valores médios no domínio da simulação das concentrações de Nitrito, Nitrato, Amônio, fitoplâncton total, zooplâncton total, detritos (todos em mmol N/m^3) e oxigênio dissolvido (em mmol O/m^3) obtidos para o domínio do modelo entre os anos de 2015 e 2018.



2.4.2.1 Análises preliminares dos resultados do modelo BioEBUS

A quantidade de matéria orgânica produzida pelos organismos autotróficos (organismos fotossintéticos) a partir da energia solar é designada de produção primária, sendo a quantidade de energia produzida denominada de produtividade primária. De acordo com Karl *et al* (2003) a produção nova está relacionada a atividade fitoplanctônica, sendo intrinsecamente relacionada às concentrações de nutrientes nitrogenados (NO_3^- , NO_2^- e NH_4^+ , por exemplo) presentes na zona eufótica. As concentrações

dos nutrientes na zona eufótica dos oceanos depende do suprimento advindo de fontes naturais (ex.: intemperismo e ressurgência costeira) e de fontes antropogênicas (ex.: esgotos e fertilizantes).

Entre as Figura 100 e Figura 104 são apresentados os resultados das concentrações superficiais médias sazonais de nitrito, nitrato, amônio, fitoplâncton total, zooplâncton total, clorofila-*a* e oxigênio dissolvido, para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Os valores das concentrações de clorofila-*a* foram estimados a partir dos valores das concentrações do fitoplâncton total, obedecendo a metodologia utilizada por Penven *et al.* (2007). Os diferentes padrões observados nas Figura 98, Figura 99 e Figura 100 (NO_2^- , NO_3^- e NH_4^+) impactam diretamente a produtividade primária, visto que esta é afetada tanto pelas concentrações de nutrientes quanto pelas variações sazonais da radiação solar e por mudanças na circulação oceânica, acarretando em modificações nas comunidades fitoplanctônica e zooplanctônica, nas concentrações de clorofila-*a* e de oxigênio dissolvido (Figura 101, Figura 102, Figura 103 e Figura 104). Embora distribuições espaciais características das estações possam ser observadas nas análises entre as estações do ano, verifica-se que algumas variáveis (e.g., nitrato, Figura 99) apresentam destacada mudança entre os diferentes anos. Essas mudanças, no entanto, refletem mais a evolução da estabilização da variável do que efetivamente variações interanuais de condições meteoceanográficas

Figura 98: Campos médios da concentração de nitrito (em mmol N/m^3) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

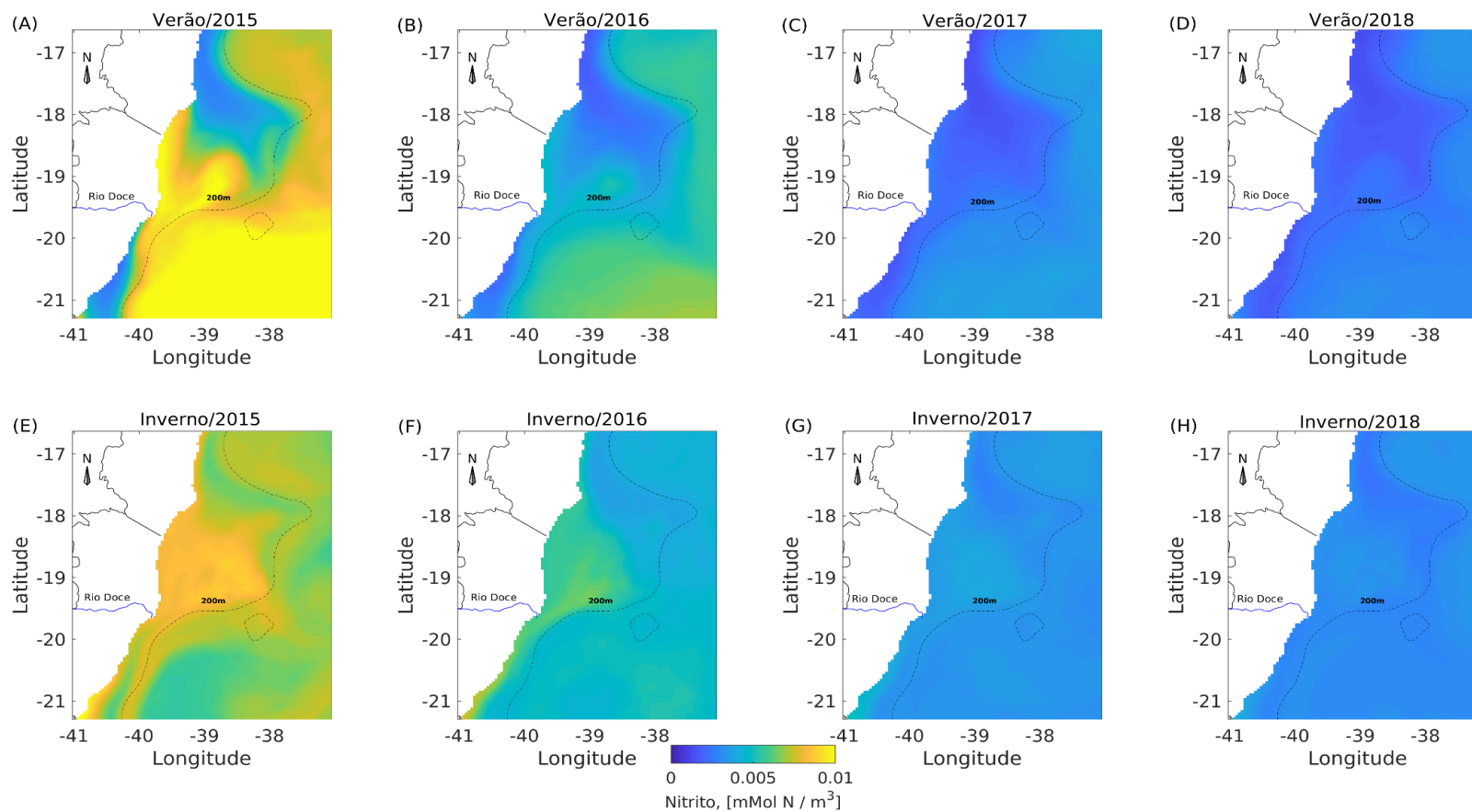


Figura 99: Campos médios da concentração de nitrato (em mmol N/m^3) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

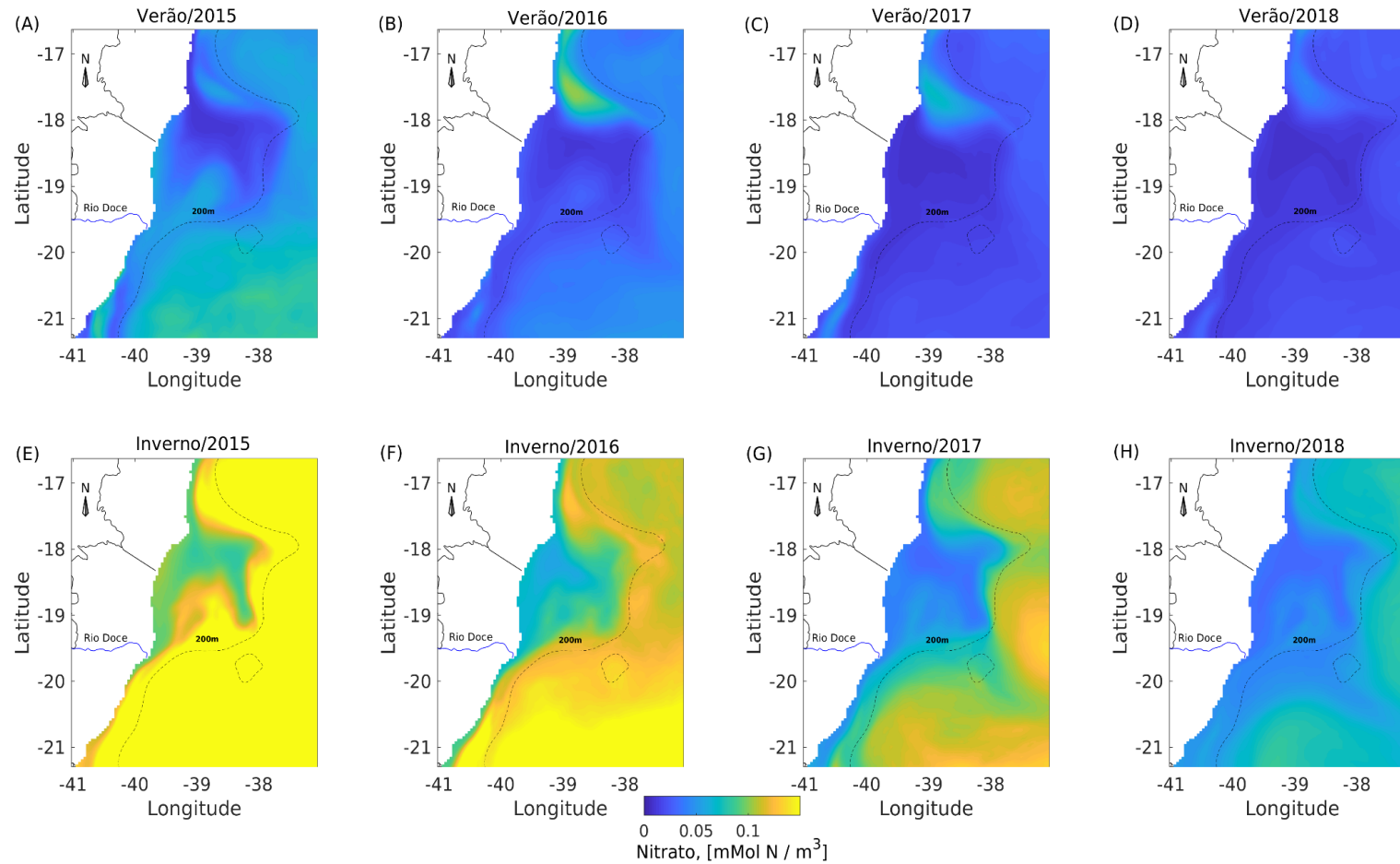


Figura 100: Campos médios da concentração de amônio (em mmol N/m^3) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

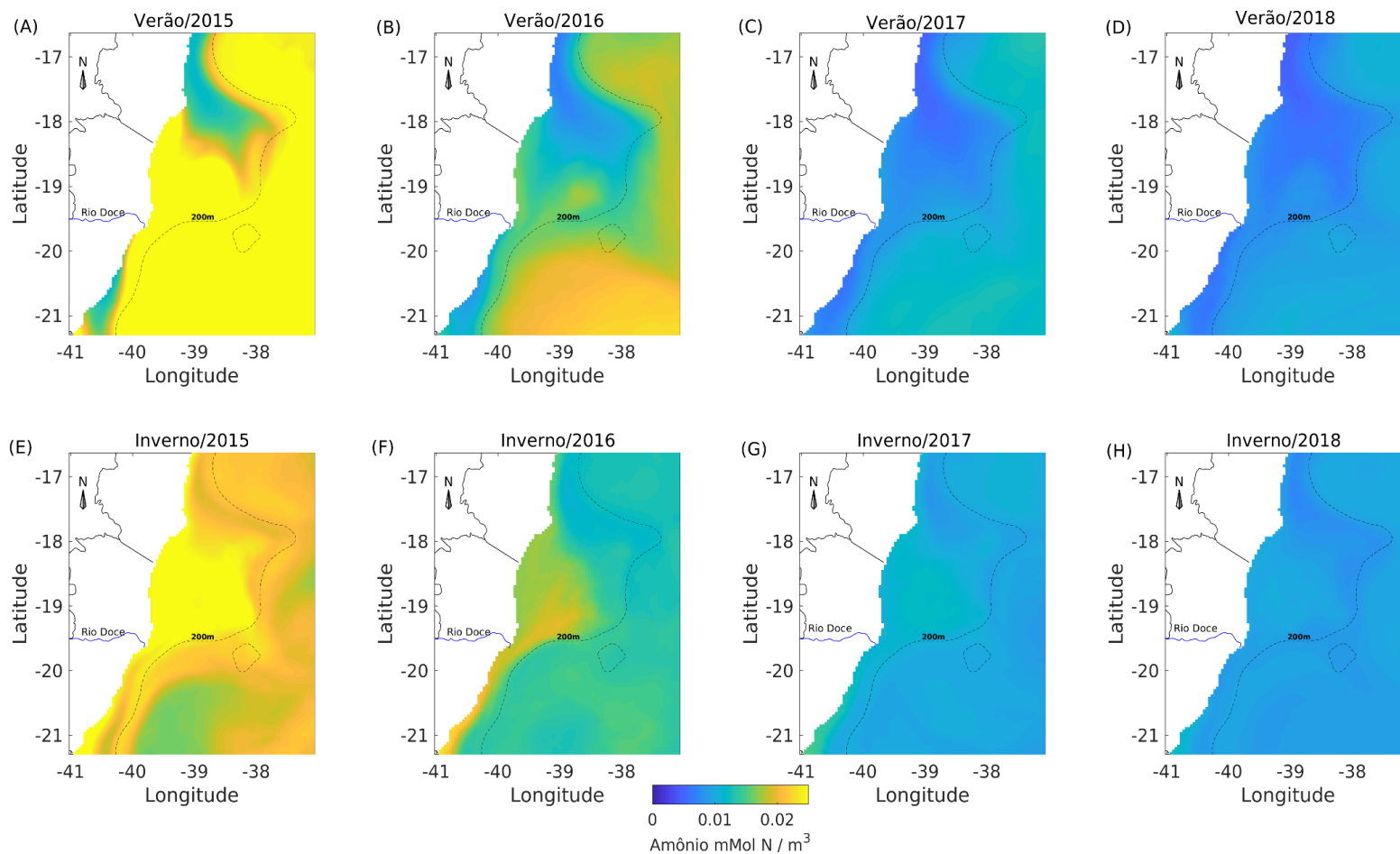


Figura 101: Campos médios da concentração de fitoplâncton total (em mmol N/m^3) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

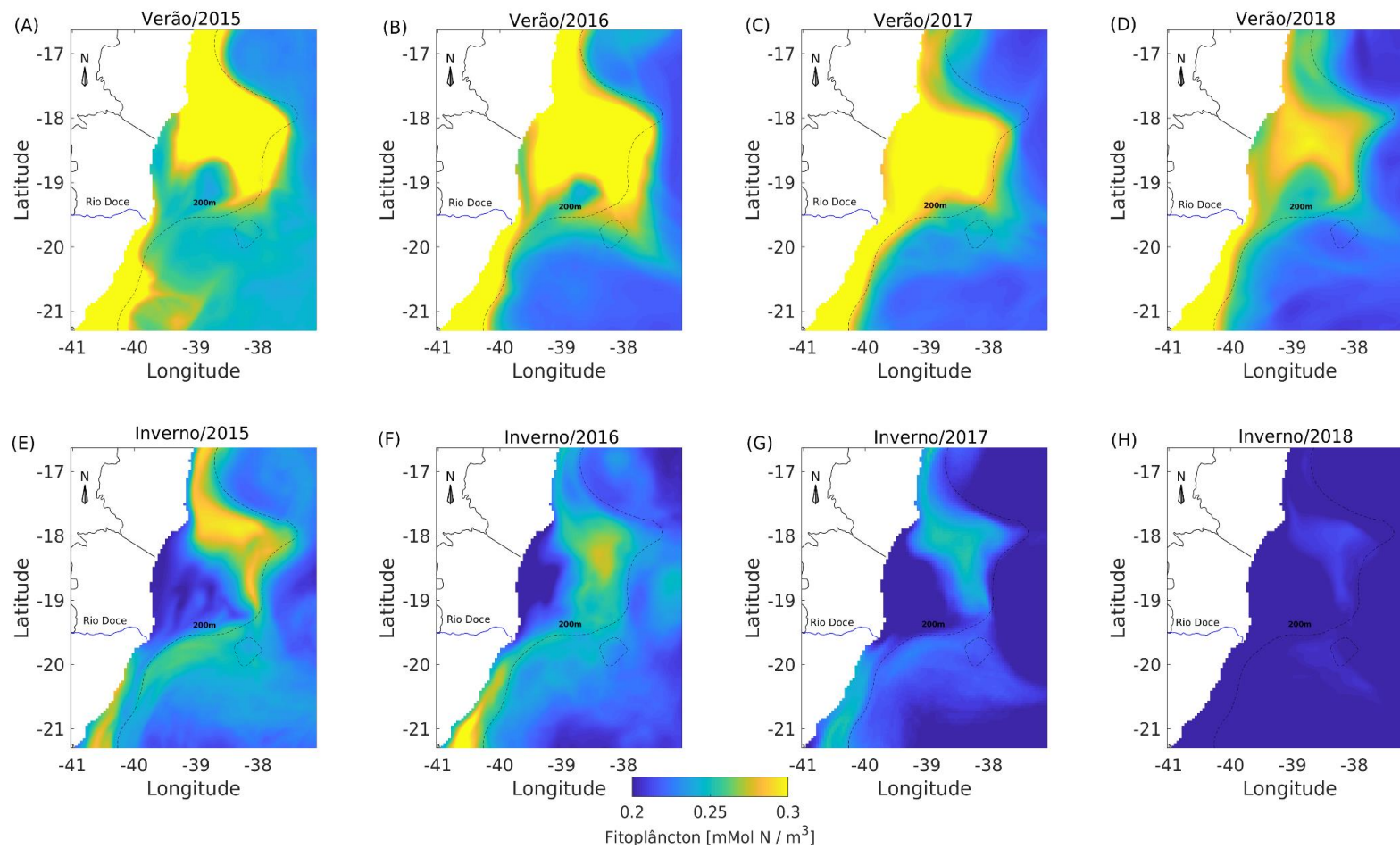


Figura 102: Campos médios da concentração de zooplâncton total (em mmol N/m³) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

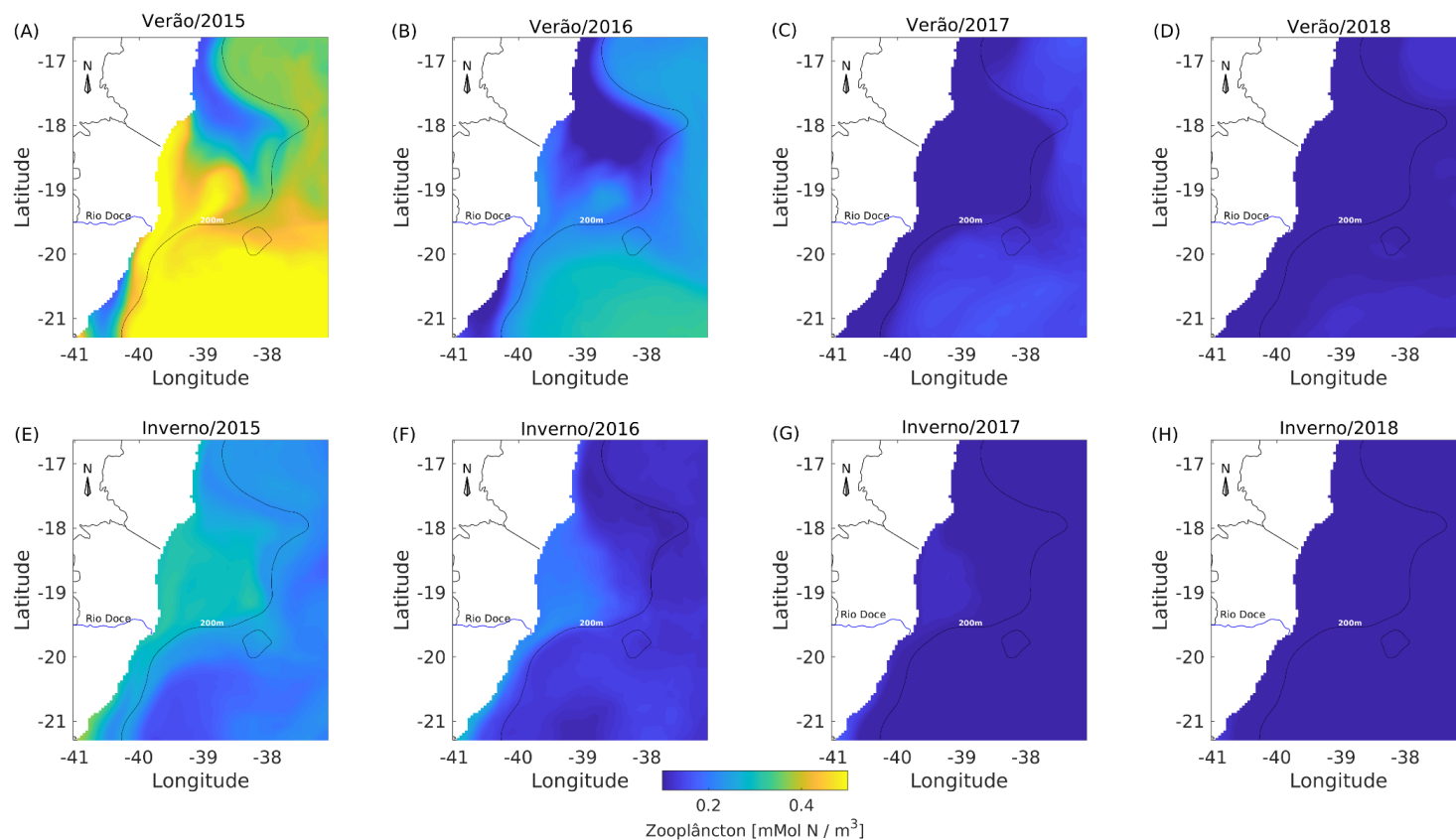


Figura 103: Campos médios da concentração de clorofila-a (em mmol N/m^3) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.

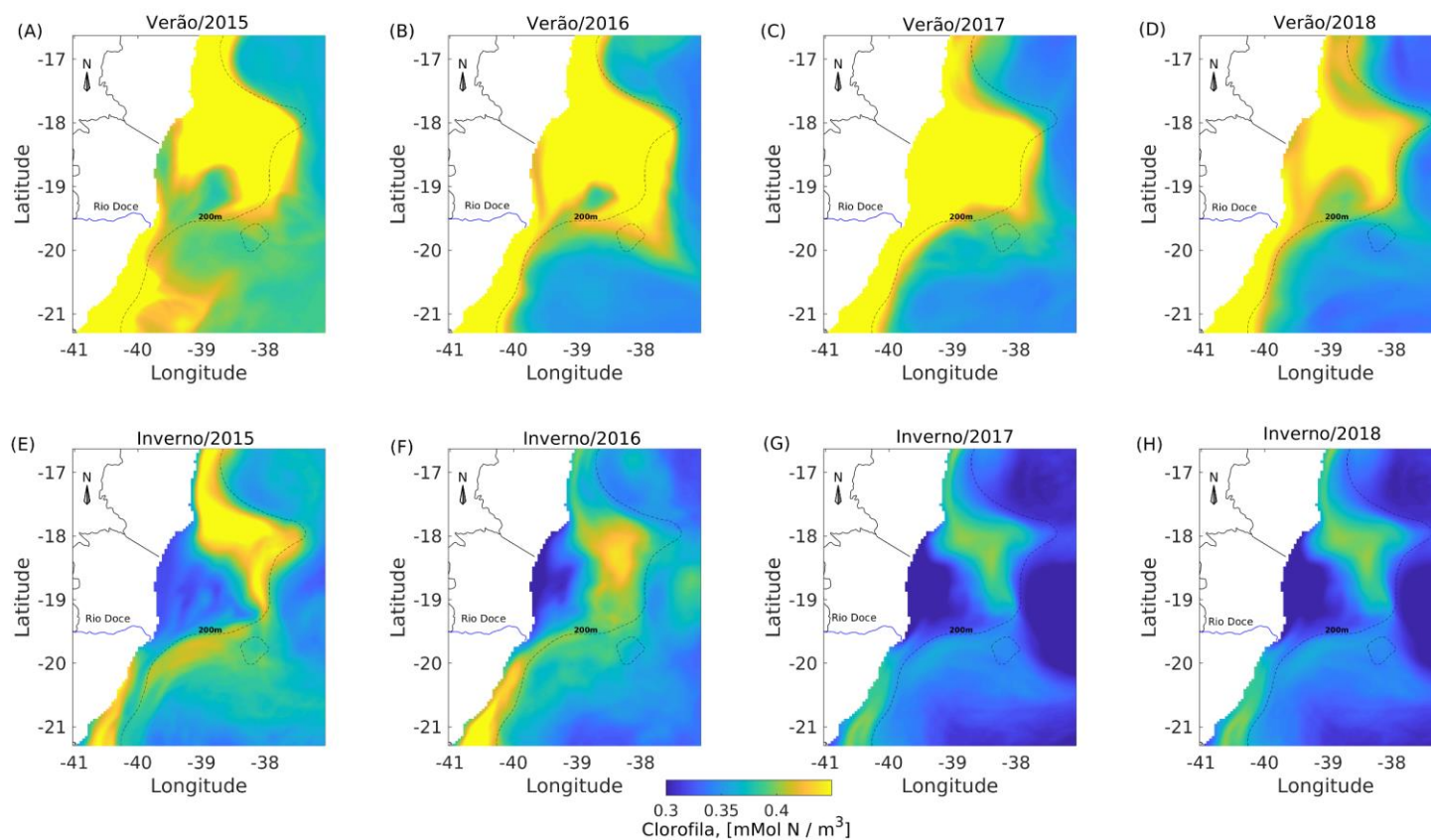
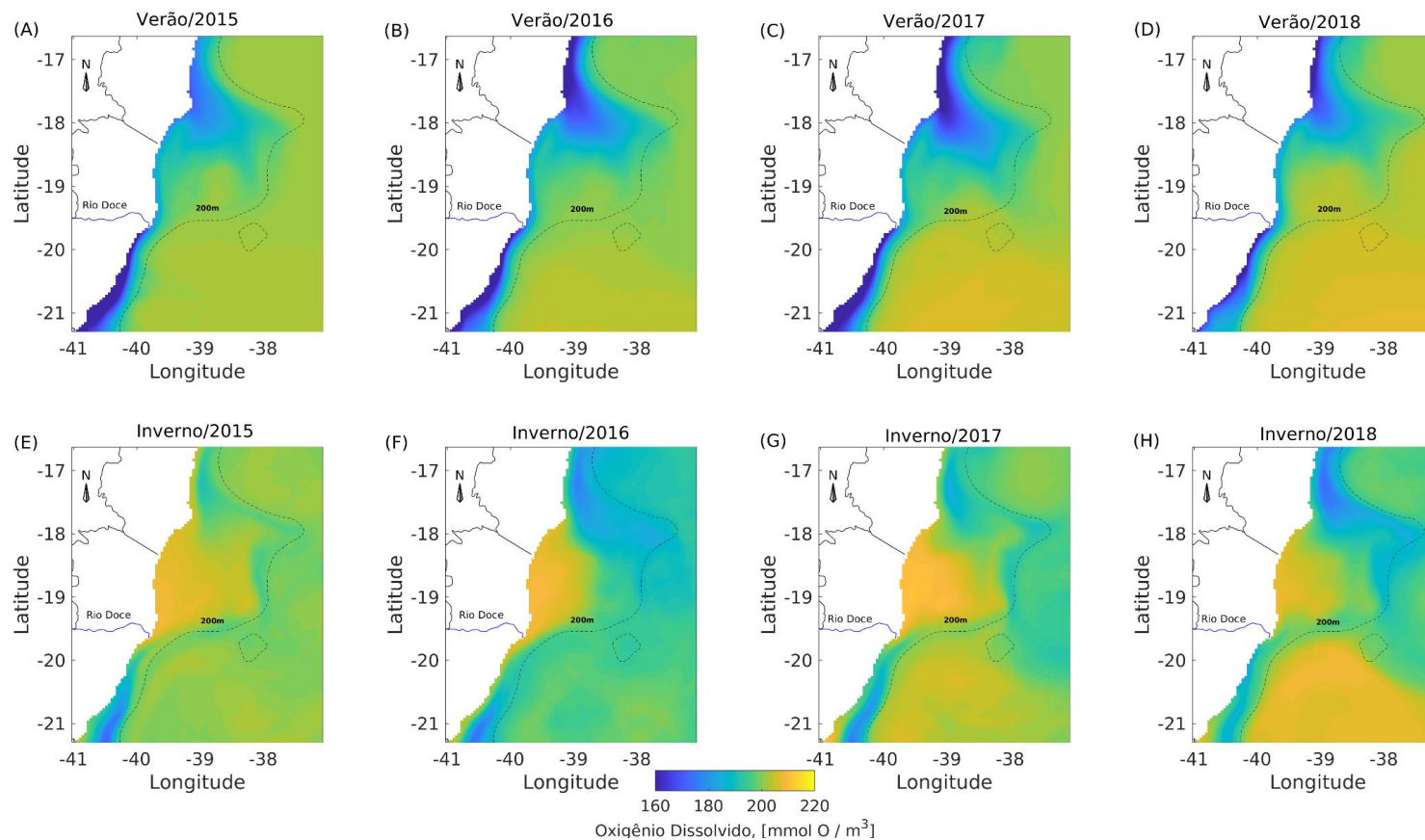


Figura 104: Campos médios da concentração de oxigênio dissolvido (em mmol O/m^3) superficial (camada sigma 40) na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018.



Os processos biológicos sobre as plataformas continentais apresentam intrínseca relação com a circulação superficial dos oceanos dirigida pela tensão de cisalhamento do vento, pelas diferenças de densidade e fluxos de energia, que acabam condicionando a inserção de nutrientes na região da plataforma proporcionada pela dinâmica de Ekman e afetando a posição da nutriclina (PETERSON & STRAMMA, 1991; PAULY *et al.*, 1995; CARR, 2001; CARR & KEARNS, 2003; LACHKAR & GRUBER, 2011). Sabe-se que o afloramento de águas frias sobre a plataforma proporciona o aumento nas concentrações de nutrientes e, conseqüentemente, um aumento na produtividade primária contribuindo, desta forma, com a dinamização da cadeia trófica (MATSUURA, 1986). A base da cadeia alimentar marinha é constituída pelos organismos fitoplanctônicos que produzem matéria orgânica a partir do conteúdo inorgânico disponível, e os transferem aos demais níveis tróficos. Logo, o conhecimento sobre a resposta destes organismos a circulação e a estabilidade da coluna d'água é de suma importância para a compreensão da distribuição e abundância dos demais níveis tróficos. A distribuição de nutrientes é o principal modulador dos níveis da produção primária líquida nas zonas de ressurgência costeira (LAZANEO, 2014). Na borda oeste dos oceanos, como no caso da Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSB), a estrutura vertical da corrente de contorno é mais profunda, logo a nutriclina encontra-se em maiores profundidades, limitando a intrusão de águas ricas em nutrientes sobre a plataforma (HSUESH & O'BRIEN, 1971).

Na região do Espírito Santo, ocorre o processo de ressurgência costeira denominado de ressurgência de Vitória, durante as primaveras, verões e invernos (MARTINS, 2015). Já durante os meses de outono (Figura 90) observa-se que ACAS tem menor alcance sobre a plataforma continental ficando restrita a profundidades maiores, uma vez que águas mais quentes (~ 26 °C e ~ 28 °C) são encontradas sobre as isóbatas de 25 m e 50 m. Nos períodos de verão e inverno são observadas maiores concentrações de fitoplâncton (Figura 101) e zooplâncton (Figura 102) na região oceânica localizada ao sul da desembocadura do Rio Doce, o que está relacionado a não limitação de NO_3^- na coluna d'água nos períodos em que são registrados ressurgências costeiras. Padrão semelhante ao anteriormente citado foi observado por Ciotti *et al.* (2010) em Cabo Frio (RJ) e no Cabo de Santa Marta (SC), visto que nestes locais a alta concentração de nitrato relacionava-se as baixas temperaturas registradas na água, assim como na área da plataforma adjacente a foz do Rio Doce. De modo semelhante ao que acontece na plataforma continental adjacente ao Rio Doce, Ciotti *et al.* (2010) aponta que no Cabo de Santa Marta são registradas interações entre a ACAS e as águas de baixa salinidade oriundas do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos, que aumentam a complexidade do sistema.

Conforme identificado nas seções 2.1.1.1 e 2.4.1.1 deste relatório, a plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce apresenta-se como região limite para o afloramento da ACAS, assim, foram investigados os perfis médios sazonais dos organismos fito e zooplanctônicos, detritos e clorofila-a (Figura 105), dos diferentes nutrientes (Figura 106) e da temperatura e oxigênio dissolvido (Figura 107) em três fundeios virtuais localizados ao norte, em frente e ao sul da desembocadura do Rio Doce.

Figura 105: Perfis médios sazonais das concentrações de fitoplâncton total, zooplâncton total, detritos e clorofila-a para estações virtuais localizadas ao norte (A, B, C e D), em frente (E, F, G e H) e a sul a desembocadura do Rio Doce (I, J, K e L) para o ano de 2017. Optou-se por usar este ano porque ele é o único ano completo com variáveis estabilizadas.

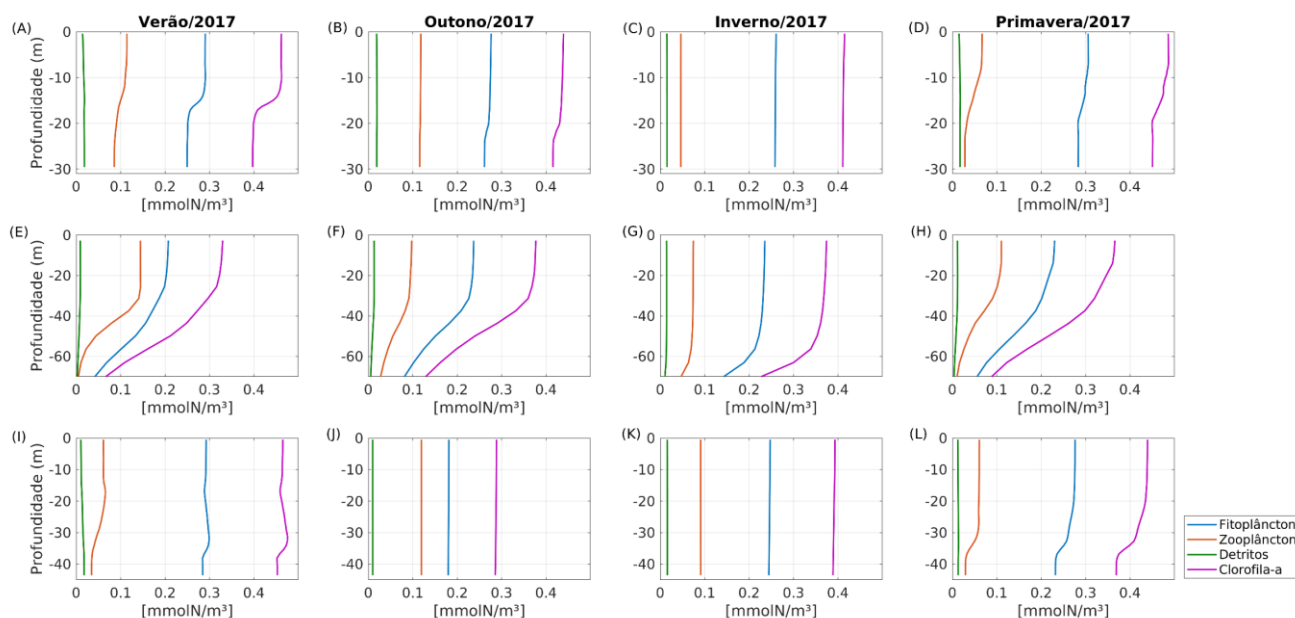


Figura 106: Perfis médios sazonais das concentrações de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) para estações virtuais localizadas a norte (A, B, C e D), em frente (E, F, G e H) e a sul a desembocadura do Rio Doce (I, J, K e L) para o ano de 2017. Optou-se por usar este ano porque ele é o único ano completo com variáveis estabilizadas.

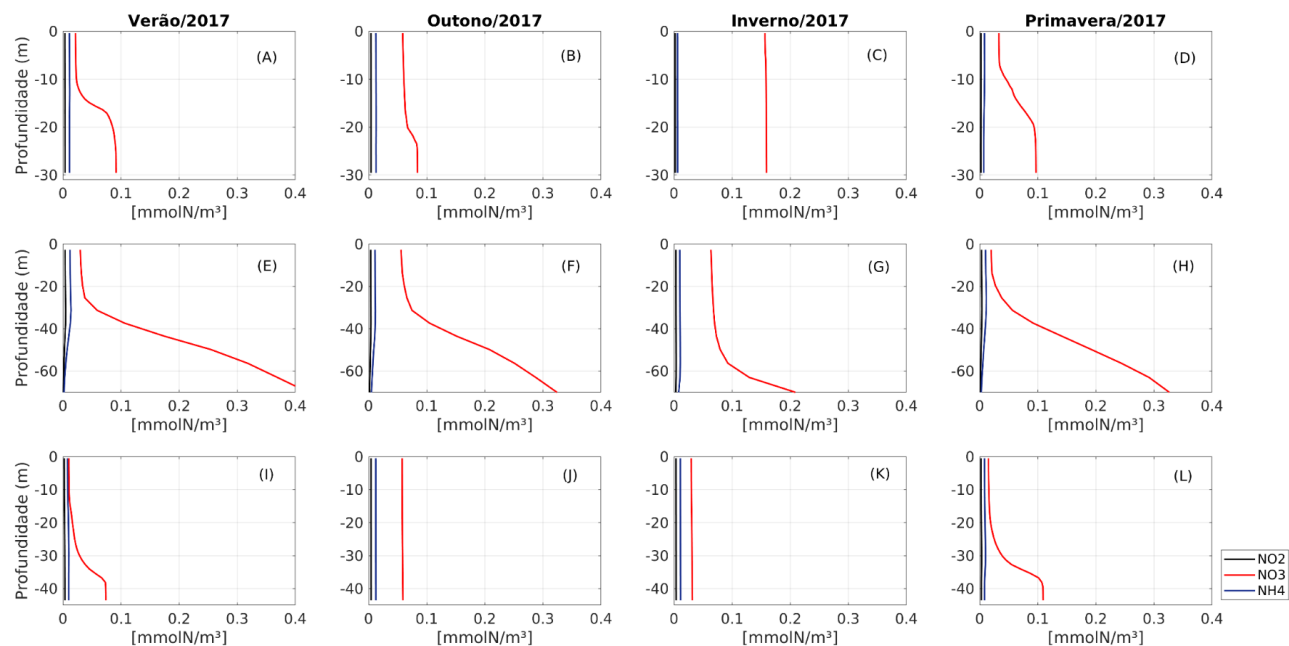
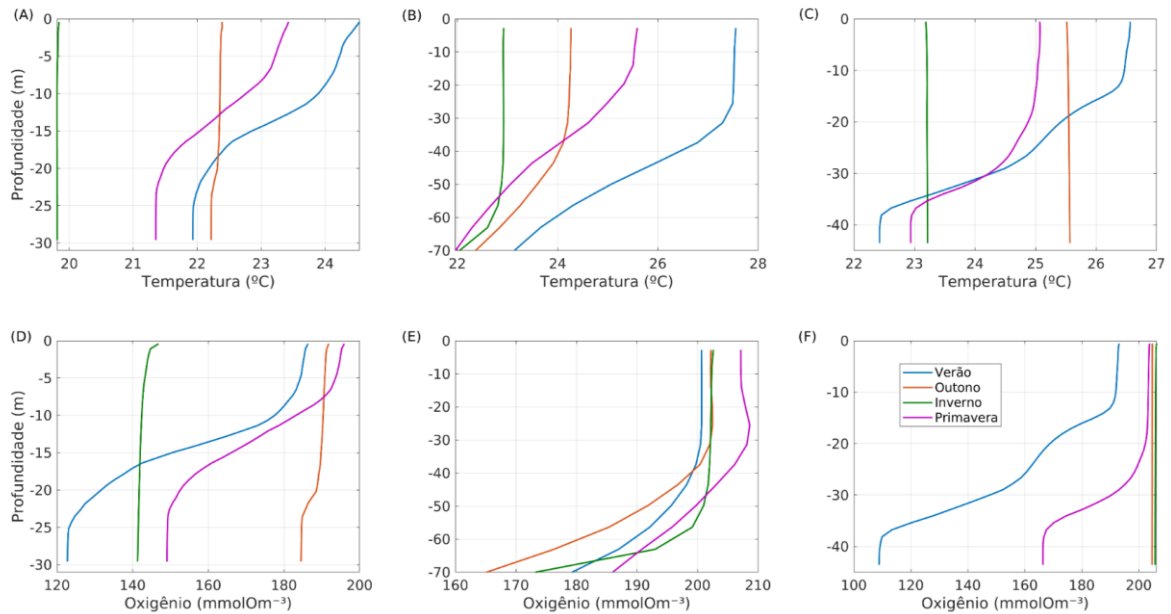


Figura 107: Perfis médios sazonais de temperatura (em °C) e oxigênio dissolvido (mmol O/m³) para estações virtuais localizadas a norte (A e D, respectivamente), em frente (B e E) e a sul a desembocadura do Rio Doce (C e F) para o verão e inverno de 2017. Optou-se por usar o ano de 2017 porque é o único ano completo com variáveis estabilizadas.



Especialmente, a região localizada em frente a desembocadura do Rio Doce apresenta o maior gradiente térmico vertical ao longo de todo o ano (Figura 107), ou seja, neste caso os nutrientes da ACAS não atingem a camada superficial da água. Ao sul da desembocadura do Rio Doce a coluna d'água se apresenta pouco estratificada e, em média, mais fria que as demais áreas investigadas. A norte, além de serem encontrados as maiores temperaturas da água, a coluna d'água também se apresentou pouco estratificada. Em termos de oxigênio dissolvido, as menores concentrações ocorreram no verão devido, principalmente, a maior temperatura da água registrada neste período. Os padrões térmicos verticais sazonais junto a incidência de luz na camada eufótica condicionam as taxas de máximo crescimento do fitoplâncton (Figura 105), que apresentaram valores superiores durante o verão e a primavera. Pequenas variações foram observadas ao longo do ano, sendo a mínima ocorrida durante o outono, período em que os fundeios virtuais mostraram um recuo da ACAS para regiões da plataforma externa.

A estação localizada próximo ao Rio Doce apresentou as maiores concentrações de nitrato, durante todo o ano, comparativamente as demais investigadas (Figura 106). Durante o inverno ocorre a menor frequência de injeções de nitrato, em função da retração da massa d'água de subsuperfície rica neste nutriente, resultando numa menor disponibilização dos nutrientes na camada superficial e menor produção biológica. Entretanto, este padrão não foi observado em relação às concentrações de nitrito e amônio, cujas variações de concentrações não puderam ser associadas às variações de temperatura. Além disso, tanto o NO₂⁻ quanto o NH₄⁺, caracterizaram-se por apresentar baixas concentrações na coluna d'água (Figura 106).

2.4.3 Validação dos resultados produzidos pelo modelo de transporte de sedimentos

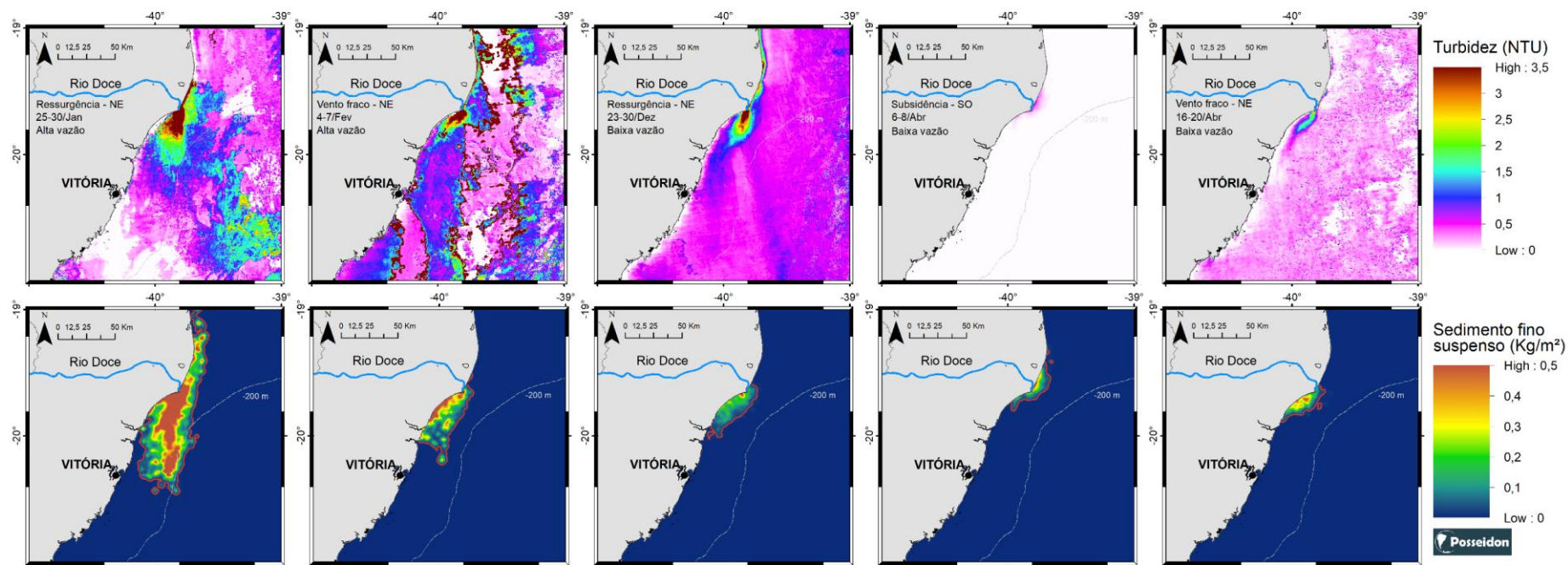
A validação qualitativa dos resultados produzidos pelo modelo STRiPE foi realizada com o uso de dados de cor do oceano nível L2 do sensor MODIS dos satélites Aqua em médias diárias. Neste item são apresentados cenários individuais típicos que ocorreram na região de estudo para o período de novembro de 2015 até abril de 2016 (Tabela 6). A simulação da distribuição espacial da carga de sedimento foi comparada com a distribuição espacial da turbidez estimada a partir dos dados de sensoriamento remoto. A metodologia aqui empregada se assemelha a apresentada na seção 1.1 (sensoriamento remoto) deste relatório e no trabalho de Rudorff *et al.* (2018), ambas adaptadas de Dogliotti *et al.* (2015) e Aurin *et al.* (2013).

As datas escolhidas foram escolhidas de modo que representassem o comportamento distinto da pluma sob diferentes condições de vento e vazão. Dessa forma, foram avaliados cenários de alta e baixa vazão do rio em condições de ventos favoráveis ao desenvolvimento de ressurgência costeira, subsidência costeira e ventos fracos. Apenas o cenário de alta vazão com vento favorável a subsidência não ocorreu dentro do período de 6 meses de análise. A Tabela 6 mostra os cenários considerados e a Figura 108 os resultados obtidos.

Tabela 6: Cenários, datas, vazão e características de direção e intensidade do vento escolhidos para a validação do modelo de transporte de sedimentos.

Cenário	Data	Condição de Vazão	Direção do vento	Intensidade do vento (km/h)
I	25-30/01/16	Alta	N-NE	24,5
II	04-07/02/16	Alta	N-NE (vento fraco)	17,7
III	23-30/12/15	Baixa	N-NE	24,2
IV	06-08/04/16	Baixa	S-SE	5,7
V	16-20/04/16	Baixa	N-NE (vento fraco)	11,2

Figura 108: Composição de dados da distribuição espacial da turbidez superficial (NTU) (parte superior) e da carga de sedimento em suspensão na superfície (parte inferior) para os diferentes cenários apresentados na Tabela 3.4. As cores mais intensas indicam maior quantidade de material em suspensão, representando um proxy da turbidez gerada pela pluma do Rio Doce. A isolinha vermelha nos mapas dos painéis inferiores delimita a concentração de $0,02\text{kg/m}^2$.



Os resultados mostraram comportamentos distintos da pluma de sedimentos do rio em diferentes condições ambientais de vento e vazão. Sob a influência de ventos favoráveis ao desenvolvimento de ressurgência costeira e alta vazão (Cenário I – entre 25 e 30 de dezembro de 2015), a pluma de sedimentos foi capaz de atingir a região da quebra de plataforma, abaixo da latitude de 20,3°S (mais de 50 km ao sul da foz). Dentre os cenários avaliados, esse cenário foi considerado como o mais crítico em termos de área de dispersão da pluma, ou seja, a combinação de alta vazão e vento constante NE, principalmente no período de verão, espalharam o sedimento para grande parte da plataforma continental interna e externa entre 19,5 °S e 20,5 °S. Resultado semelhante também foi observado nos cenários do sensoriamento remoto, onde se observou que a elevada turbidez foi direcionada preferencialmente para sul, influenciando diretamente a APA Costa das Algas e o RVS Santa Cruz e se dispersando por uma ampla área da plataforma continental (Figura 108).

Em um cenário com ventos fracos, mas ainda sob alta vazão (Cenário II), houve uma retração da área e da distância do alcance da pluma. Ela ficou concentrada até aproximadamente 20 °S (em torno de 30 km ao sul da foz), ocupando preferencialmente a plataforma interna, como observado entre os dias 4 e 7 de fevereiro/2016 (Figura 108).

Os cenários de baixa vazão mostraram situações similares sobre a dispersão da pluma. Geralmente a pluma ficou mais retida na costa e se concentrou próximo da foz, ocupando uma área menor e não se distanciando mais do que 30 km a partir da foz do rio. Sob o efeito de ventos favoráveis a subsidência costeira (*downwelling* – Cenário IV) a pluma se deslocou para norte, fluindo restrita à costa. Como já descrito previamente neste relatório, ventos oriundos do quadrante sul estão associados com a passagens de sistemas meteorológicos frontais e ondas mais energéticas que tendem a ressuspender o sedimento depositado advectando-o, eventualmente, para norte.

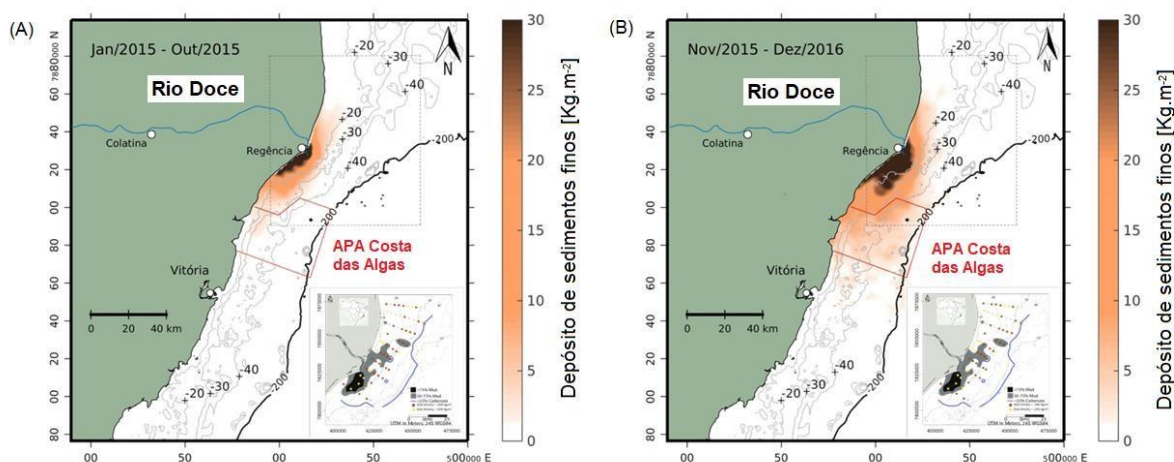
Apesar das limitações do modelo em não representar o sistema de ondas da região e, conseqüentemente, o efeito da ressuspensão de sedimentos do fundo, os resultados simulados representaram satisfatoriamente aqueles derivados por sensoriamento remoto.

2.4.4 Resultados da simulação do transporte de sedimentos

Os resultados da simulação da dispersão de sedimentos oriundos da descarga do Rio Doce são apresentados na forma do material sedimentado e suspenso em superfície. A Figura 109 mostra a distribuição final de sedimentos finos depositados no fundo considerando-se o período pré (Jan/2015 a Out/2015) e após o rompimento da barragem (Nov/2015 a Dez/2016). Para ambos os períodos o resultado da modelagem do transporte de sedimentos mostrou que os sedimentos finos se depositaram tanto ao norte quanto ao sul da foz do Rio Doce. No entanto, a deposição preferencial foi ao sul afetando diretamente a APA Costa das Algas reproduzindo a região de deposição principal de lama, o *depocentro* (Figura 109) - Quaresma *et al.* (2015), Esse resultado decorreu, principalmente, em função da direção principal das correntes e dos ventos costeiros mais frequentes sobre a plataforma continental na região de estudo. Apesar desses resultados representarem uma área de dispersão final

mais restrita, eles são semelhantes aqueles obtidos por Magris *et al.* (2019) quando os autores simularam a condição prévia ao colapso da barragem considerando no modelo numérico a dinâmica sedimentar, isto é, por exemplo, a advecção vertical e a erosão. Estas forçantes não são consideradas nos resultados apresentados a seguir.

Figura 109: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce considerando-se o período pré, Jan/2015 a Out/2015, (A) e após, Nov/2015 a Dez/2016, o rompimento da barragem (B). Em destaque nos dois painéis apresentados temos o mapa produzido por QUARESMA *et al.* (2015), mostrando o principal depósito de lama – *depocentro* - (com > 50%) e medidas de densidade úmida, no qual a linha azul representa o limite para os sedimentos compostos de mais de 25% de carbonato.



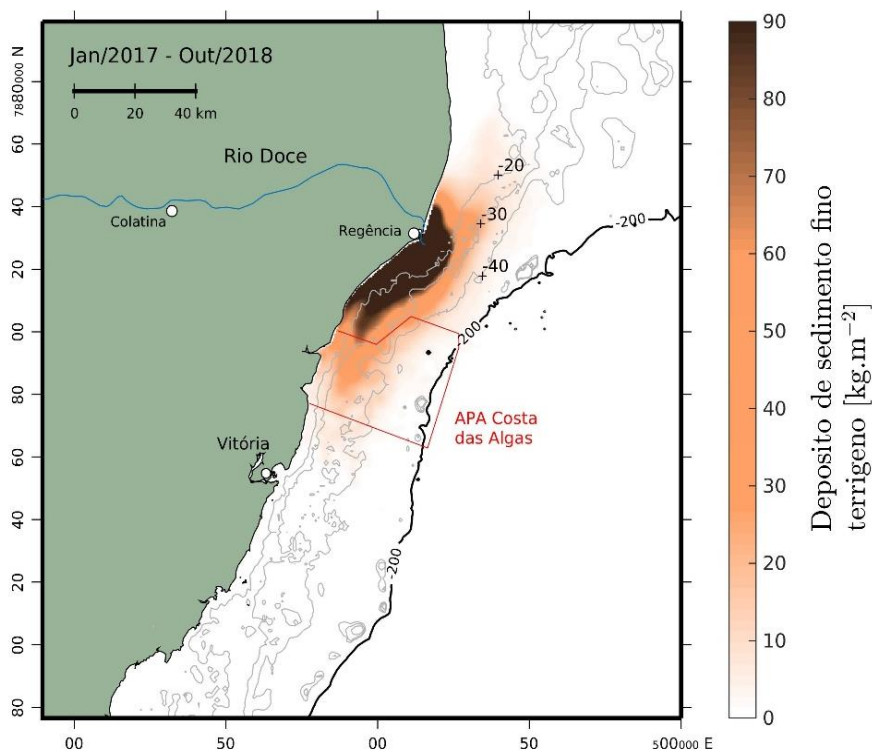
A simulação do período após o rompimento da barragem mostrou um aumento significativo da área de deposição dos sedimentos oriundos do Rio Doce na região marinha (Figura 109B) em decorrência do aumento da carga sedimentar transportada pelo rio. No entanto, o padrão obtido foi coerente com aquele simulado previamente ao colapso da barragem. Consequentemente, o destino final do material sedimentado chegou até a isóbata de 200 m e dirigiu-se para sul englobando a região da APA Costa das Algas. Logo, existiu uma região logo ao sul da foz do Rio Doce (< 10 km) em baixa profundidade (< 15 m) onde ocorreu uma maior concentração de sedimentos finos (> 30 kg/m²), o *depocentro*. Nos resultados de Magris *et al.* (2019) também se identifica uma região ao sul da foz do rio com maior concentração de sedimento.

A sedimentação para o norte a partir da foz do Rio Doce teve um aumento pouco significativo com o incremento da carga sedimentar descarregada pelo rio comparativamente ao período que precedeu o colapso da barragem (Figura 109A). Basicamente o depósito de sedimentos finos se limitou à latitude de 19,2 °S. Esse resultado justifica-se tendo-se por base que os períodos de alta vazão estão normalmente associados com a prevalência de atuação de ventos do quadrante N-NE e tendem a deslocar a pluma de turbidez para S/SW. Em contraste, no período de baixa vazão a situação se inverte (seção 2.1.2). Além disso, no modelo implementado neste estudo não foi considerada a atuação das ondas que atuam na remobilização dos sedimentos depositados no fundo, fazendo com que estes sejam transportados para regiões mais distantes da sua fonte geradora ao serem disponibilizados na

coluna d'água. As ondas são mais energéticas durante o período de vazão baixa (ver seção 2.3.6). Igualmente, o STRiPE não considera a erosão do sedimento depositado o que, de acordo com os resultados apresentados no item 2.3.8 representam uma limitação significativa na simulação da dinâmica sedimentar.

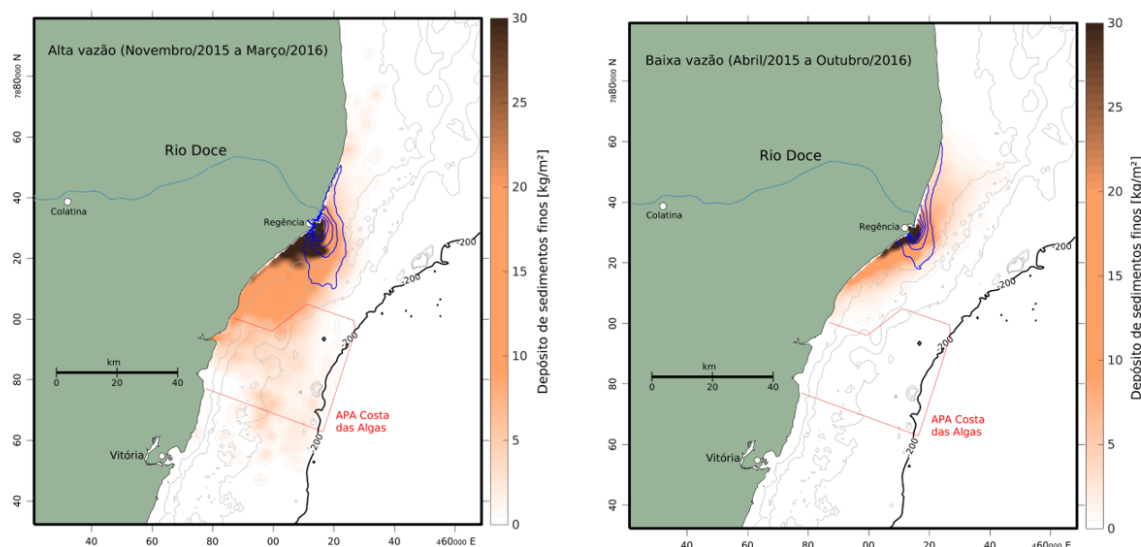
Levando-se em consideração as diferenças nas condições iniciais, condições de contorno e as forçantes consideradas nas simulações, as diferenças nos resultados apresentados são esperadas. Espera-se que com o aperfeiçoamento do modelo que está planejado, os resultados possam ser mais representativos da realidade. De qualquer forma, ao se estender a simulação para o período entre janeiro/2017 a outubro/2018 (Figura 110) verificou-se que a concentração do material depositado aumentou significativamente em relação ao período compreendido entre os anos de 2015 e 2016, entretanto o padrão de distribuição de sedimentos manteve-se coerente com o encontrado para os dois primeiros anos de simulação. No período de janeiro/2017 a outubro/2018 a vazão foi significativamente alta durante os verões (Figura 108). Além da deposição de sedimentos marcante ao sul da foz do Rio Doce houve significativa deposição de material sedimentar também ao norte (aproximadamente até Povoação – ES), com espalhamento orientado a SO-NE até a isóbata de 40 m, aproximadamente. Além disso, registrou-se uma concentração relativamente alta de sedimentos depositada na região do Refúgio de Vida Silvestre Santa Cruz e APA Costa das Algas.

Figura 110: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce (kg/m^2) para o período entre janeiro de 2017 e outubro de 2018.



A Figura 111 apresenta a diferença entre a área de deposição de sedimentos no período de alta e baixa vazão a partir dos resultados mostrados na Figura 109B.

Figura 111: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce considerando o período úmido ou de alta vazão (A) e o período seco ou baixa vazão (B). As isolinhas azuis representam a distribuição espacial da probabilidade de ocorrência da pluma fluvial (definida como salinidades < 35) na região adjacente à foz para cada um dos períodos. A isolinha azul mais externa representa probabilidade de 10% de ocorrência.



Aproximadamente entre os meses de novembro e março, o Rio Doce caracteriza-se por um aumento médio da vazão fluvial associado às chuvas na bacia hidrográfica entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Cerca de 94% da descarga total de sedimentos em suspensão carregados pelo rio até a região oceânica ocorre nesse período (OLIVEIRA & QUARESMA, 2017). No entanto, há diferenças consideráveis na dispersão sedimentar e na descarga de água doce do Rio Doce, com mudanças condicionadas pelas estações de alta e baixa vazão do rio.

A comparação da distribuição dos depósitos de sedimentos finos entre os períodos de alta e baixa vazão fluvial médios (Figura 111) mostrou uma abrangência espacial da dispersão sedimentar muito maior no período de alta vazão, com deposição preferencial para sul e sedimentos finos depositados na região da APA Costa das Algas. Em contraste, a pluma de água doce apresentou uma distribuição geográfica (ilustrada pelas isolinhas azuis de distribuição probabilística de ocorrência de salinidade superficial inferior a 35, ou seja, já considerando a mistura com águas marinhas) muito mais restrita à foz do rio mesmo no período de maior vazão fluvial. Entre abril/2016 e outubro/2016 a deposição de sedimentos finos foi reduzida na região ao sul e aumentou na área ao norte da foz do rio até a região de Degredo. Tanto a área de deposição quanto a pluma de água menos salina ficaram muito mais restritas à foz do rio, refletindo as condições típicas deste período do ano.

Considerando-se, genericamente, a isolinha de 10 kg/m² como uma aproximação da área de abrangência geográfica da deposição de sedimentos finos, o período de alta vazão apresentou uma

área quase 4 vezes maior que o período seco. Entre novembro de 2015 e março de 2016, a área de deposição de sedimentos foi de, aproximadamente, 552 km², enquanto que no período seco essa área foi de 158 km².

Superficialmente, a dispersão do sedimento oriundo da descarga do Rio Doce é mostrada como percentual de ocorrência da concentração de sedimentos acima de 0,01 kg/m² (Figura 112 e Figura 113).

Figura 112: Porcentagem de ocorrência de sedimento superficial [Concentrações > 0,01 kg/m²] para o período pré, Jan/2015 a Out/2015, (A) e após, Nov/2015 a Dez/2016, o rompimento da barragem (B).

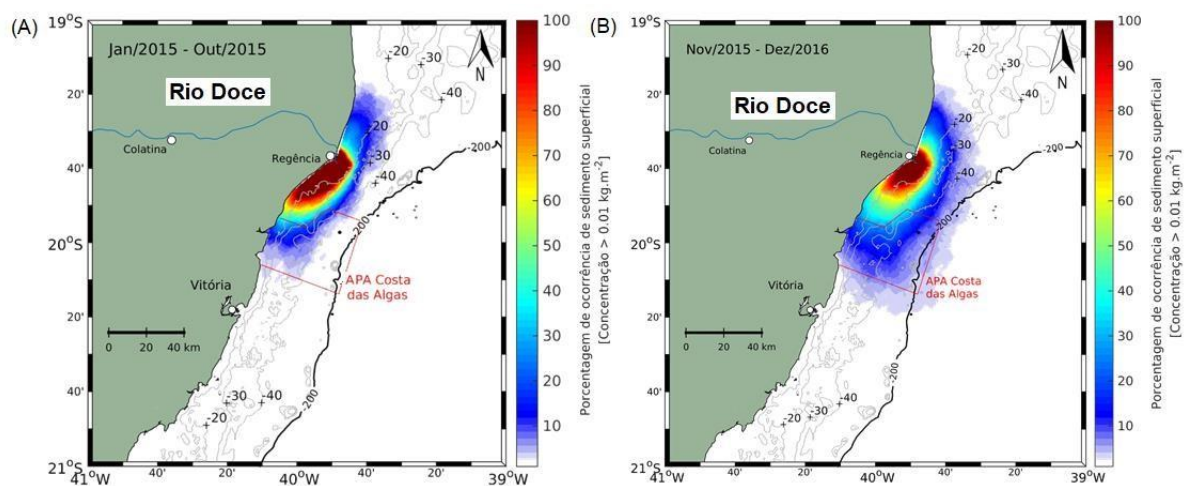
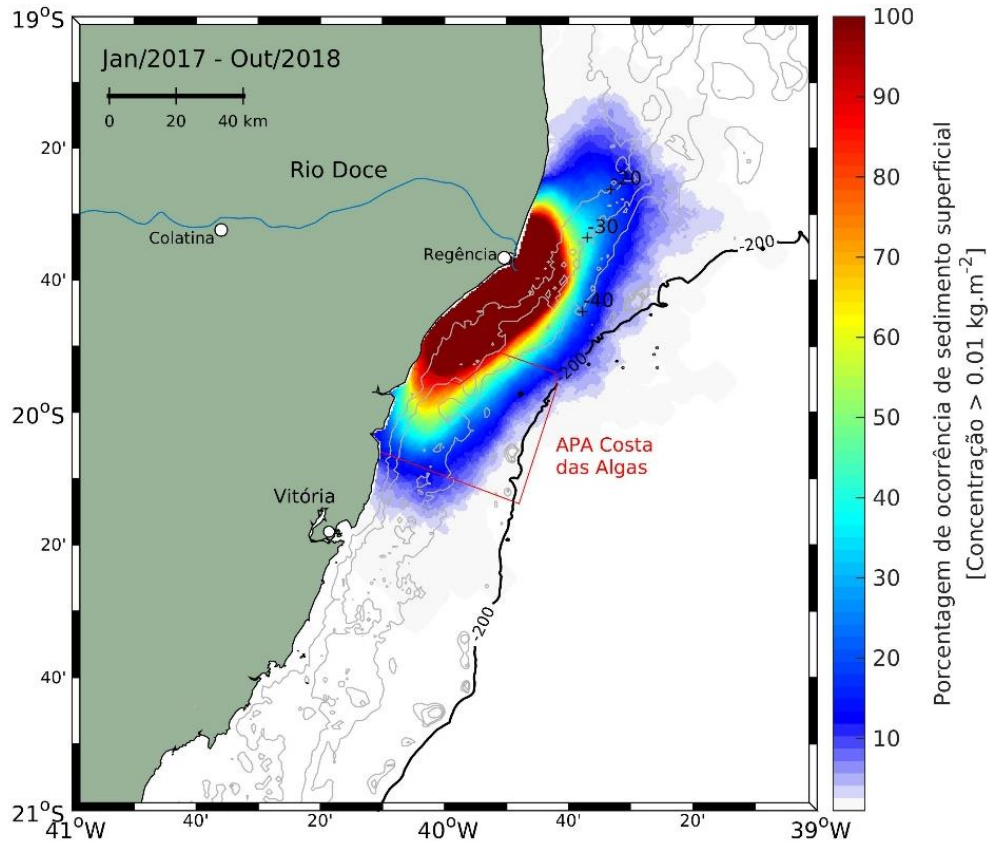


Figura 113: Porcentagem de ocorrência de sedimento superficial (Concentrações > 0,01 kg/m²) para o período entre janeiro de 2017 e outubro/2018.



Como esperado, a região em frente a foz do Rio Doce foi aquela que apresentou a maior frequência de ocorrência. A distribuição final, no entanto, é claramente assimétrica deslocada para a região localizada ao sul da foz do rio em resposta ao padrão de vento atuante na região. Observa-se na Figura 113 que baixas frequências de ocorrência apareceram ao sul da cidade de Vitória, dentro do Embaiamento de Tubarão e ao norte, ultrapassando o limite da figura. Nas condições aqui simuladas baixas concentrações de sedimento oriundas de eventos esporádicos foram observadas na região do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. No entanto, nem a baixa frequência de ocorrência ou o valor da concentração do sedimento podem ser usados como uma inferência de impacto por si só. Essa inferência deve ser confirmada em termos da análise integrada com os demais dados obtidos neste estudo.

2.5 SÍNTESE DOS PROCESSOS FÍSICOS COSTEIROS NA REGIÃO DO RIO DOCE

Esta seção tem como finalidade sintetizar as análises realizadas separadamente nas seções anteriores para compreender as forças atuantes na região de estudo e como elas condicionam a hidrodinâmica, a distribuição termohalina e sedimentar sobre a plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce.

Após um ano de amostragem *in situ* o caráter sazonal ficou bem marcado. Considerando-se a perspectiva física do projeto e fazendo uma analogia com as monções que ocorrem no sudoeste asiático, há um período de chuvas (úmido) e outro seco. Tipicamente, o período chuvoso corresponderia às estações de primavera e verão e o seco englobaria o outono e o inverno. Esta divisão também é observada no padrão do balanço do fluxo líquido de calor (Figura 6). No período seco o oceano perde calor para a atmosfera (fluxo negativo), enquanto que no período chuvoso o fluxo é positivo, isto é, o oceano ganha calor, desenvolve-se uma estratificação vertical e a coluna de água sobre a plataforma continental pode ser aproximada para um oceano de duas camadas.

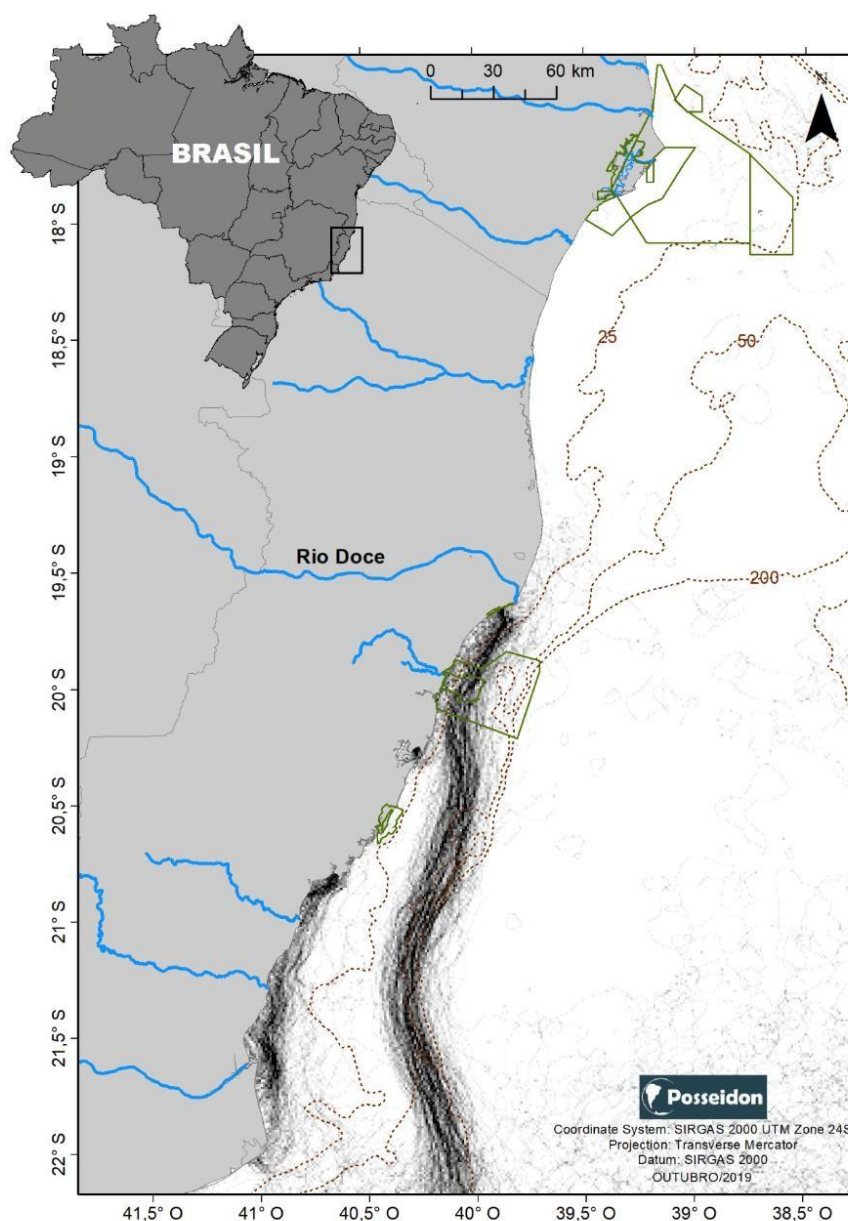
Climatologicamente, o padrão de vento na região é ditado pelas variações meridionais da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) e dos movimentos zonais e meridionais do Centro de Alta Pressão Subtropical do Atlântico Sul. Neste caso, as condições que poderiam ser consideradas extremas seriam o outono e a primavera. Durante o outono o gradiente de pressão entre o continente e o oceano é baixo e, conseqüentemente, o vento é relativamente fraco, mas com aumento na contribuição dos ventos S/SE. A maior frequência na entrada de frentes frias com a chegada e no decorrer do inverno faz com que a alternância entre ventos do quadrante norte e sul também aumente. Já durante a primavera a força gradiente de pressão é alta e os ventos NE são fortes e persistentes, conforme pode ser observado na Figura 8. O verão é semelhante à primavera assim como o inverno é com o outono, embora ocorram com mais frequência ventos NE-E e E-SE nesses períodos, respectivamente.

A combinação destes dois padrões poderia ser assim resumida: no verão os ventos NE são os mais frequentes, porém relativamente mais fracos, o oceano ganha calor o que favorece o desenvolvimento da estratificação termohalina vertical. Ela, por sua vez, dificulta a transferência vertical de *momentum*. No inverno, há uma perda radiativa superficial líquida de calor do oceano para a atmosfera; a mistura vertical da água é favorecida porque a água superficial se torna mais densa e afunda, assim como a transferência de *momentum* ao longo da coluna de água. A primavera traz consigo a ocorrência de ventos NE mais intensos e frequentes, enquanto o fluxo de calor começa a se tornar positivo (isto é, o oceano ganha calor). Assim, no início da primavera o aumento da intensidade da tensão de cisalhamento do vento seria preponderante ao efeito estratificante do fluxo de calor. Esta condição tenderia a se inverter com a aproximação do verão.

A influência das forçantes atmosféricas regionais influencia decisivamente na variação espaço-temporal do padrão termohalino. A região amostrada, compreendida entre Guarapari (ao sul) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (ao norte), pode ser grosseiramente caracterizada como um oceano barotrópico relativamente quente ao norte da foz do Rio Doce, uma coluna de água em duas camadas (quando o fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera é positivo) e homogêneo e frio (quando o fluxo líquido de calor é negativo) ao sul da foz do rio. Nesta porção, no entanto, há diferenças espaciais zonais (plataforma interna, média e externa) de acordo com as diferentes latitudes consideradas. Isso se deve, basicamente, ao desenvolvimento da ressurgência costeira decorrente da atuação da tensão de cisalhamento NE que provoca a advecção do transporte de Ekman superficial

em direção *offshore* e a entrada de água mais fria na porção inferior da coluna de água, caracteristicamente ACAS ou uma mistura com predominância de ACAS. Essa massa de água aflora à superfície na porção interna/média da plataforma continental desenvolvendo um forte gradiente (principalmente térmico) no encontro com as águas tropicais quentes e salinas da porção interna da Corrente do Brasil (isolinhas mais escuras na (Figura 114).

Figura 114: Densidade da frente térmica superficial mensal no período de janeiro de 2003 a agosto de 2019 obtida a partir imagens de TSM do sensor Modis/Aqua.



Superficialmente o gradiente térmico tem origem próximo à foz do Rio Doce e, associado a ele, se desenvolveu um fluxo direcional que, considerando-se em balanço geostrófico, é dirigido para sul. Ao norte de Vitória (ES) essa frente térmica se localizou em torno da plataforma média (~ isóbata de 20-30 m) enquanto ao sul de 20 °S a frente se posiciona sobre a plataforma externa.

O gradiente térmico foi mais forte no período chuvoso (quando o fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera é positivo) quando ventos do quadrante N-NE são relativamente mais intensos e frequentes e, portanto, a ressurgência costeira é bem desenvolvida. Ao mesmo tempo, o aquecimento superficial é significativo de modo que a diferença térmica entre as duas massas de água pode ser de 4 °C ou maior.

Uma vez que a ressurgência costeira é normalmente identificada pelo padrão térmico superficial, isto é, pela ascensão de água mais fria próximo à costa em relação ao oceano *offshore*, a sua identificação no outono e inverno é dificultada porque o gradiente térmico diminuiria em função da perda de calor pelo oceano (Figura 35). Ao mesmo tempo quando a redução na diferença de temperatura entre as massas de água é observada, também é possível questionar se a ressurgência costeira teria deixado de existir e esta, por sua vez, ser a causa deste fraco gradiente. A Figura 5 sugere que, em média, o gradiente térmico evidenciado na Figura 114 se mantém e, conseqüentemente, o fazem a ressurgência costeira e, a ocorrência de ventos NE na região. A Figura 8 mostra que, embora em menor frequência e mais fracos, no inverno os ventos do quadrante N-NE continuam soprando e se alternam em função da entrada mais frequente de frentes frias na região (Figura 9, Figura 10 e Figura 43).

Como as observações *in situ* (Figura 35) são espaço-temporalmente pontuais, a modelagem numérica pôde fornecer as informações necessárias para o entendimento desta dinâmica. Neste sentido a evolução temporal dos perfis verticais da temperatura em cinco fundeios virtuais na região da APA Costa das Algas (Figura 91) mostrou que as entradas e saídas de água relativamente mais fria associada à ACAS não foi um fenômeno com ocorrências restritas ao verão (período chuvoso), mas um processo que ocorreu ao longo do ano na forma de pulsos com duração de dias associados às oscilações no campo de vento, exceto no outono. Os resultados mostraram que a abrangência espacial (ou até mesmo o afloramento à superfície) dessa massa de água foi temporalmente variável em resposta a magnitude do impulso da tensão de cisalhamento do vento favorável à sua entrada sobre a plataforma. Nos meses de outono ela ficou, em média, restrita à porção externa da plataforma continental.

A distribuição temporal de temperatura no fundo medida nos quatro fundeios (Figura 51) ratifica os resultados obtidos via simulação numérica. Em especial, no Fundeio F1 (localizado na APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz), verificou-se esta variabilidade com oscilações superiores a 4°C em questão de dias. Ainda, foi possível observar um sinal de baixa frequência com menores temperaturas médias no período chuvoso (em torno de 20 °C) e maiores no período seco (temperatura média em torno de 22 °C). Esse padrão refletiu a ocorrência dos maiores impulsos de tensão de cisalhamento do vento favoráveis à ressurgência costeira durante a primavera e o verão.

O padrão térmico nos três primeiros fundeios (F1, F2 e F3) foi semelhante, apesar da temperatura aumentar com a diminuição da latitude, isto é, em direção ao Fundeio F3 (Figura 51). A correlação simples entre a série temporal do Fundeio F1 com aquela do Fundeio F3 foi de 0,77, enquanto que entre os fundeios F1 e F4 foi de apenas 0,08. O valor refletiu a clara não correlação entre elas. No entanto, uma análise mais atenta revelou que nos momentos quando a temperatura no fundeio F1 aumentou a temperatura no fundeio F4 diminuiu. Isso sugere que na maior parte do tempo a dinâmica nesses dois pontos não está correlacionada, mas somente em eventos específicos.

A similaridade no padrão térmico de fundo nos três primeiros fundeios não se refletiu em superfície, pelo menos na maior parte do tempo. Essa condição é mostrada na Figura 37. A água relativamente mais fria na porção inferior da coluna de água avançou para a porção ao norte da foz do Rio Doce principalmente no período de primavera e verão. No outono a abrangência regrediu e houve homogeneidade térmica no inverno. A dinâmica associada à entrada dessa massa de água relativamente mais fria para a região de Povoação ainda não é completamente entendida e está em análise, incluindo-se aqui o seu papel no transporte e/ou ressuspensão do sedimento de fundo. De qualquer forma, o fato é que nessa região foram observadas as maiores estratificações térmicas com diferenças superiores a 6 °C em apenas 4 m (Figura 37). Horizontalmente as diferenças entre a temperatura de fundo no fundeio F1 e o fundeio F4 tiveram uma variação > 8 °C em novembro de 2018, praticamente zero em abril de 2019 e em julho de 2019 a temperatura no fundeio F1 foi maior que a temperatura no fundeio F4 (Figura 51) refletindo a complexa dinâmica local. Na região amostrada ao norte do Rio Doce (Figura 30) o padrão térmico é de homogeneidade vertical refletindo o padrão de variação anual do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera (Figura 5).

Diferentemente da temperatura que apresentou variações ao longo da costa, variações significativas em termos de salinidade somente foram observadas próximo à desembocadura do Rio Doce e na porção ao norte associada à descarga continental dos rios próximos às estações de amostragem de dados *in situ* (Figura 31). Dessa forma, a presença de uma água menos salina (< 36) ficou, basicamente, dependente da vazão do rio Doce, ou seja, nos períodos quando a vazão do rio foi menor (período seco – Figura 12) a abrangência dessa água ficou restrita ao entorno da foz do Rio Doce (ex., Figura 37, Figura 39, Figura 93 e Figura 94). Ao contrário, no período chuvoso quando a vazão no rio foi maior, também foi o espalhamento superficial dessa água sobre a plataforma continental.

Alguns aspectos importantes devem ser destacados com relação as observações de salinidade na área de interesse. O primeiro é que a presença ou mesmo a abrangência da água menos salina não depende, necessariamente, da precipitação local, mas sim daquela que ocorreu na bacia de drenagem do Rio Doce como foi o caso, por exemplo, do pico de vazão registrado em Colatina em 01/01/2019 (Figura 12). O segundo aspecto é que a abrangência espacial desta pluma obtida a partir das medições mensais *in situ* nos cruzeiros oceanográficos pode ser tanto sub quanto superestimada. Um exemplo de superestimava desta abrangência se destaca na Figura 37 (mês de novembro). As coletas nas estações ao sul da foz do Rio Doce foram realizadas sob condições de vento nordeste os quais

advectavam a pluma para sul. Quando as coletas foram realizadas na porção norte, o vento sul/sudeste soprava advectando a pluma para norte. O resultado final foi o de uma abrangência muito maior do que aquela que realmente ocorreu. Se as condições fossem exatamente opostas a abrangência dessa pluma de água menos salina seria significativamente reduzida.

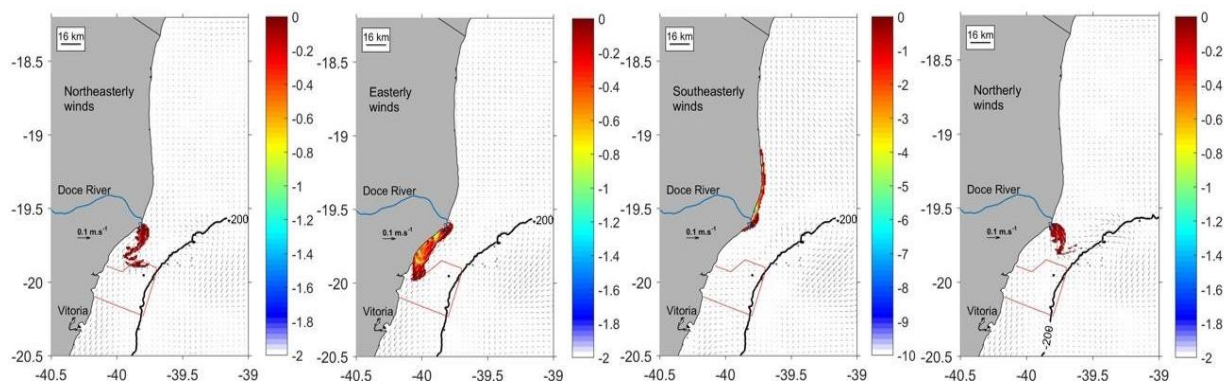
A dinâmica descrita previamente pode ocorrer porque as plumas superficiais, como é o caso do Rio Doce, são forçadas pela maré na sua porção interna (também chamado de *near field*) e pela tensão de cisalhamento do vento na sua área mais externa (*far field*) (CHANT, 2011). Em condições de preamar quando o nível do mar na costa é maior a força gradiente de pressão resultante tende a reter a água doce dentro do rio e a pluma de água menos salina teria uma dispersão superficial reduzida. O oposto é verificado em condições de baixamar, o nível do mar é o menor e, portanto, a descarga continental e a área de dispersão seriam maiores. Esse efeito é mais significativo em marés de sigízia, isto é, quando a amplitude da maré é maior. Uma vez esse efeito é minimizado, em torno de 4 km a partir da foz do rio ou na escala espacial próxima do raio interno de deformação de Rossby para a região considerando a estratificação local, a dispersão passa a ser dirigida, basicamente, pela tensão de cisalhamento do vento.

Quer seja nas observações realizadas *in situ* ou nos resultados a partir da simulação numérica, superficialmente a pluma de água menos salina teve uma dispersão reduzida, da ordem de quilômetros, a partir da foz do Rio Doce (Figura 92, Figura 93 e Figura 94). Verticalmente, variações significativas foram observadas nos valores de salinidade de fundo nos fundeios F3 e F4 (Figura 71c).

No dia 10 de dezembro de 2018 a salinidade medida no fundo diminuiu rapidamente 0,5 no fundeio F3 e 1,4 no fundeio F4 sob a ação de ventos S/SE. Essas alterações foram acompanhadas por um aumento da altura significativa de ondas (> 2 m – Figura 70d) e do período de pico (> 12 s). A partir do dia 8 de dezembro, a turbidez junto ao fundo ao norte do Rio Doce mostrou uma tendência progressiva de aumento, com picos superiores a 600 NTU no dia 9 de dezembro (Figura 70e). A comparação desses resultados sugeriu que esse evento de aumento da turbidez combinou um efeito de ressuspensão promovido essencialmente pela ação das ondas junto ao fundo com um evento de advecção para norte do aporte fluvial proveniente do Rio Doce pelo efeito dos ventos de sul no período.

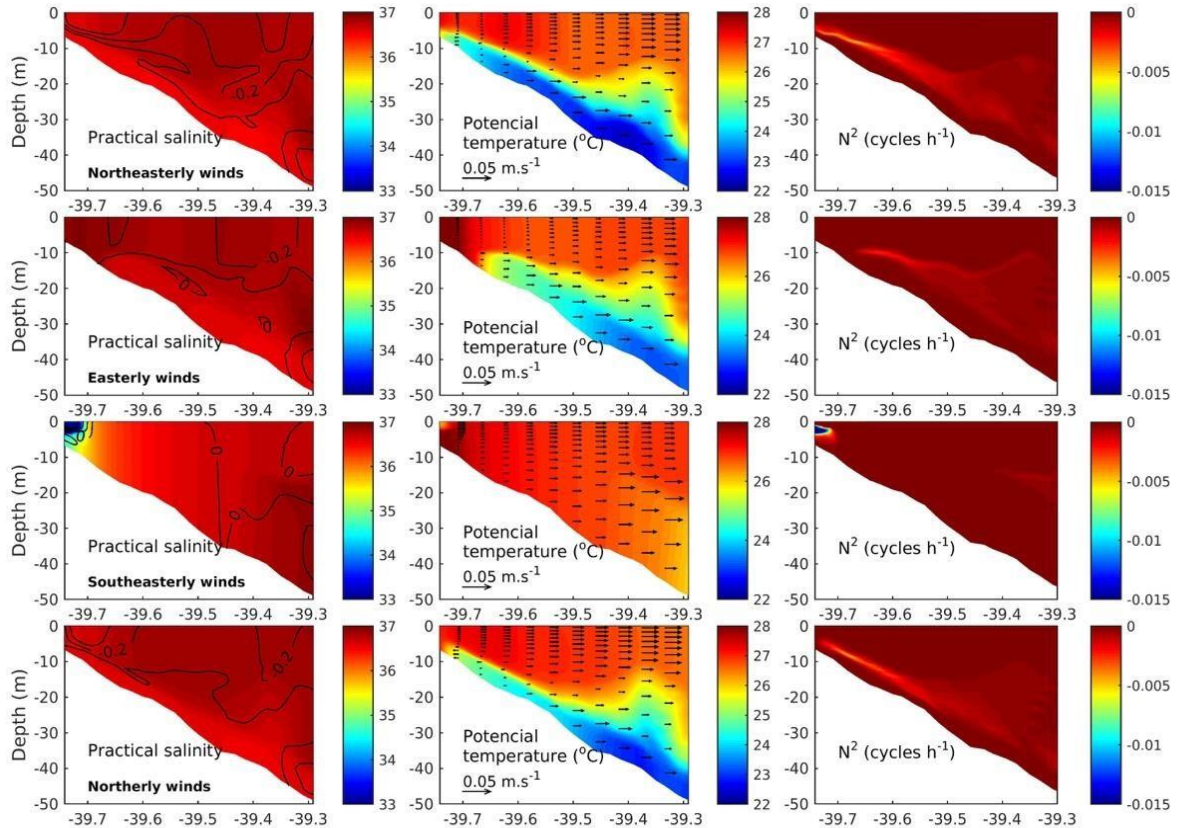
Resultados de simulações numéricas em cenários idealizados de vento e de alta vazão tentaram reproduzir o efeito da tensão de cisalhamento do vento sobre a pluma de água menos salina. Em situações de ventos favoráveis à ressurgência costeira a pluma do rio tende a se afastar da costa e afinar sob o efeito do transporte de Ekman em direção *offshore*, sofrendo maior dispersão pelo efeito da tensão de cisalhamento do vento no campo distante. Em situação de vento favoráveis à subsidência ocorre o processo inverso, a pluma de água menos salina é aprisionada à costa e sofre aprofundamento (Figura 115), também sob efeito do transporte de Ekman, porém em direção *onshore*.

Figura 115: Distribuição espacial da profundidade de água doce (m) após 5 dias de simulação em cenários de ventos NE, E, SE e N. O polígono em vermelho representa a APA Costa das Algas. A linha preta contínua delimita a quebra de plataforma em 200 m.



Os resultados encontrados nos cenários de alta vazão mostraram que a pluma de água doce se deslocou da costa sob a ação de ventos NE e N (ventos favoráveis à ressurgência costeira), enquanto que sob a ação de ventos favoráveis à subsidência (SE) e ventos de E a pluma foi observada junto à costa. No primeiro caso a profundidade de água doce não ultrapassou 0,8 m, dispersou-se para sul influenciando a APA Costa das Algas e afastou-se da costa. Já no segundo caso, sob a ação dos ventos de SE, a pluma ocupou quase toda a coluna de água, atingindo até 8 m junto à costa e tendo um alcance ao norte quase até 19 °S (Figura 116).

Figura 116: Seções verticais da salinidade prática com sobreposição de isolinhas de velocidade meridional (esquerda), temperatura potencial com a sobreposição de vetores de velocidade zonal (centro) e frequência de Brunt-Väisälä (direita) para um transecto perpendicular à costa em 19,45°S em condição de alta vazão após o 5° dia de simulação.



O campo hidrodinâmico respondeu às forçantes atuantes na região. Previamente, mencionou-se sobre o papel da maré e da tensão de cisalhamento do vento e seus efeitos na variabilidade espaço-temporal do campo termohalino. A Figura 68 identifica e quantifica a importância das componentes sub e supra inerciais nas regiões ao norte e ao sul da foz do Rio Doce a partir das observações contínuas realizadas nos quatro fundeios. A banda suprainercial (semidiurna e quarto-diurna) é mais significativa no fundeio F4 e sua importância decresce em direção ao fundeio F1, enquanto que a banda subinercial (períodos acima de 35 h) tem comportamento inverso. Além disso, enquanto que os processos determinísticos associados a maré apresentaram picos espectrais estreitos, a banda subinercial apresentou períodos de variabilidade superiores a 3 dias com pico que não são bem definidos. Nessa faixa de períodos os processos não são determinísticos e podem apresentar distintos períodos ao longo do ano, principalmente quando estão associados às variações locais do vento e a passagem de ondas confinadas costeiras geradas remotamente, mas que, eventualmente, chegam à plataforma continental capixaba.

A sequência das Figura 43 a Figura 50 mostra a distribuição temporal das correntes medida nos quatro fundeios. Dado o padrão da distribuição temporal da tensão de cisalhamento do vento observado na

região, a componente média paralela à costa foi sudoeste, à exceção dos valores medidos no Fundeio F2 onde ambas as componentes apresentaram valores médios próximo de zero, embora com valores de desvio-padrão consideráveis. Esse padrão também foi verificado quando os dados foram separados sazonalmente (período seco e chuvoso), à exceção da parcela superficial no período úmido (Figura 46). Isso significa que as correntes medidas neste ponto apresentaram grande variabilidade de sentido (Figura 45) provavelmente condicionado pelas características morfológicas da costa na região. A componente média perpendicular à costa possui menor intensidade chegando próximo a zero. No fundeio F1 a circulação perpendicular refletiu o padrão da circulação de Ekman em condições de ressurgência costeira (Figura 43), ratificando os achados no padrão termohalino descrito previamente, enquanto que no fundeio F3 ele foi negativo (em direção à costa) ao longo da coluna de água (Figura 47) e positivo (direção *offshore*) no fundeio F4 (Figura 49).

Em função da maior variabilidade na direção da tensão de cisalhamento do vento no período seco (outono e inverno) em função da maior entrada de frentes frias na região, também se identificou alterações na intensidade e direção das correntes entre o período chuvoso e seco. As alterações sazonais de direção e sentido das correntes foram mais significativas no padrão hidrodinâmico ao norte da foz do Rio Doce (Figura 66 e Figura 67) do que ao sul (Figura 64). O Quadro 2 sumariza os resultados para as medidas superficiais e de fundo. Mudanças significativas das correntes paralelas à linha de costa também foram evidenciadas a partir das estações do ano. Em uma análise de porcentagem de tempo em que as correntes paralelas à costa apontam para norte ou para sul (na superfície –Figura 117 – e no fundo – Figura 118), fica evidente que correntes paralelas direcionadas para norte (em direção ao Banco de Abrolhos) são mais frequentes durante o outono e inverno. O mês de janeiro de 2019 mostrou quase que exclusivamente correntes paralelas direcionadas para sul (em direção à Vitória). É importante destacar também um aumento na frequência de ocorrência de correntes direcionadas para norte no fundo quando comparado com a superfície, especialmente no setor Foz Norte (fundeio F3) (Figura 117 e Figura 118).

Figura 117: Evolução mensal da porcentagem de tempo em que as correntes superficiais paralelas a linha de costa permaneceu orientada para norte (vermelho) ou para sul (azul) nos fundeios F1, F2, F3 e F4.

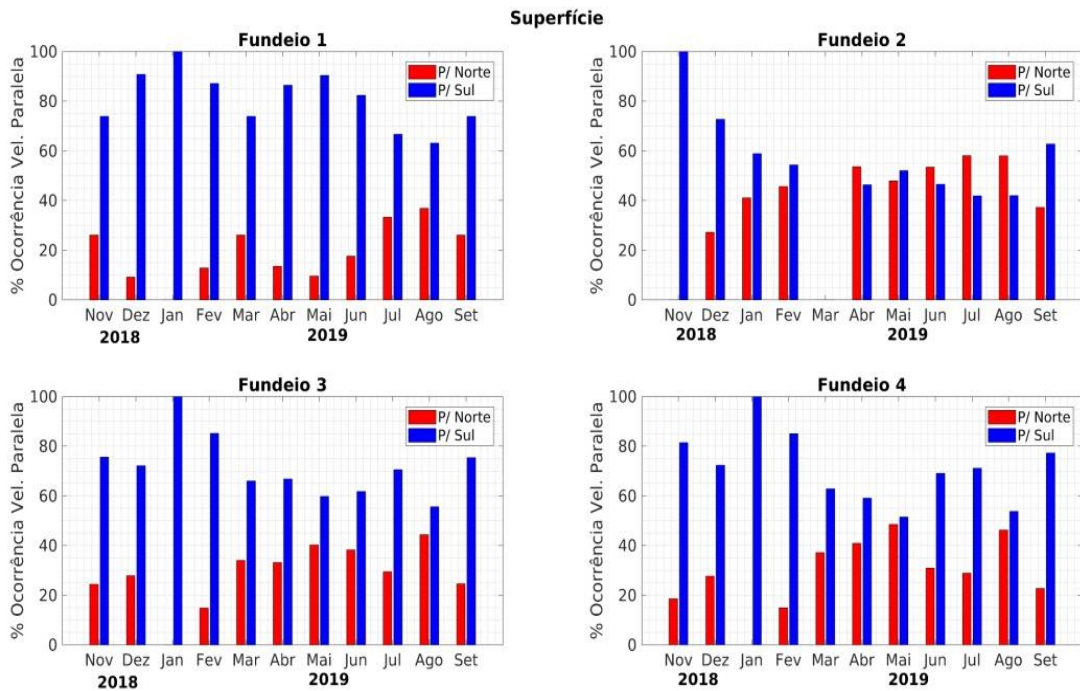
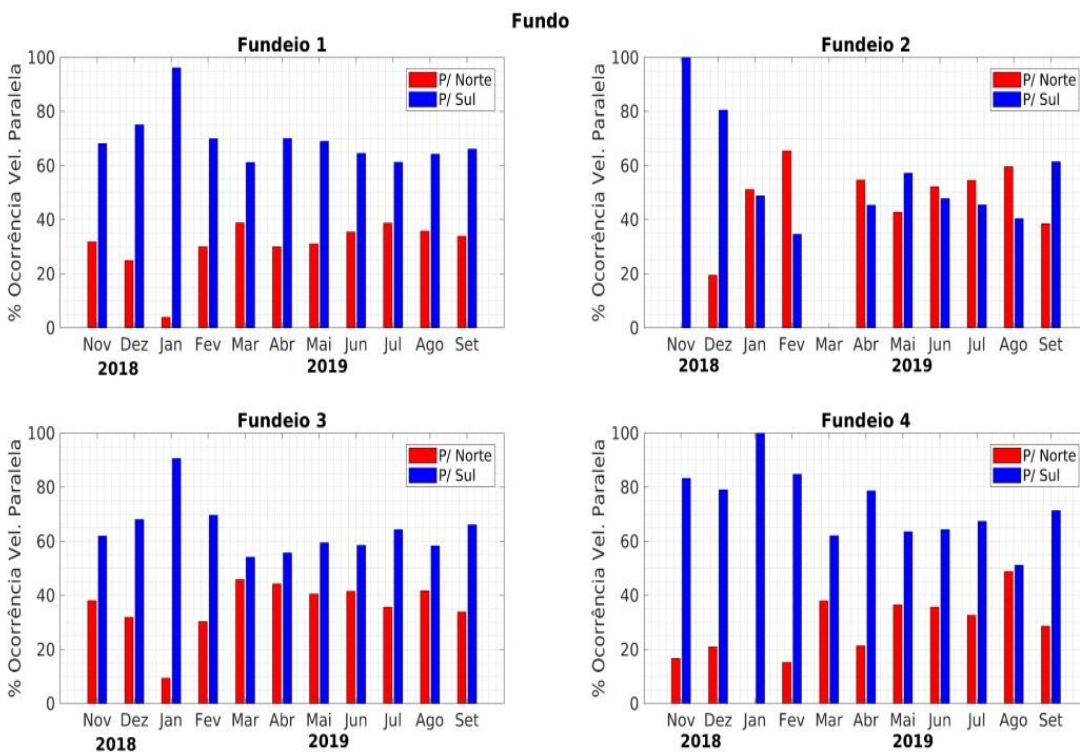


Figura 118: Evolução mensal da porcentagem de tempo em que as correntes de fundo paralelas a linha de costa permaneceu orientada para norte (vermelho) ou para sul (azul) nos fundeios F1, F2, F3 e F4.



Especialmente, o padrão hidrodinâmico médio na região da foz do Rio Doce mostrada nas Figura 84 e Figura 85 ratifica os achados medidos nos fundeios, isto é, as correntes fluem preferencialmente para

sudoeste seguindo os contornos batimétricos da plataforma continental capixaba. A intensidade das correntes médias sazonais foi menor ao norte da região de Degredo, isto é, sobre o Banco de Abrolhos onde a contribuição das forçantes em escala suprainercial é mais significativa. Junto ao fundo, por outro lado, houve a penetração de águas oceânicas no limite *offshore* ao longo de quase toda a região.

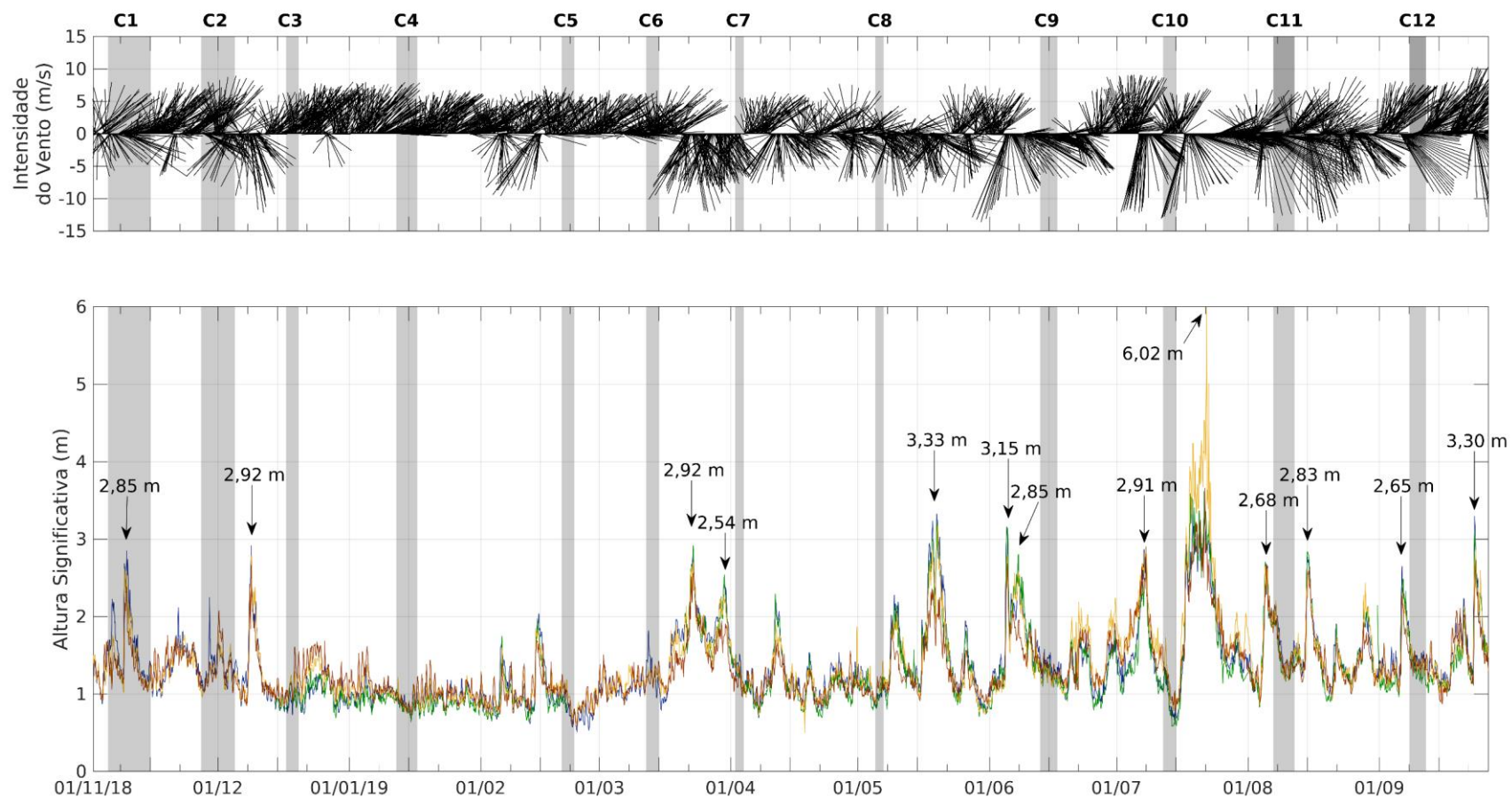
Finalmente, a quantificação/qualificação da influência das componentes suprainerciais no padrão hidrodinâmico (Figura 96) mostra que sobre o Banco de Abrolhos se desenvolve uma grande excentricidade e polarização das correntes de maré na direção sudoeste-noroeste, principalmente próximo ao fundo. De fato, nesta região a corrente associada a componente M_2 excedeu 0,4 m/s em alguns pontos, enquanto que ao sul da foz do Rio Doce as correntes de maré foram significativamente menores.

Uma vez que as ondas de gravidade superficial são forçadas pela tensão de cisalhamento do vento, a variação sazonal no padrão de vento (Figura 8) também se reflete no padrão de altura significativa (APÊNDICE II), período de pico (APÊNDICE II) e direção das ondas medidas nos quatro fundeios. A partir do mês de março/2019, quando a Tempestade Tropical Iba ocorreu na região, houve uma tendência de aumento da altura significativa das ondas oriundas de sul/sudeste. Padrão similar se observou para o período dessas ondas, isto é, um aumento no período de pico.

As ondulações de menor H_s e T_p foram características do período úmido quando a frequência de ocorrência de ventos nordeste é maior. Por outro lado, no período seco as ondas mais energéticas estiveram associadas a chegada de ondulações remotas associadas a sistemas frontais que ocorreram na região sul da costa brasileira. Essas condições hidrodinâmicas têm maior capacidade de remobilização do fundo marinho nas áreas adjacentes à foz do Rio Doce. Usando uma aproximação linear, a análise descrita no item 3.3.6 mostrou que as ondas com T_p maiores já sofreriam os efeitos de refração e empinamento, por exemplo, em regiões de maiores profundidades e, com isso, teriam um alto potencial de ressuspensão do material sedimentado.

Na evolução temporal da altura significativa da onda mostrada na Figura 119 é possível relacionar-se não somente o H_s da onda, mas também o período de tempo no qual o sistema foi forçado nessas condições. Novamente, ondas com maior H_s ocorreram por um período maior durante o outono e o inverno.

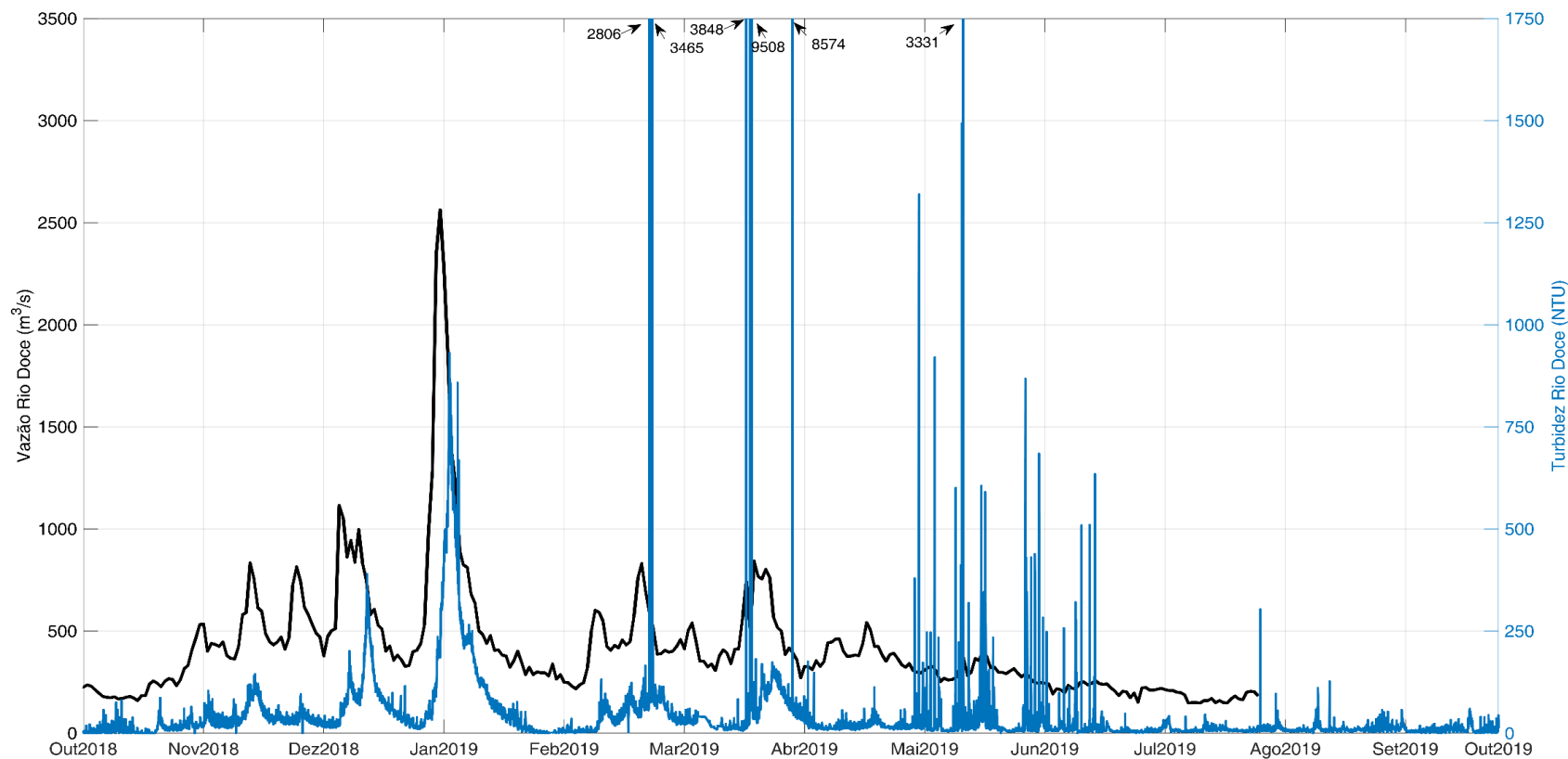
Figura 119: Evolução temporal da altura significativa de ondas (m) entre novembro de 2018 e setembro 2019. As cores representam as series temporais horárias de Hs nos fundeios F1, F2, F3 e F4. Alguns eventos extremos estão destacados na figura. As barras cinzas indicam o período de coleta *in situ* identificados por C1 a C12.



Associado aos eventos mais energéticos de ondas houve, normalmente, uma inversão na direção dos ventos (S/SE) acompanhando a passagem de frentes frias pela região. Como resultado observou-se um aumento da turbidez no fundo (Figura 70 a Figura 76) devido a ressuspensão do material sedimentado, reversão no sentido das correntes, acompanhando o vento, e aumento na temperatura da água no fundo no fundeio F4 (Degredo). Embora o padrão mostrado na Figura 119 seja similar para os quatro fundeios, as características locais onde o Fundeio F2 está localizado determinam características peculiares já que ele foi fundeado na região denominada de *Depocentro* (QUARESMA *et al.*, 2015).

A turbidez (proxy da concentração de material inorgânico em suspensão) reflete, obviamente, também o aporte oriundo da descarga continental (Figura 120), maior no período chuvoso ou associada a eventos específicos de alta precipitação na bacia de drenagem do Rio Doce. Isso é importante porque não há, necessariamente uma relação entre a precipitação local (na região da foz do Rio Doce) com o aumento de vazão e turbidez. Esse foi o caso, por exemplo, da alta vazão registrada no início de janeiro/2019 a qual não foi acompanhada de aumento na precipitação local. De qualquer forma, a alta turbidez medida no rio (ex., na boia RD016 – PMQQS) tem um sinal superficial bastante restrito à região da desembocadura, normalmente em uma distância da ordem do raio de deformação interno de Rossby onde a maré é a principal forçante condicionante de sua dinâmica. Este padrão é exemplificado na Figura 24.

Figura 120: Descarga diária medida na estação da ponte de Colatina e Turbidez na boia RD 016. Embora as maiores descargas estejam acompanhadas de maiores valores de turbidez, a proporcionalidade não é constante. Nos dados de turbidez não foram eliminados possíveis *spikes* por não termos referências para esse descarte.

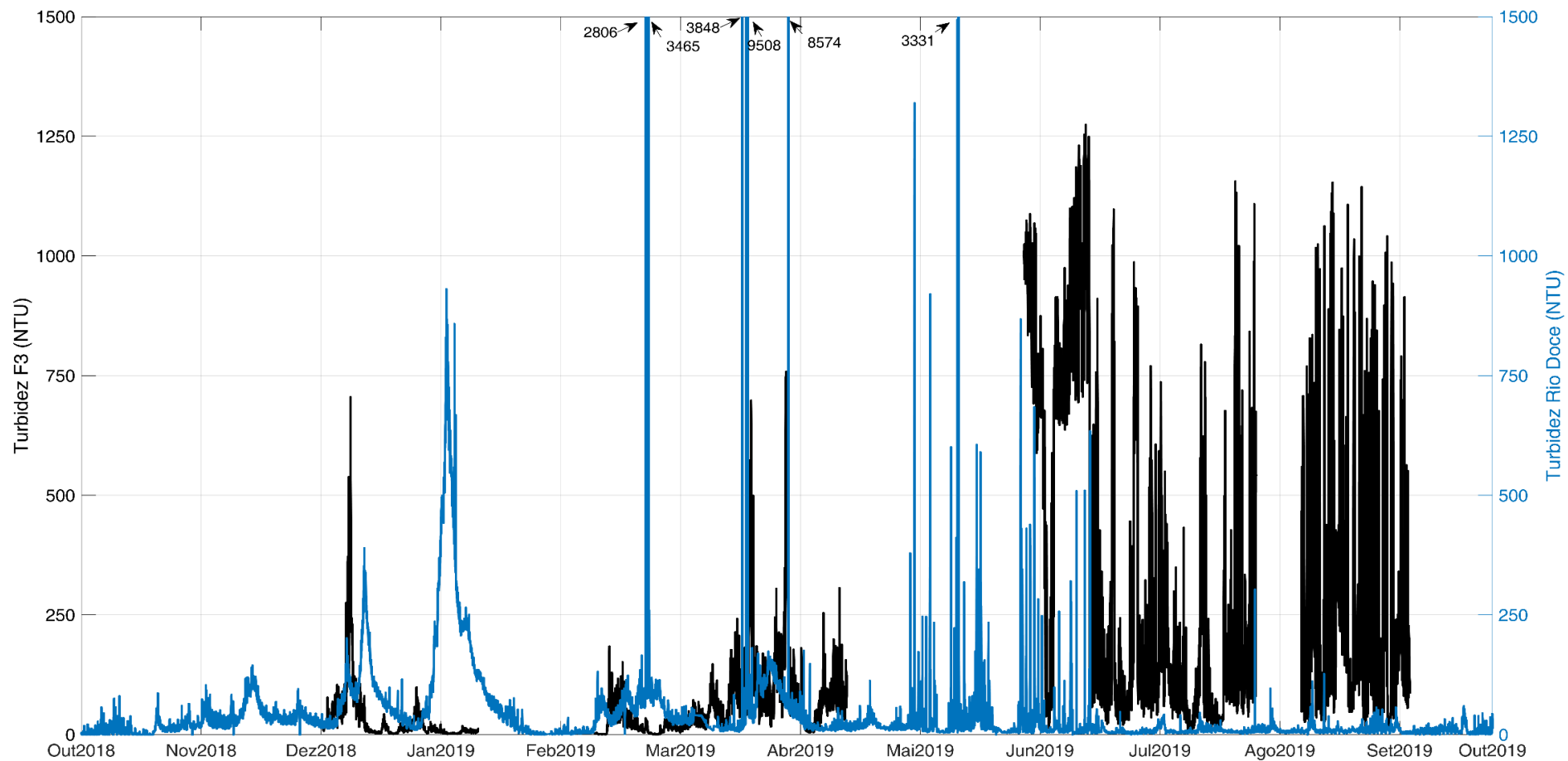


A Figura 25 mostra que para baixos valores de turbidez superficial (< 2 NTU) há uma distribuição contínua ao longo de toda a região costeira desde Vitória (ES) até Caravelas (BA) não sendo possível distinguir entre o aporte continental e o sinal oriundo da ressuspensão do material depositado no fundo. No entanto, como a abrangência espacial é maior em direção ao norte no período de Baixa Vazão (isto é, outono e primavera), o resultado deve refletir a conjunção da maior frequência de ventos S/SE associado à passagem de frentes frias na região, a reversão no sentido das correntes, a ocorrência de ondas mais energéticas com capacidade de ressuspender material sedimentado inclusive a maiores profundidades. Por outro lado, durante período de Alta Vazão se observa que os maiores valores de turbidez superficial estão marcadamente associados às desembocaduras dos rios, mas advectados para sul/sudoeste em resposta a atuação dos ventos frequentes do quadrante N/NE.

A relação entre a turbidez oriunda do Rio Doce e aquela medida no fundo dos fundeios não é tão simples. Por exemplo, a relação que se observa no Fundeio F3 é mostrada na Figura 121. No período seco, tanto a vazão do rio quanto a turbidez associada diminuem significativamente, enquanto que aquela medida no fundeio F3 aumenta ou oscila em torno de um valor médio maior. Esse comportamento foi associado a maior ocorrência de eventos mais energéticos, tais como as ondas, que promovem a ressuspensão do material sedimentado ou dificultam a sua sedimentação e tendem a deslocar o material para norte ao longo da costa.

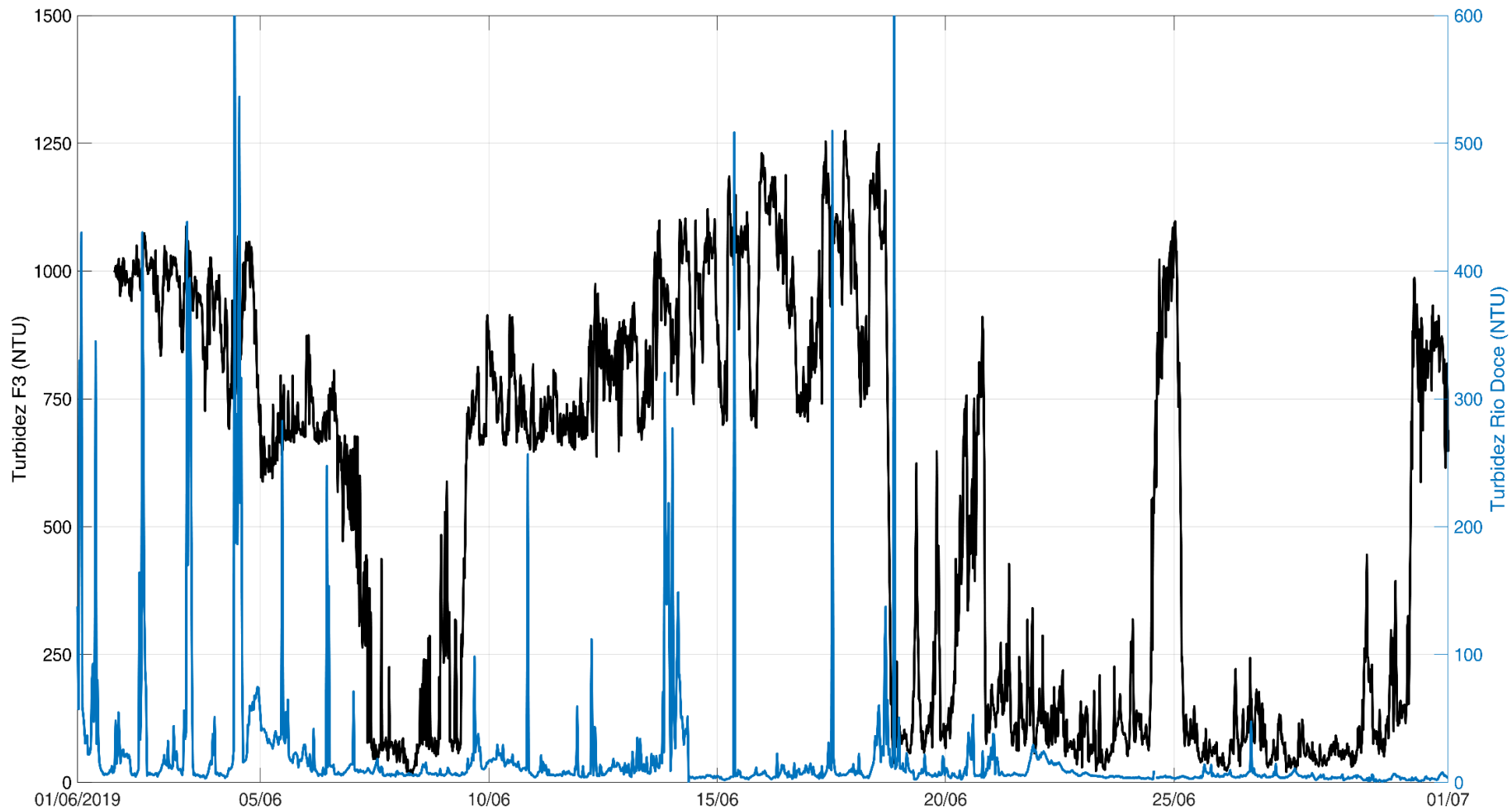
No final março houve um aumento da vazão acompanhado pelo aumento da turbidez medida no rio (Figura 120). Neste mesmo período se observou um aumento no Hs das ondas (Figura 119) associado a passagem da Tempestade Tropical Iba e da passagem de uma frente fria pela região. Houve, nesse caso, uma concordância entre os eventos distintamente do observado em janeiro/2019. A alta vazão e turbidez do rio deu origem a uma pluma sedimentar que se deslocou sul/sudoeste sob a ação de ventos nordeste e não houve aumento na turbidez medida no fundeio F3. Ventos N/NE tendem a dar origem a ondas de gravidade superficial com Hs pequenos (Figura 119).

Figura 121: Distribuição temporal da turbidez medida na boia RD 016 e no fundo do fundeio F3



Se a partir da distribuição mostrada na Figura 4c fosse analisado somente o mês de junho/2019, por exemplo, (Figura 122) verifica-se que há um sinal suprainercial característico tanto na turbidez medida no rio quanto naquela de fundo medida no Fundeio F3. Esse sinal está sobreposto a um sinal subinercial de maior período. A pluma de sedimentos (provavelmente a lama fluida) se moveria de acordo com a elipse de maré mostrada na Figura 96.

Figura 122: Distribuição temporal da turbidez medida na boia RD 016 e no fundo do fundeio F3 para o mês de junho/2019.



A outra característica que se observa na distribuição vertical de sedimentos¹ é a diferença entre a turbidez superficial e de fundo. Os valores de fundo são, normalmente, uma ou duas ordens de grandeza, no mínimo, maiores do que aqueles medidos em superfície na região do entorno da desembocadura do Rio Doce (ex, Figura 38, Figura 40). Essa diferença tende a desaparecer à medida que a distância da foz do Rio Doce aumenta. No entanto, é importante salientar que medidas contínuas somente são realizadas nos quatro fundeios e que as medições em locais mais afastados como no PARNA Abrolhos somente ocorreram duas vezes, nas campanhas sazonais.

A simulação numérica da dispersão do sedimento somente oriundo via descarga do rio foi resumida na distribuição espacial do material sedimentado (Figura 109 e Figura 110) e na porcentagem de ocorrência da concentração de sedimento acima de 0,01 kg/m² (Figura 112 e Figura 113). O resultado apresentado não contempla a atuação da forçante de ondas responsável pela ressuspensão do material sedimentado. Sendo assim, a distribuição final refletiu o padrão médio das correntes (sudoeste) (Figura 84 e Figura 85) e vento (nordeste) e culminou com as maiores concentrações de sedimento no fundo ocorrendo ao sul da foz do Rio Doce, representado a área de deposição conhecida como *Depocentro*. Embora em menor concentração, o sedimento também se distribuiu ao norte da foz do rio principalmente durante o período de baixa vazão (Figura 111), isto é, no período seco quando houve uma maior incidência de ventos do quadrante S/SE associado aos sistemas meteorológicos frontais e reversão no padrão médio das correntes.

A ausência do efeito ressuspensivo provocado, basicamente, pela ação das ondas limitam a comparação com os resultados medidos *in situ* e estimados via sensoriamento remoto, principalmente no aspecto de distribuição espacial do sedimento superficial e de sedimentado. No entanto, os resultados ratificam os achados de que a pluma de maior turbidez fica restrita a região no entorno da foz do Rio Doce (Figura 24 e Figura 25).

A distribuição espaço-temporal de fluorescência (*in situ*) e clorofila-*a* (*ex-situ*) refletiu, basicamente, a presença da ACAS ou da sua influência que se caracteriza por uma maior concentração de nutrientes dissolvidos (PERASSOLI, 2017) (Figura 36, Figura 38 e Figura 40) associado à ressurgência costeira, ao *input* de nutrientes via descarga continental (Figura 20 e Figura 22) e o enriquecimento nutricional da coluna de água via aprofundamento da camada de mistura (GHISOLFI *et al.* 2015) (Figura 19) típico de ocorrer no período seco quando a camada superficial do oceano perde calor para a atmosfera.

A concentração de oxigênio dissolvido na água não é um parâmetro conservativo e depende tanto da atividade biológica, do consumo via oxidação da matéria orgânica, da temperatura da água, bem como dos processos turbulentos superficiais que facilitam a dissolução do gás na água. Nesse sentido, concentrações gasosas seriam maiores na porção superficial quando os processos de mistura fossem mais eficientes. De qualquer forma, uma relação direta com os demais parâmetros avaliados nem sempre foi clara e evidente. No entanto, em algumas ocasiões, como mostrado na Figura 38, verificou-

¹ Esta análise está sendo feita em termos de turbidez, um proxy da concentração de material particulado em suspensão.

se um aumento na concentração de oxigênio dissolvido associado a ocorrência de água mais fria. Da mesma forma, nos meses de inverno ela tendeu a ser homogênea ao longo da coluna d'água, o que pode estar associado aos processos de mistura mais eficientes nesse período. A modelagem biogeoquímica mostrou que nos períodos de ocorrência de ressurgência costeira, principalmente durante o verão, há um suprimento de nitrato para a coluna d'água na plataforma média e interna, com eventual afloramento da ACAS. Isso influencia a biota da região e no período foram verificados aumentos significativos de fitoplâncton e zooplâncton totais na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce.

Embora as mudanças relacionadas à evolução temporal de ventos, fluxos de calor, chuvas, tenham se destacado em praticamente todas as análises realizadas, o período de monitoramento da região também foi marcado por um evento atmosférico atípico. No final de março a Tempestade Tropical Iba chegou à costa brasileira logo após a passagem de frente fria e resultou em algumas modificações no ambiente. Nesse período a inversão na direção das correntes e dos ventos alterou a entrada de ondas e modificou o período e a direção de pico que chegaram próximo à costa. Algumas alterações também foram observadas na temperatura nesse período e apresentou aumento de até 3 °C entre o período antes e durante esse evento (Figura 51). O aumento significativo da altura de onda gerou ressuspensão do sedimento do fundo e, conseqüentemente, um aumento nos valores de turbidez. Embora os valores de Hs e Tp durante a tempestade tropical não tenham sido os maiores do registro, a sequência da entrada da frente fria seguida do Iba manteve os parâmetros de onda acima de valores médios durante um período relativamente longo, se comparado aos demais eventos de entradas de frente. A permanência por vários dias de mobilização do fundo pela ação de ondas acima da média manteve valores de turbidez elevados e influenciou no transporte de sedimentos na região.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. L. *et al.* Upwelling processes along a western boundary current in the Abrolhos–Campos region of Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 85, p. 42-59, 2014.
- APRILE, F.M., LORANDI, R., BIANCHINI JUNIOR, I. A dinâmica costeira e os processos erosivos na foz do Rio Doce, Espírito Santo - Brasil. **Bioikos**, **PUC-Campinas** 18(1), 71–78. 2004.
- AUMONT O., *et al.* PISCES-v2: An ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. **Geoscientific Model Development**, 8(8), 2465–2513 .2015.
- AURIN, D. *et al.* Spatially resolving ocean color and sediment dispersion in river plumes, coastal systems, and continental shelf waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 137, p. 212-225. 2013.
- BJORNSSON, H.; VENEGAS, S. A. A manual for EOF and SVD analyses of climatic data. 1997.
- BOURGUIGNON, S.N. *et al.* Seabed Morphology and Sedimentary Regimes defining Fishing Grounds along the Eastern Brazilian Shelf. **Geoscience**. v. 8, p. 91, 2018.
- CAMPOS, E. J. D. **Análise de variabilidade Espacial e Temporal da Pluma do Rio Doce (ES) através do Sensoriamento Remoto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental, Vitória, 2011.
- CARR, M. E. Estimation of potential productivity in eastern boundary currents using remote sensing. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**. 2001.
- CARR, M. E.; KEARNS, E. J. Production regimes in four eastern boundary current systems. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**. 2003.
- CASTELÃO, R. M.; BARTH, J. A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 3, 2006.
- CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. **Marinha do Brasil**. Disponível em:<< <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>>>. Acesso em: agosto de 2019.
- CHANT, R.J. Interactions between Estuaries and Coasts: River Plumes – Their Formation, Transport, and Dispersal. In: Wolanski E and McLusky DS (eds.) **Treatise on Estuarine and Coastal Science**, v. 2, 213–235. Waltham: Academic Press. 2011.
- CHAPMAN, D.C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. **J. Phys. Oceanogr.** 15, 1060–1075. 1985.

CIOTTI, A. M. *et al.* Temporal and meridional variability of Satellite-estimates of surface chlorophyll concentration over the Brazilian continental shelf. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, p. 236-253. 2010.

CPRM. Sistema de Alerta de Eventos Críticos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Retrieved August 1, 2015, from <http://www.cprm.gov.br/alerta/site/sace/index.html>, 147–166. 2015.

DADOU, I., EVANS, G., AND GARÇON, V. Using JGOFS in situ and ocean color data to compare biogeochemical models and estimate their parameters in the subtropical North Atlantic Ocean, **J. Mar. Res.**, 62, 565–594, 2004.

DADOU, I. *et al.* An integrated biological pump model from the euphotic zone to the sediment: a 1-D application in the Northeast tropical Atlantic, **Deep Sea Res.** Pt II, 48, 2345–2381, 2001.

DANDONNEAU, Y.; GOHIN, F. Meridional and seasonal variations of the sea surface chlorophyll concentration in the southwestern tropical Pacific (14 to 32 °S, 160 to 175 °E). **Deep-Sea Research**, v. 31, p. 1377-1393. 1984.

DEBELIUS, B.; GÓMEZ-PARRA, A.; FORJA, J. M. Oxygen solubility in evaporated seawater as a function of temperature and salinity. **Hydrobiologia**, v. 632, n. 1, p. 157-165, 2009.

DELCOURT, F. T. *et al.* A classification of the south Atlantic by Seawifs chlorophyll concentration variability in ecological provinces. **Pluralidade**, v. 2, p. 91-110. 2013

DOGLIOTTI, A. I. *et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 157-168. 2015.

EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. Data analysis methods in physical oceanography. 2 ed. **Elsevier**. 638 p. 2001.

GEORGE, J. V. *et al.* Role of physical processes in chlorophyll distribution in the western tropical Indian Ocean. **Journal of Marine Systems**, v. 113-114, p. 1-12. 2012.

GHISOLFI, R. D. *et al.* Physical forcing mechanisms controlling the variability of chlorophyll-a over the Royal-Charlotte and Abrolhos Banks—eastern Brazilian shelf. **PLoS one**, v. 10, n. 2, p. e0117082, 2015.

GORDON, H. R.; McCLUNEY, W., R. Estimation of the depth of the sunlight penetration in the sea for remote sensing. **Applied Optics**, v. 14, n. 2. 1975.

GREC/USP. **Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo**. Disponível em:<<
http://www.grec.iag.usp.br/data/frentes-frias_BRA.php>>. Acesso em: agosto de 2019.

GUTKNECHT E. *et al.* Coupled physical/biogeochemical modeling including O₂-dependent processes in the eastern boundary upwelling systems: application in the Benguela. **Biogeosciences**, 10 (5), 3359-3591, 2013.

- HSUESH, Y.; O'BRIEN, J. J. Steady coastal upwelling induced by an along-shore current. **Journal of Physical Oceanography**. 1971.
- HURET, M. *et al.* Coupling physical and biogeochemical processes in the Rio de la Plata plume, **Cont. Shelf Res.**, 25, 629–653, 2005.
- JENA, B. *et al.* Observation of the oligotrophic gyre variability in the south Indian Ocean: Environmental forcing and biological response. **Deep-Sea Research I**, v. 80, p 1-10. 2013.
- KARL, D. M. *et al.* Ocean Biogeochemistry. ed. Fasham, M. J. R. Springer, 2003.
- KONEÉ, V. *et al.* Modeling the primary and secondary productions of the southern Benguela upwelling system: A comparative study through two biogeochemical models, **Global Biogeochem**, 19, 2005.
- KOROTENKO, K.A. *et al.* Effects of bottom topography on dynamics of river discharges in tidal regions: case study of twin plumes in Taiwan Strait. **Ocean Sci.** 10, 863–879. 2014.
- LACHKAR, Z.; GRUBER, N. What controls biological production in coastal upwelling systems? insights from a comparative modeling study. **Biogeosciences**. 2011.
- LAMBERT, T.; PERGA, M.E. Non-conservative patterns of dissolved organic matter degradation when and where lake water mixes. **Aquatic Sciences**, v. 81, n. 4, p. 64, 2019.
- LAZEANO, C. Z. **Resposta da produção biológica frente a dinâmica dos distemas de ressurgência costeira sobre a Plataforma Continental Brasileira**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Rio Grande, 2014.
- MAGRIS, R.A. *et al.* A modelling approach to assess the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SWBrazil). **Science of the Total Environment**. 2019.
- MARTA-ALMEIDA, M. *ET AL.* Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**, 2016.
- MARTINS, B. S. **A ressurgência de Vitória**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, 2015.
- MATSUURA, Y. **Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica da região sudeste entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta (SC)**. Ciência e Cultura. 1986.
- MAZZINI, PLF; BARTH, JA. A comparison of mechanisms generating vertical transport in the Brazilian coastal upwelling regions. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 2013.
- MCDUGALL, T.J.; BARKER, P.M. Getting Started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox. 2011.

MOREL, A.; BERTHON, J. F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. **Limnol. Oceanogr.**, 34, 1545–1562, 1989.

MUSGRAVE, D. L.; CHOU, J.; JENKINS, W. J. Application of a model of upper-ocean physics for studying seasonal cycles of oxygen. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 93, n. C12, p. 15679-15700, 1988.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data; **2018 Reprocessing**. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: data/10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018. 2018.

NORTH, G. R. *et al.* Sampling errors in the estimation of the empirical orthogonal functions. **Monthly weather review**, v. 110. 1982.

OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, D. S. V. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 78, p. 101-115, 2017.

ORLANSKI, I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. **J. Comp. Sci.** 21(3), 251–269. 1976.

OSADCHIEV, A. A. A method for quantifying freshwater discharge rates from satellite observations and Lagrangian numerical modeling of river plumes. **Environ. Res. Lett.** 10. 2015.

OSADCHIEV, A. A. *et al.* Transport and bottom accumulation of fine river sediments under typhoon conditions and associated submarine landslides: case study of the Peinan River, Taiwan. **Nat. Hazard. Earth Sys.** 16, 41–54, 2016.

OSADCHIEV, A. A., KORSHENKO, E. Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions. **Ocean Sci.** 13, 465–482. 2017.

OSADCHIEV, A.A., ZAVIALOV, P.O. Lagrangian model for surface-advected river plume. **Cont. Shelf Res.** 58, 96–106, 2013.

PALÓCZY, A. *et al.* Pathways and mechanisms of offshore water intrusions on the Espírito Santo Basin shelf (18° S–22° S, Brazil). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 121, n. 7, p. 51345163, 2016.

PAULY, D.; CHRISTENSEN, V.; *et al.* Primary production required to sustain global fisheries. **Nature**. 1995.

PENVEN, P. *et al.* Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations, **Environ. Modell. Softw.** 2008.

- PERASSOLI, F. **Distribuição Fitoplanctônica Associada à Dinâmica Físico-Química no Embaiamento de Tubarão – Oceano Atlântico Oeste**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2017
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Prog Oceanogr.** 26: 1–73, 1991.
- QUARESMA, V.S. *et al.* Modern sedimentary processes along the Doce River adjacent continental shelf. **Braz. J. Geol.** 45, 635–644. 2015.
- RADENAC, M. H.; RODIER, M. Nitrate and chlorophyll distributions in relations to thermohaline and current structures in the western tropical Pacific during 1985-1989. **Deep-Sea Research II**, v. 43, p. 725-752. 1996.
- RAYMOND, W.H., KUO, H.L. A radiation boundary condition for multi-dimensional flows. **Quart. J. R. Met. Soc.** 110, 535–551. 1984.
- REYNOLDS, C. S. **Ecology of Phytoplankton: ecology, biodiversity and conservation**. Cambridge University Press. New York. 2006.
- RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. **Continental Shelf Research**, v. 21, n. 4, p. 371-394, 2001.
- RUDORFF, N. *et al.* Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the Doce River plume off the eastern Brazilian coast. **ISPRS J. Photogramm.** 2018.
- SAHA, S. *et al.* The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **B. Am. Meteorol. Soc.** 91, 1015–1057. 2010.
- SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equation. 1. The basic experiment. **Mon. Weather Rev.** 91, 99–165. 1963.
- SNIRH. **Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos**. 2017. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 07 de outubro de 2019.
- SOUZA, R. B. **Oceanografia por satélites**. Oficina de Textos, 2005.
- STOKES, G.G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Mathematical and Physical Papers**. 1–10. 1901.
- SUNTHARALINGAM, P., SARMIENTO, J. L.; TOGGWEILER, J. R.: Global significance of nitrous-oxide production and transport from oceanic low-oxygen zones: A modeling study, **Glob. biogeochem. Cy.**, 14, 1353–1370, 2000.

SUNTHARALINGAM, P., *et al.* Quantifying the Impact of Anthropogenic Nitrogen Deposition on Oceanic Nitrous Oxide, **Geophys. Res. Lett.**, 39, 2012.

TRÉGUER, P. *et al.* Water column biogeochemistry below the euphotic zone. In: **Ocean Biogeochemistry**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. p. 145-156.

VALENTIN, J. L. **Características hidrobiológicas da região central da Zona Econômica Exclusiva brasileira (Salvador, BA, ao Cabo de São Tomé, RJ)**. Brasília: Ideal editora. 168 p. 2007.

WARNER, J.C. *et al.* Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Model.* 8, 81–113. 2005.

WILKS, D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Segunda edição. **Elsevier**. Nova York. 2006.

APÊNDICE I

Como citado anteriormente na seção de Fundeios, alguns parâmetros não foram coletados continuamente pelos equipamentos de CTD de superfície e de fundo. Em alguns momentos não houve coleta devido a problemas nos equipamentos, em outros momentos a coleta ocorreu, porém, os dados coletados foram espúrios e dessa forma descartados das análises. O Quadro 1 resume as informações da coleta dos dados de temperatura, concentração de clorofila-a, turbidez, salinidade e concentração de oxigênio dissolvido e as intercorrências ao longo das campanhas C1 a C10 dos Fundeios F1 a F4.

Na sequência serão apresentadas as séries temporais dos parâmetros citados acima. A ordem das figuras segue a distribuição dos fundeios F1, F2, F3 e F4, sendo apresentados os dados de superfície e fundo sequencialmente.

Quadro 1: Períodos de aquisição de dados dos fundeios F1 a F4 com as informações de intercorrências encontradas ao longo das campanhas de medição à superfície e no fundo. Os parâmetros referidos são: Temperatura (Temp), Concentração de Clorofila-a ([chlo-a]), Turbidez (Turb), Salinidade (Sal) e Concentração de oxigênio dissolvido ([OD]).

Campanha (duração da campanha)		F1					F2					F3					F4									
		Temp	[chlo]-a	Turb	Sal	[OD]	Temp	[chlo]-a	Turb	Sal	[OD]	Temp	[chlo]-a	Turb	Sal	[OD]	Temp	[chlo]-a	Turb	Sal	[OD]					
1 (01/11/2018 - 03/12/2018)	Superfície	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	Fundo	*	-	-	-	-	*	-	-	-	-	*	-	-	-	-	*	-	-	-	-					
2 (01/12/2018 - 12/01/2019)	Superfície	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	Fundo	*	ok	ok	ok	-	*	-	-	-	-	*	ok	ok	ok	-	*	P	P	P	-					
3 (11/01/2019 - 10/02/2019)	Superfície	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	Fundo	*	P	P	P	-	*	E	E	E	-	*	-	-	-	-	*	P	P	P	-					
4 (09/02/2019 - 21/03/2019)	Superfície	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	Fundo	*	P	P	P	-	*	ok	ok	ok	-	*	ok	ok	ok	-	*	P	P	P	-					
5 (18/03/2019 - 18/04/2019)	Superfície	ok	ok	ok	E	-	ok	ok	ok	E	-	ok	ok	ok	E	-	ok	ok	ok	E	-					
	Fundo	*	-	-	-	-	*	ok	ok	E	-	*	ok	ok	ok	-	*	ok	ok	ok	-					
6 (16/04/2019 - 24/05/2019)	Superfície	ok	ok	ok	E	-	ok	ok	ok	E	-	ok	ok	ok	E	-	P	P	P	E	-					
	Fundo	*	-	-	-	-	*	ok	ok	E	-	*	erro	erro	erro	-	*	-	-	-	-					
7 (22/05/2019 - 18/06/2019)	Superfície	ok	ok	ok	E	-	ok	E	E	E	-	ok	ok	ok	E	-	-	-	-	-	-					
	Fundo	*	-	-	-	-	*	-	-	-	-	*	-	-	-	-	*	P	P	P	-					
8 (17/06/2019 - 31/07/2019)	Superfície	ok	ok	ok	E	-	P	E	E	P	-	ok	ok	ok	E	-	-	-	-	-	-					
	Fundo	*	-	-	-	-	*	-	-	-	-	*	ok	ok	P	-	*	-	-	-	-					
9 (29/07/2019 - 02/09/2019)	Superfície	ok	ok	ok	ok	-	ok	ok	ok	E	-	P	P	P	P	-	ok	ok	E	ok	-					
	Fundo	*	-	-	-	-	*	ok	ok	E	-	*	ok	ok	E	-	*	-	-	-	-					
10 (29/08/2019 - 30/09/2019)	Superfície	ok	ok	ok	ok	-	P	P	P	erro	-	E	E	E	E	-	-	-	-	-	-					
	Fundo	*	-	-	-	-	*	-	-	-	-	*	erro	erro	erro	-	*	-	-	-	-					
(ok) dados corretos		(E) dados espúrios					(P) equipamento parou de funcionar					(erro) equipamento não coletou informações					(-) equipamento não instalado					(*) Demonstrado ao longo do documento – dados de ADCP				

Figura 1: Distribuição temporal da temperatura à superfície no fundeiro F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

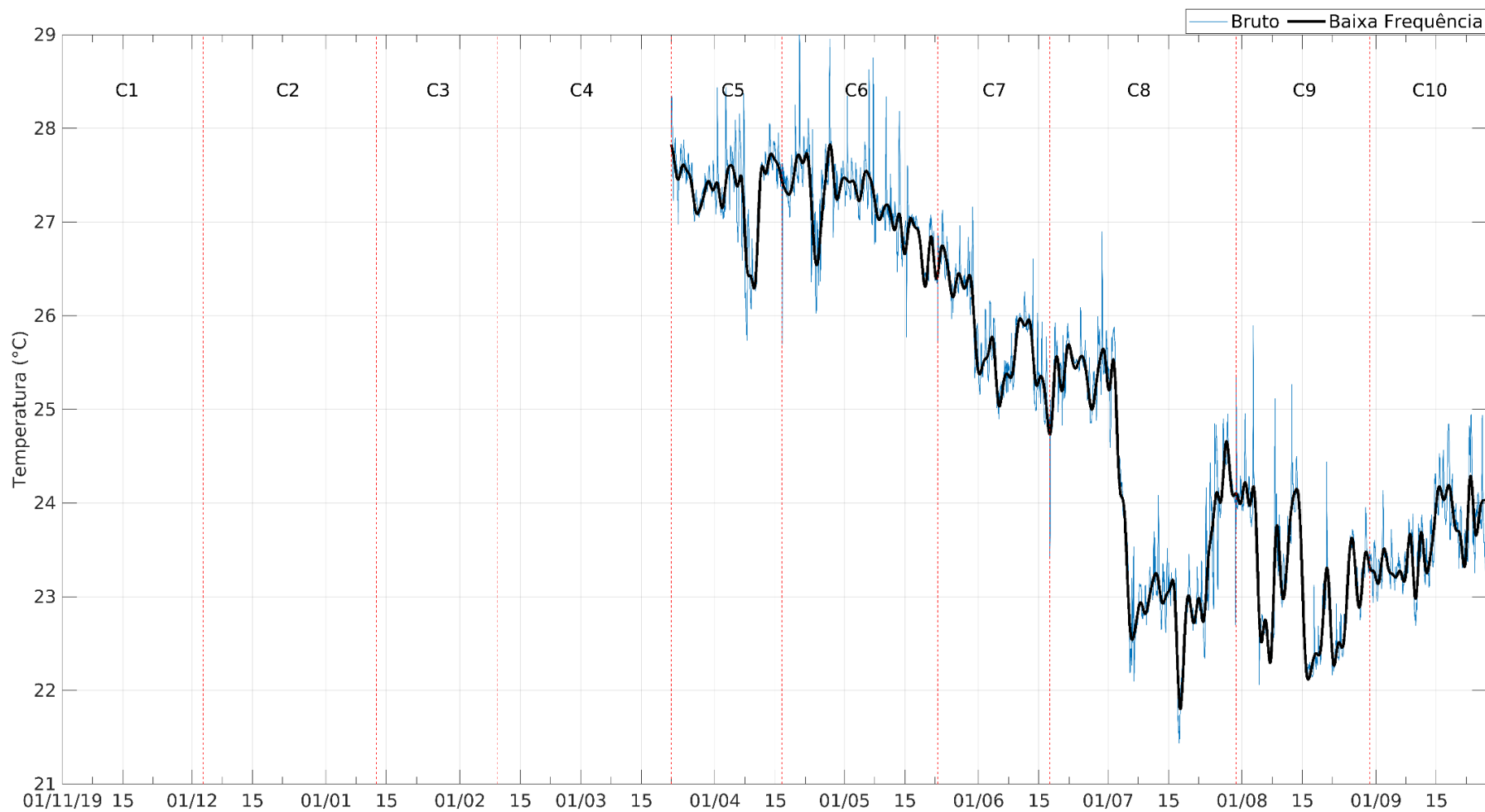


Figura 2: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a à superfície no fundeiro F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

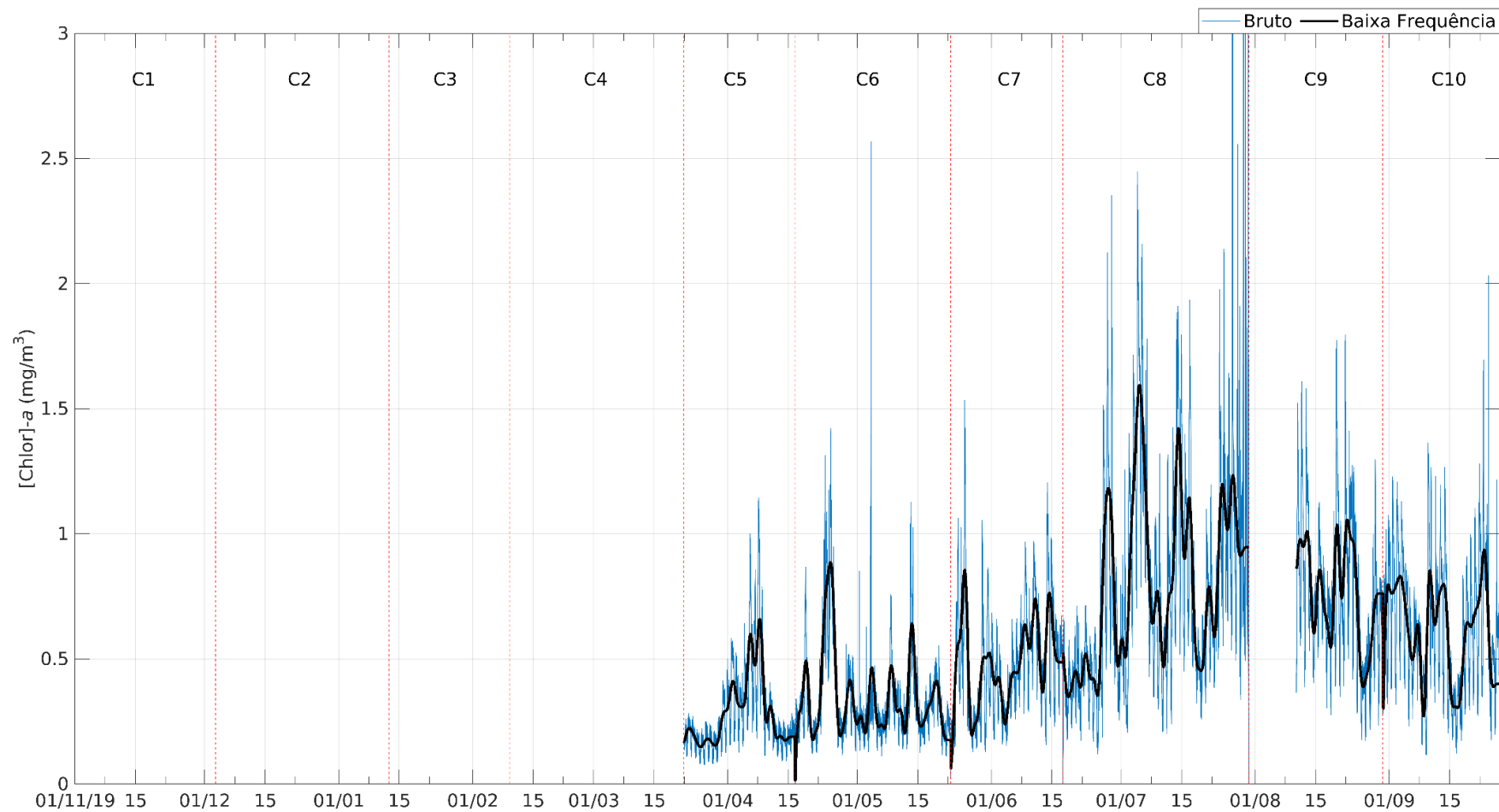


Figura 3: Distribuição temporal de turbidez à superfície no fundeio F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

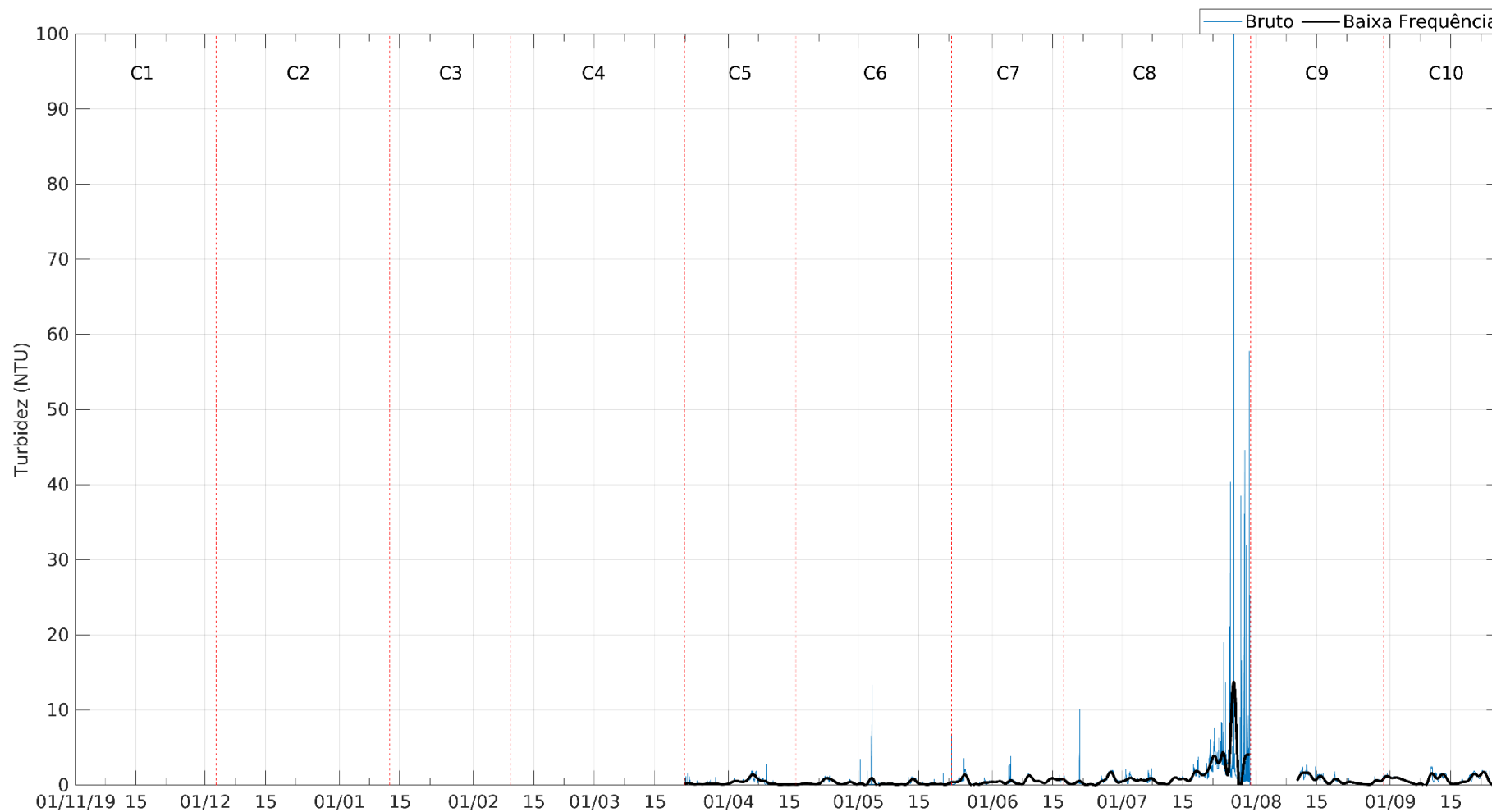


Figura 4: Distribuição temporal da concentração de oxigênio dissolvido à superfície no fundeio F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.



Figura 5: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a junto ao fundo no fundeio F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.



Figura 6: Distribuição temporal de turbidez junto ao fundo no fundeio F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

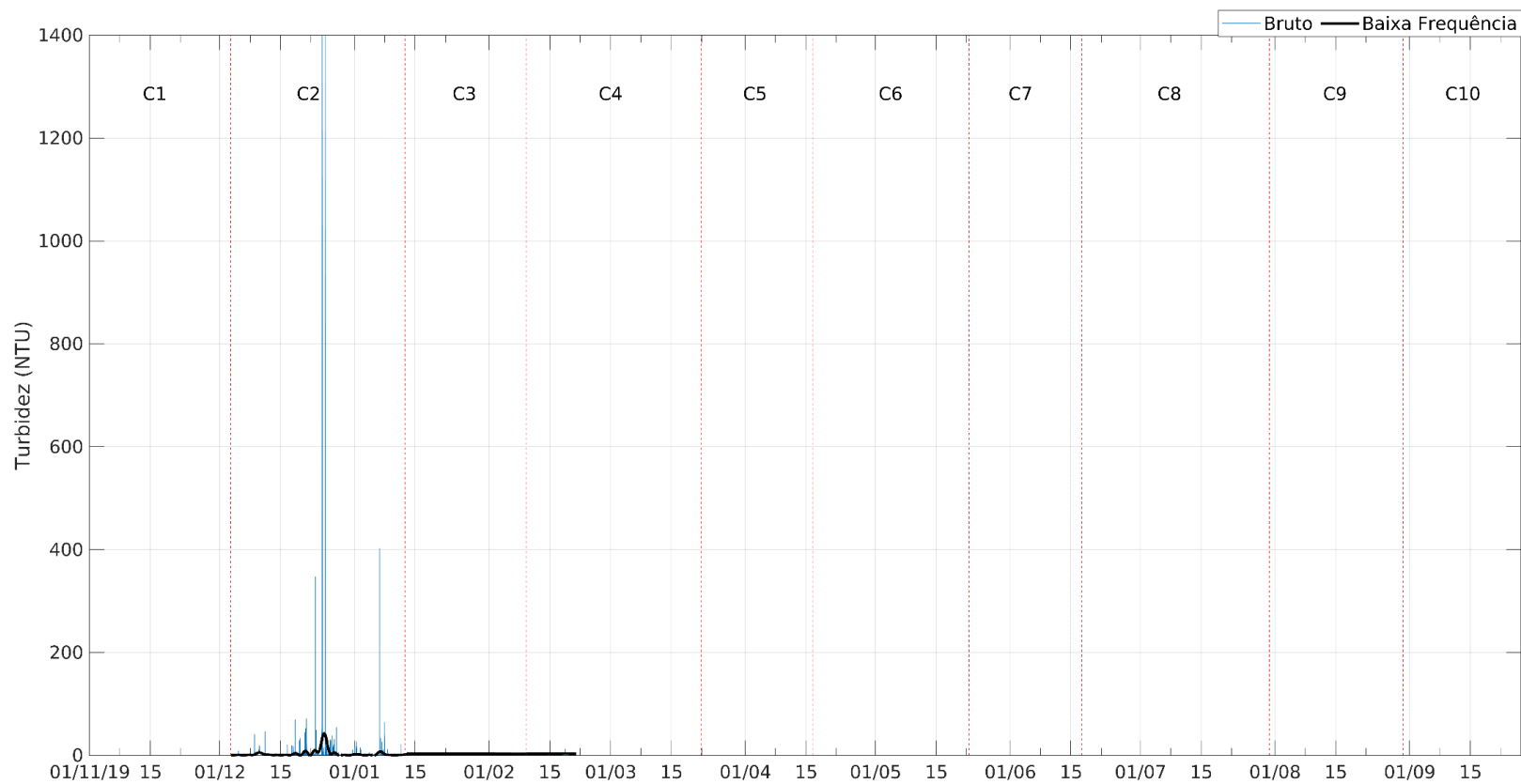


Figura 7: Distribuição temporal de salinidade junto ao fundo no fundeiro F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.



Figura 8: Distribuição temporal da concentração de oxigênio dissolvido junto fundo no fundeio F1 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

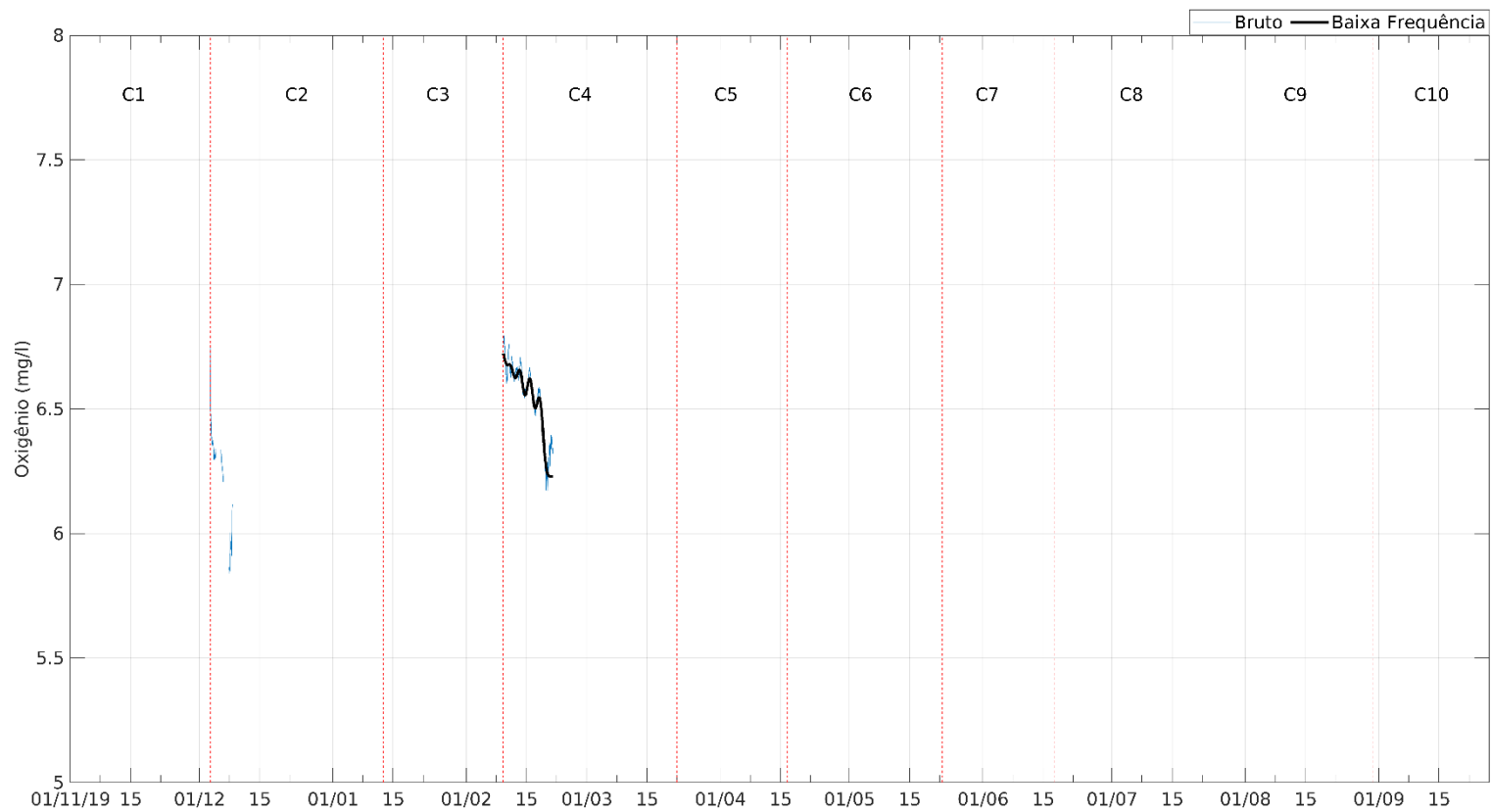


Figura 9: Distribuição temporal da concentração de temperatura à superfície no fundeio F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

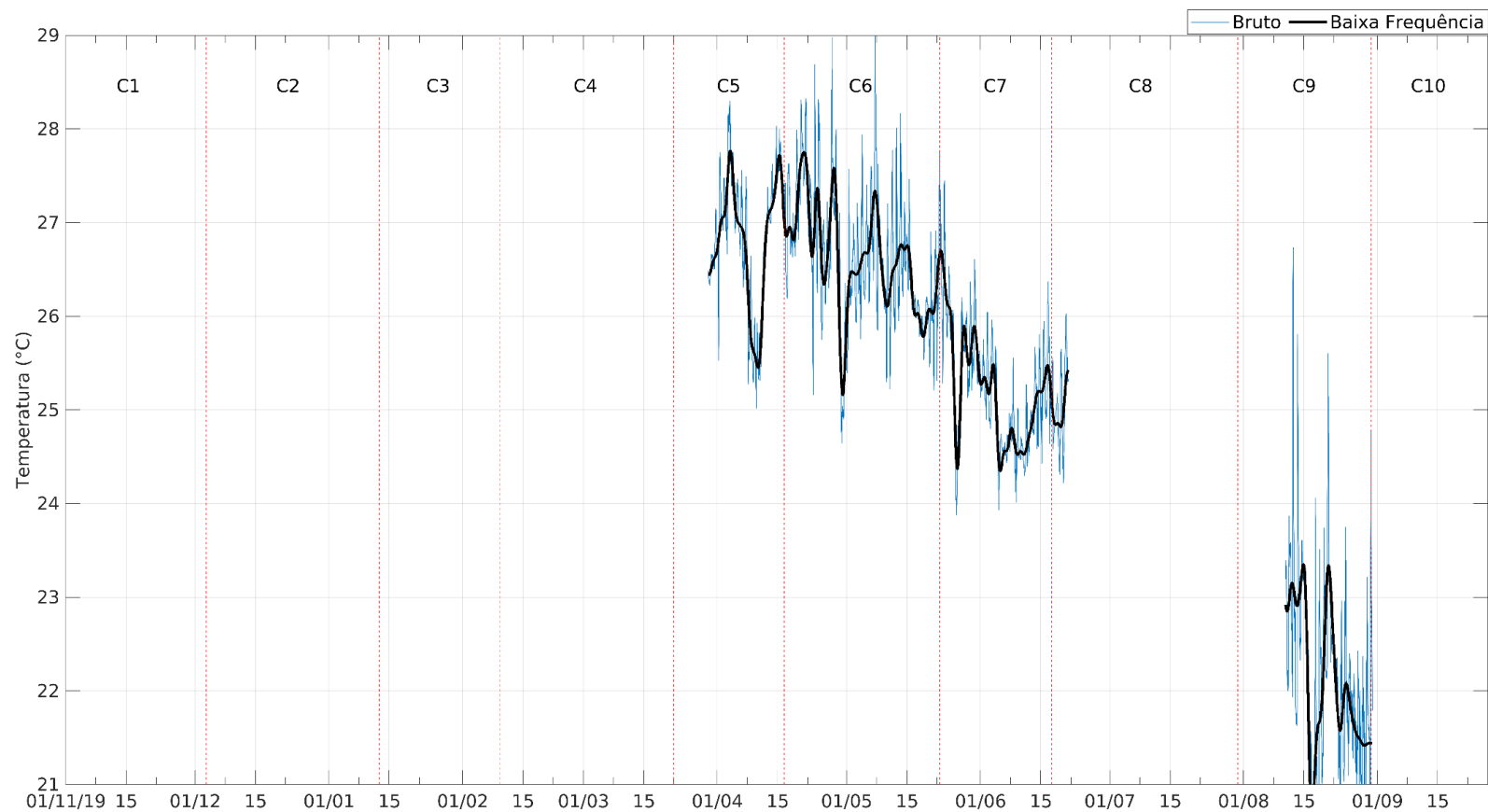


Figura 10: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a à superfície no fundeio F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

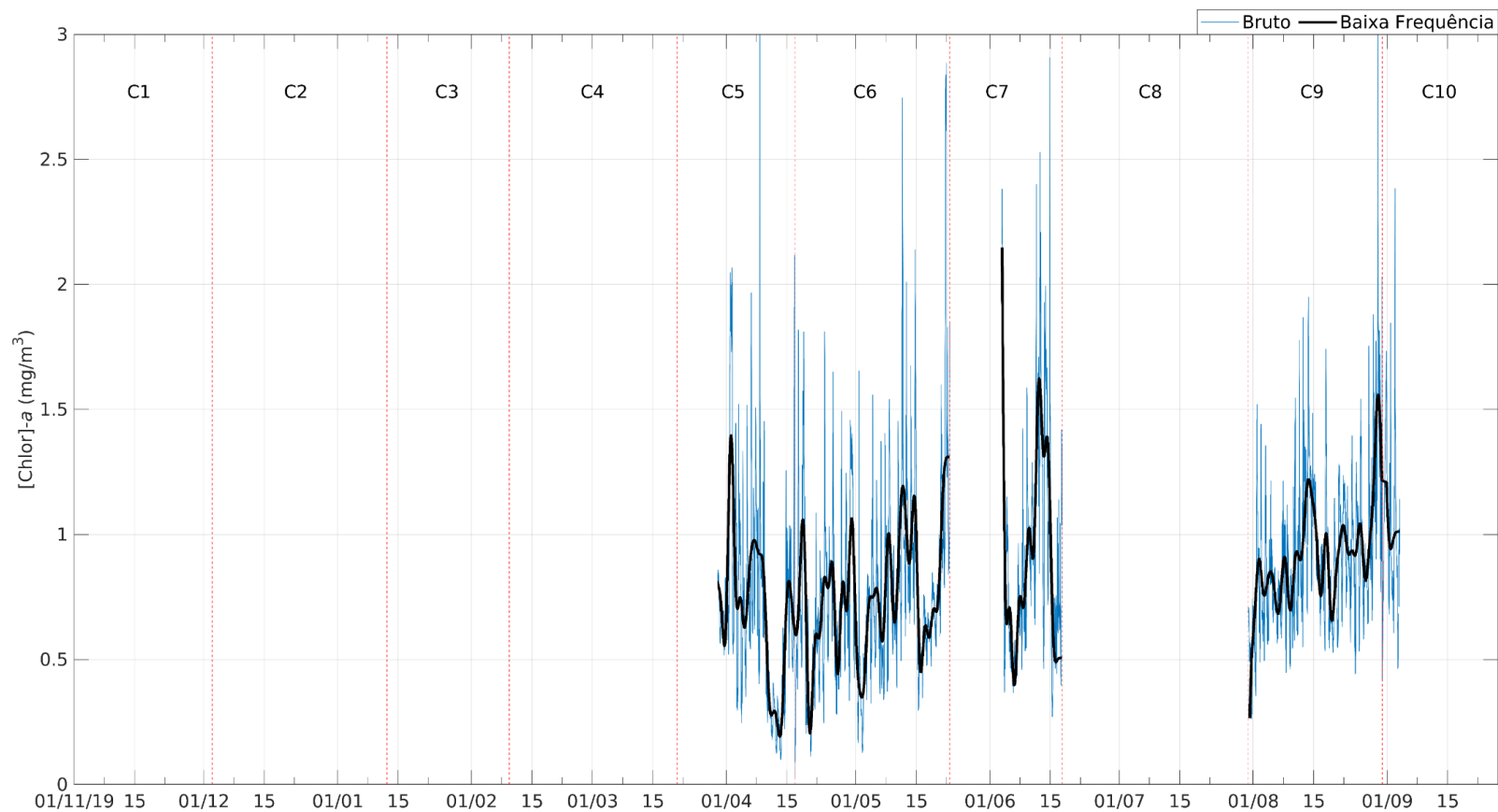


Figura 11: Distribuição temporal de turbidez à superfície no fundeio F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

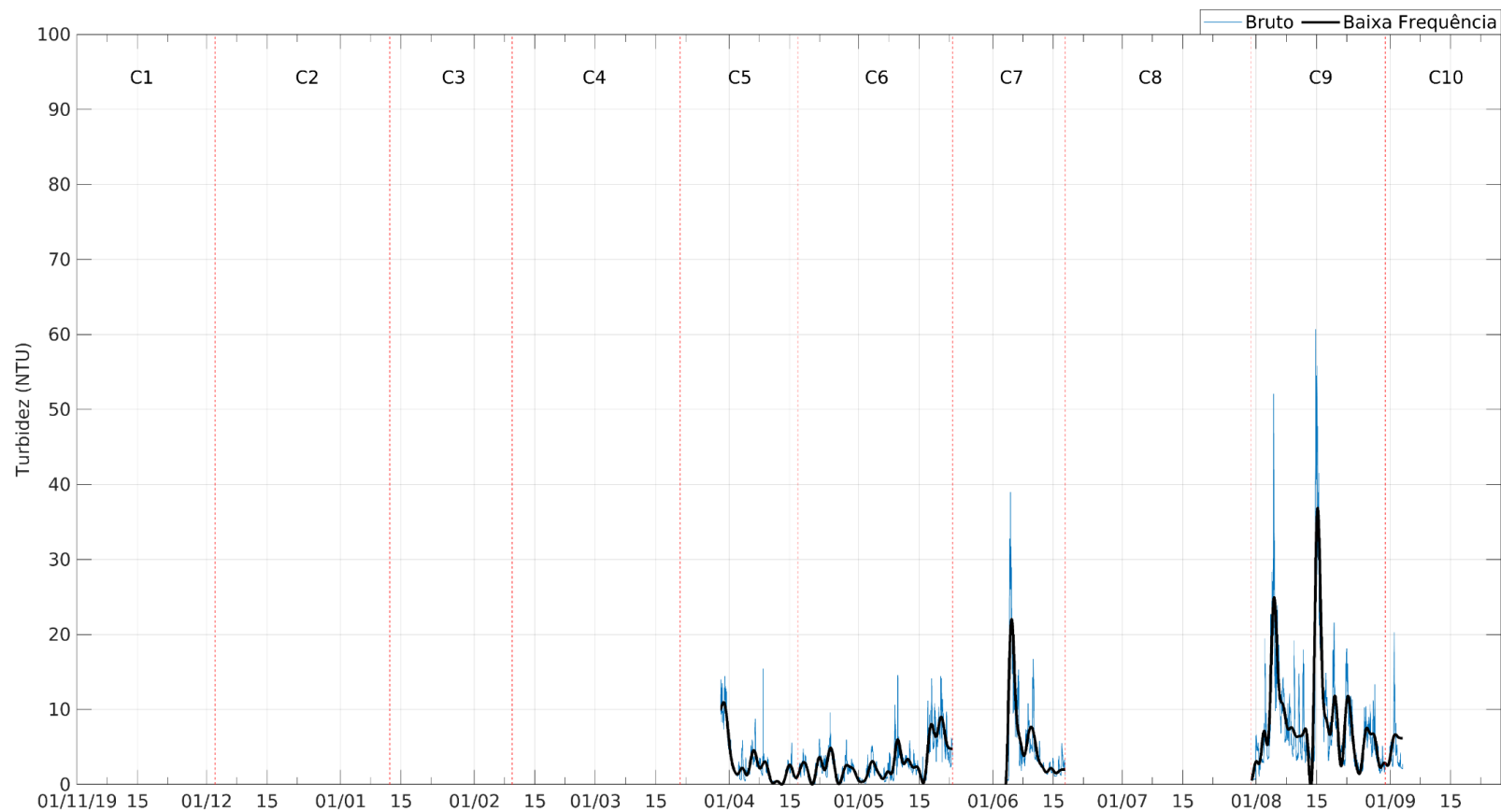


Figura 12: Distribuição temporal de salinidade à superfície no fundeiro F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

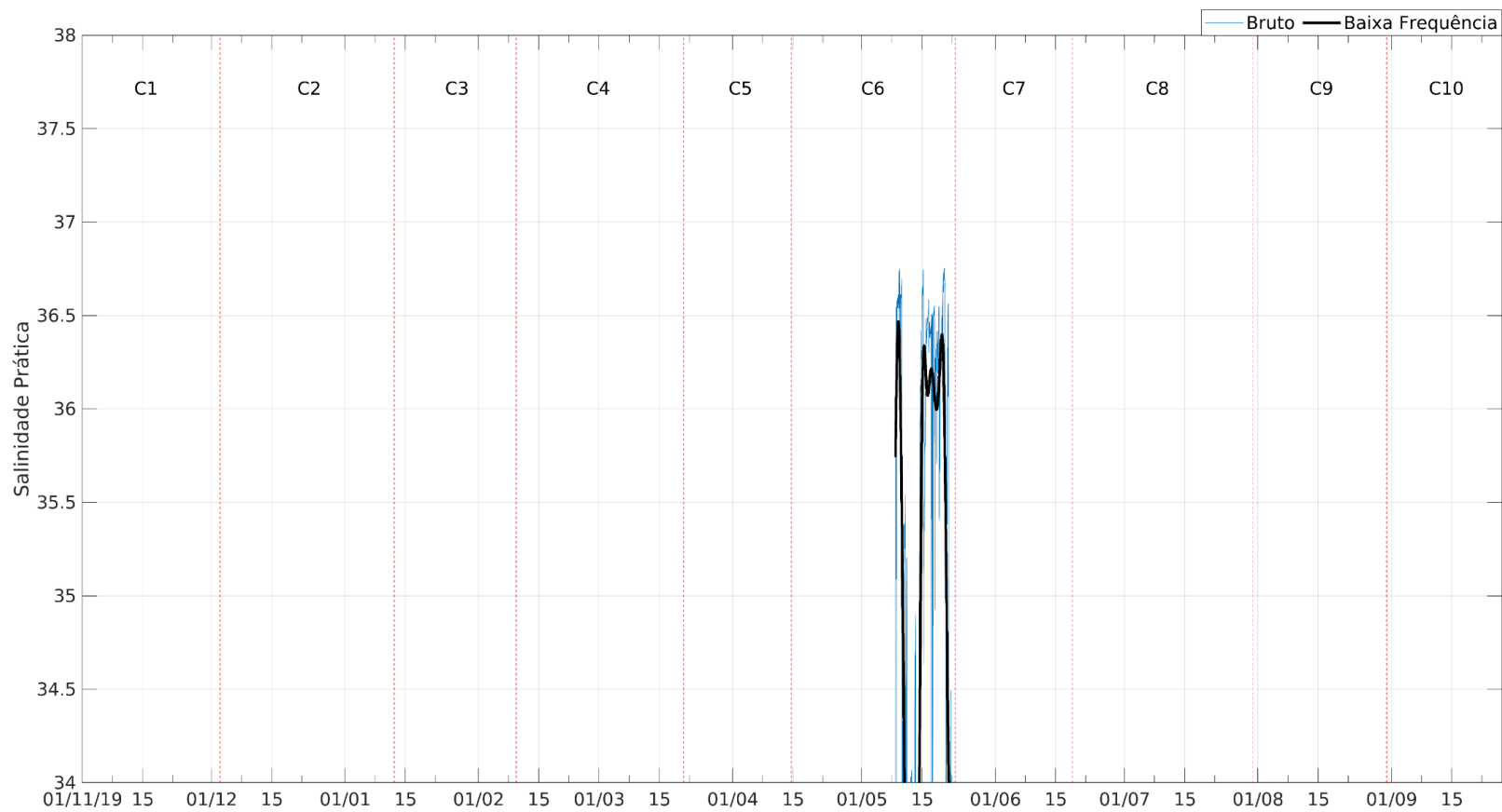


Figura 13: Distribuição temporal de concentração de oxigênio dissolvido à superfície no fundeio F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

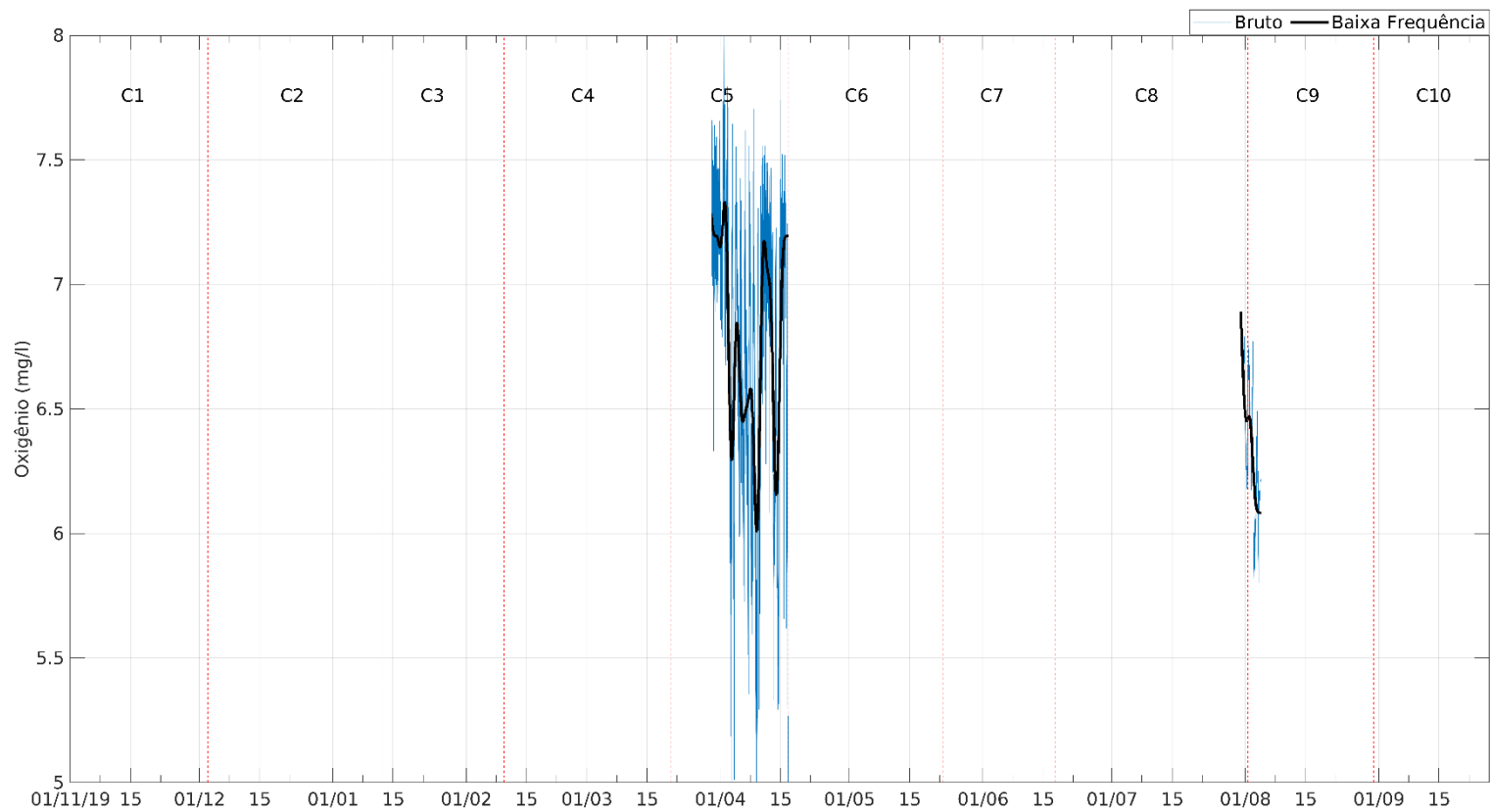


Figura 14: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a junto ao fundo no fundeio F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

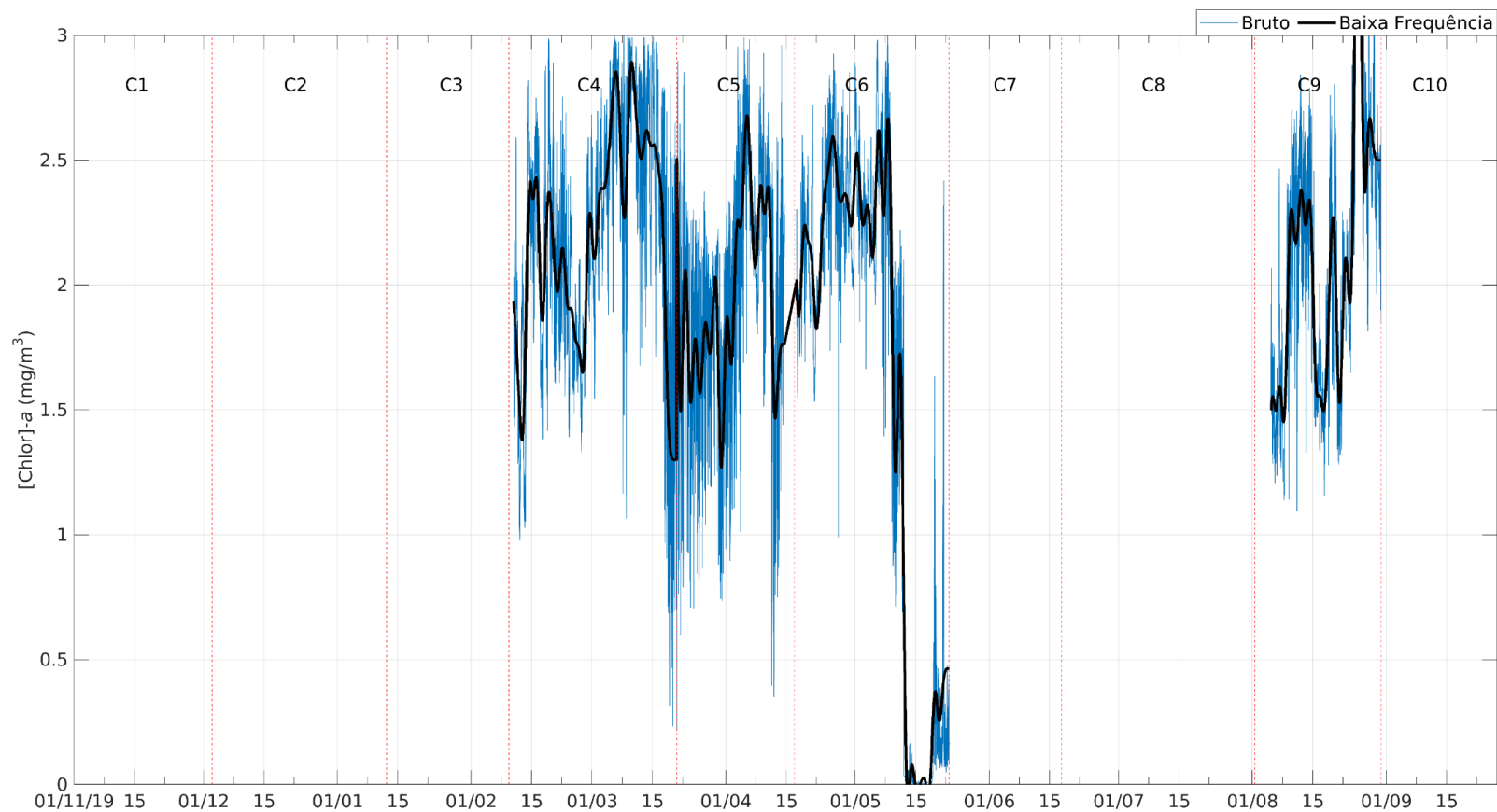


Figura 15: Distribuição temporal de turbidez junto ao fundo no fundeiro F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

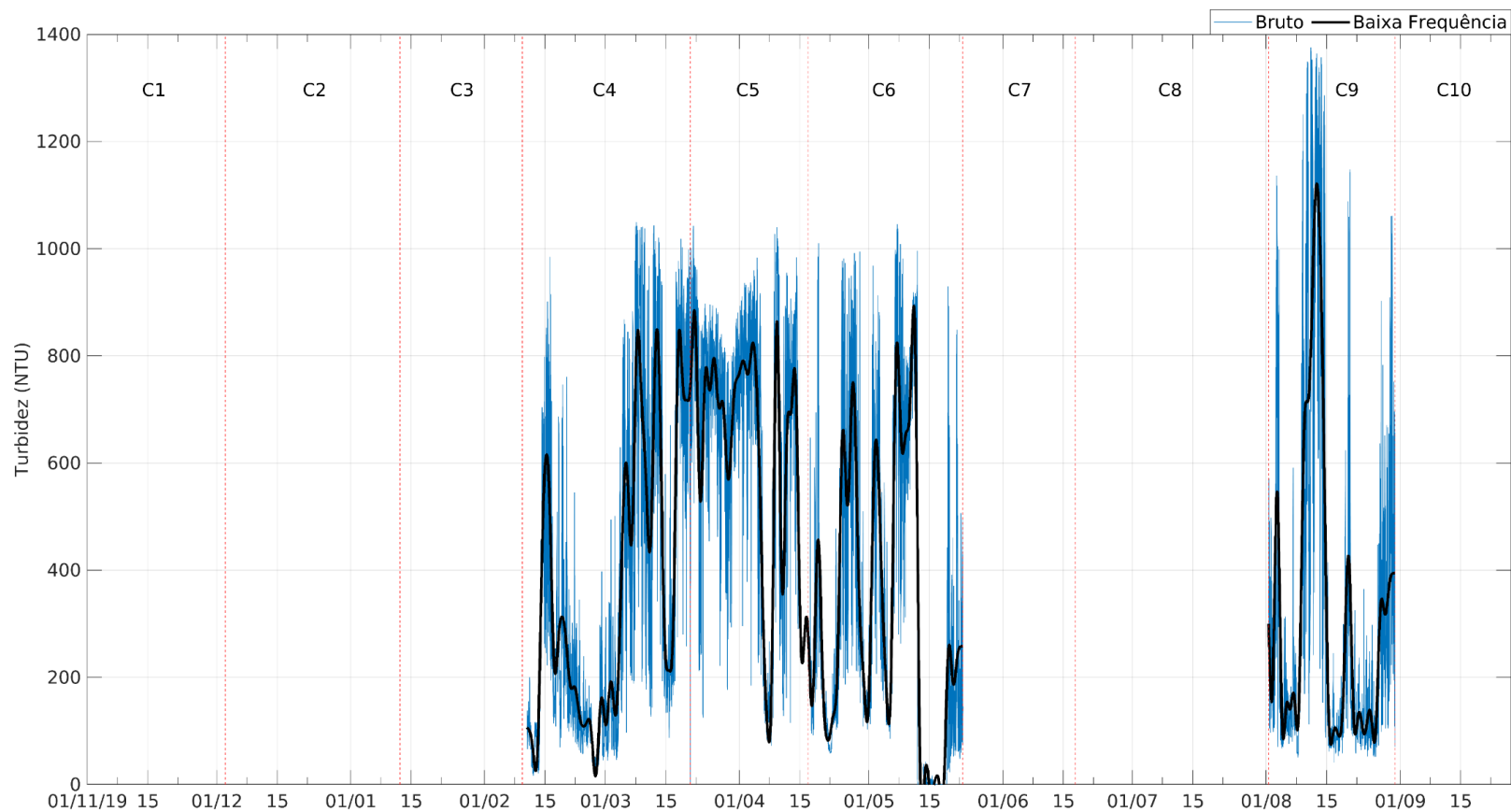


Figura 16: Distribuição temporal de salinidade junto ao fundo no fundeio F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

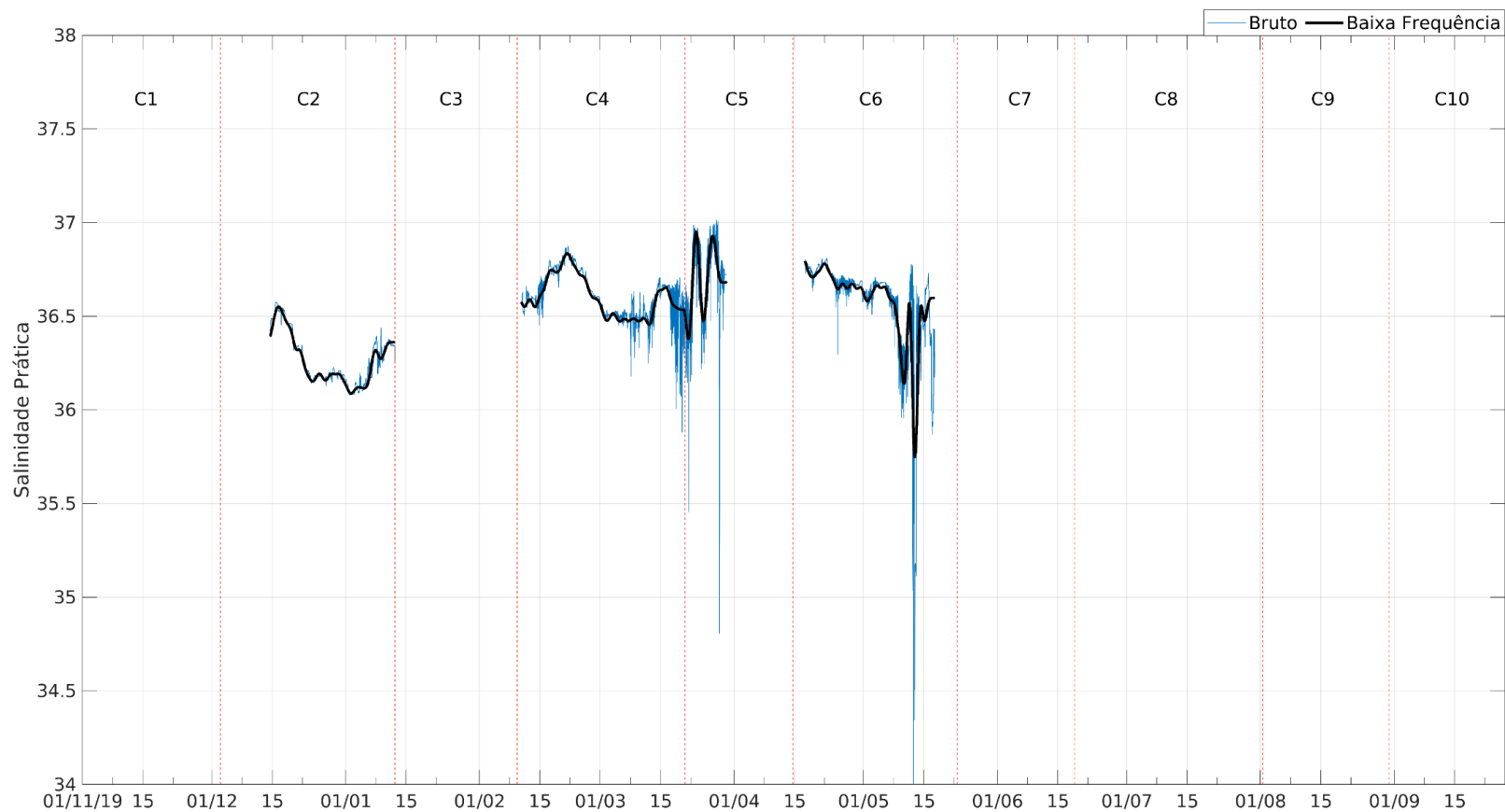


Figura 17: Distribuição temporal de concentração de oxigênio dissolvido junto ao fundo no fundeio F2 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

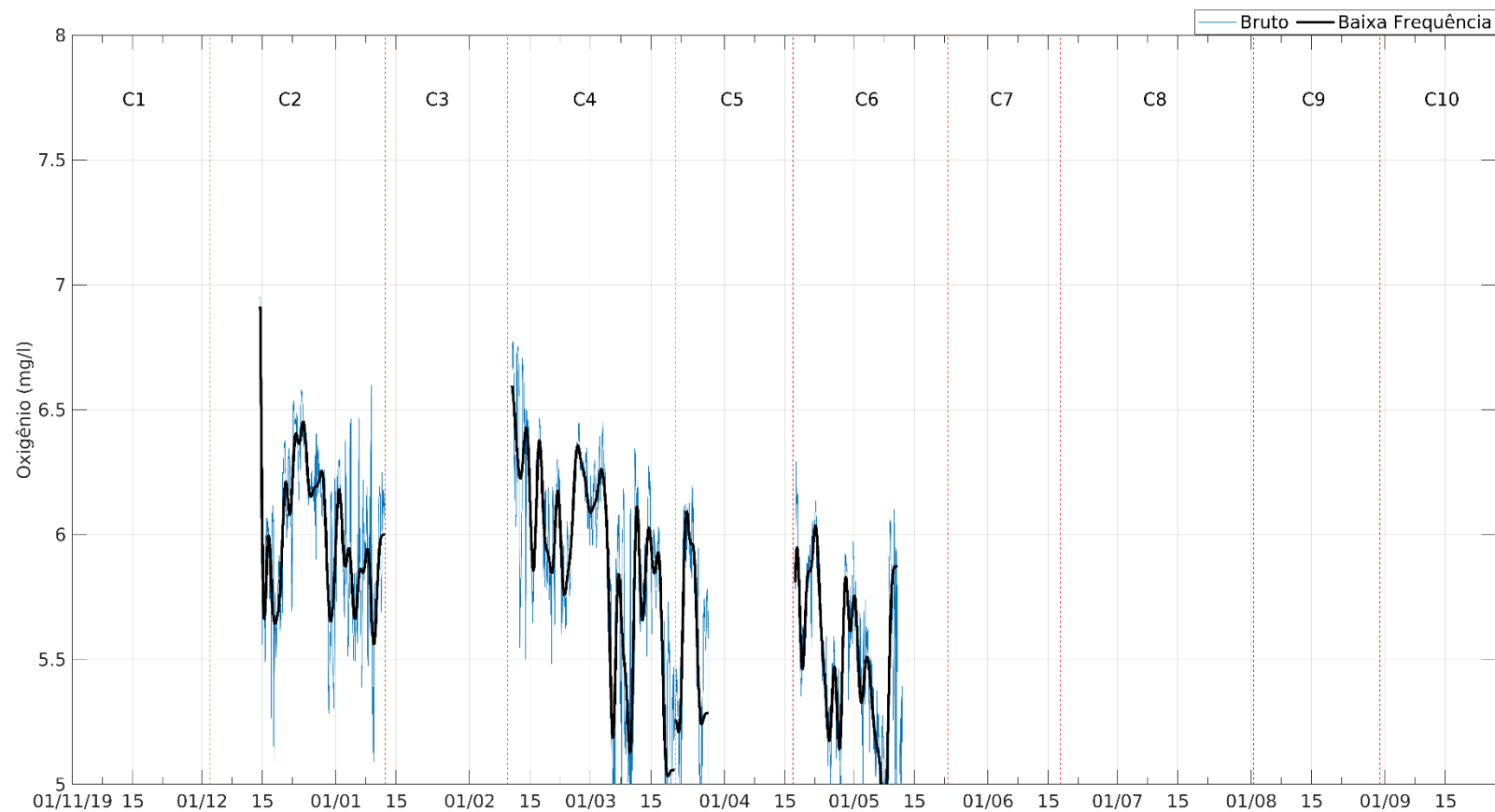


Figura 18: Distribuição temporal de temperatura à superfície no fundeio F3 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

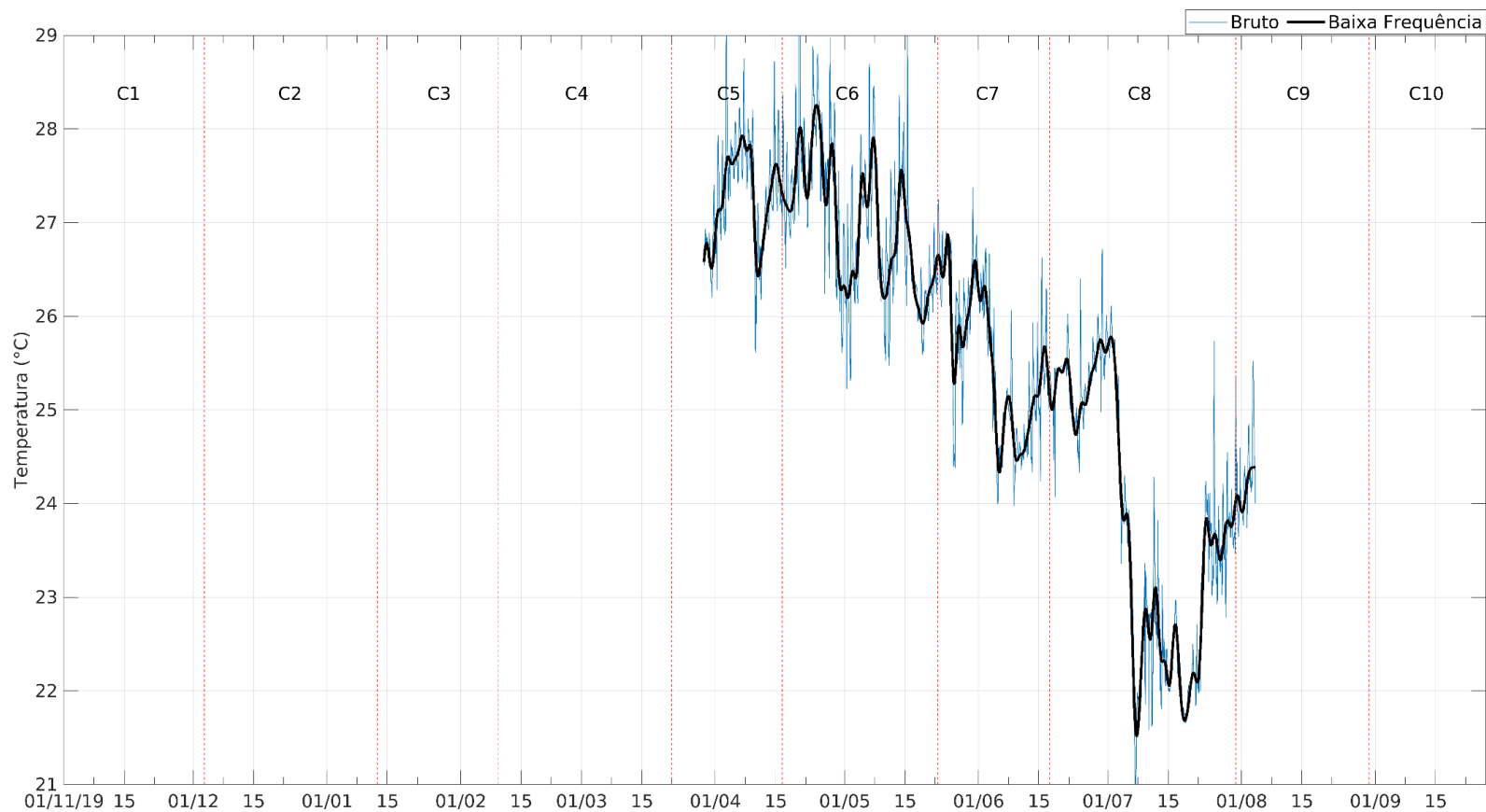


Figura 19: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a à superfície no fundeio F3 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

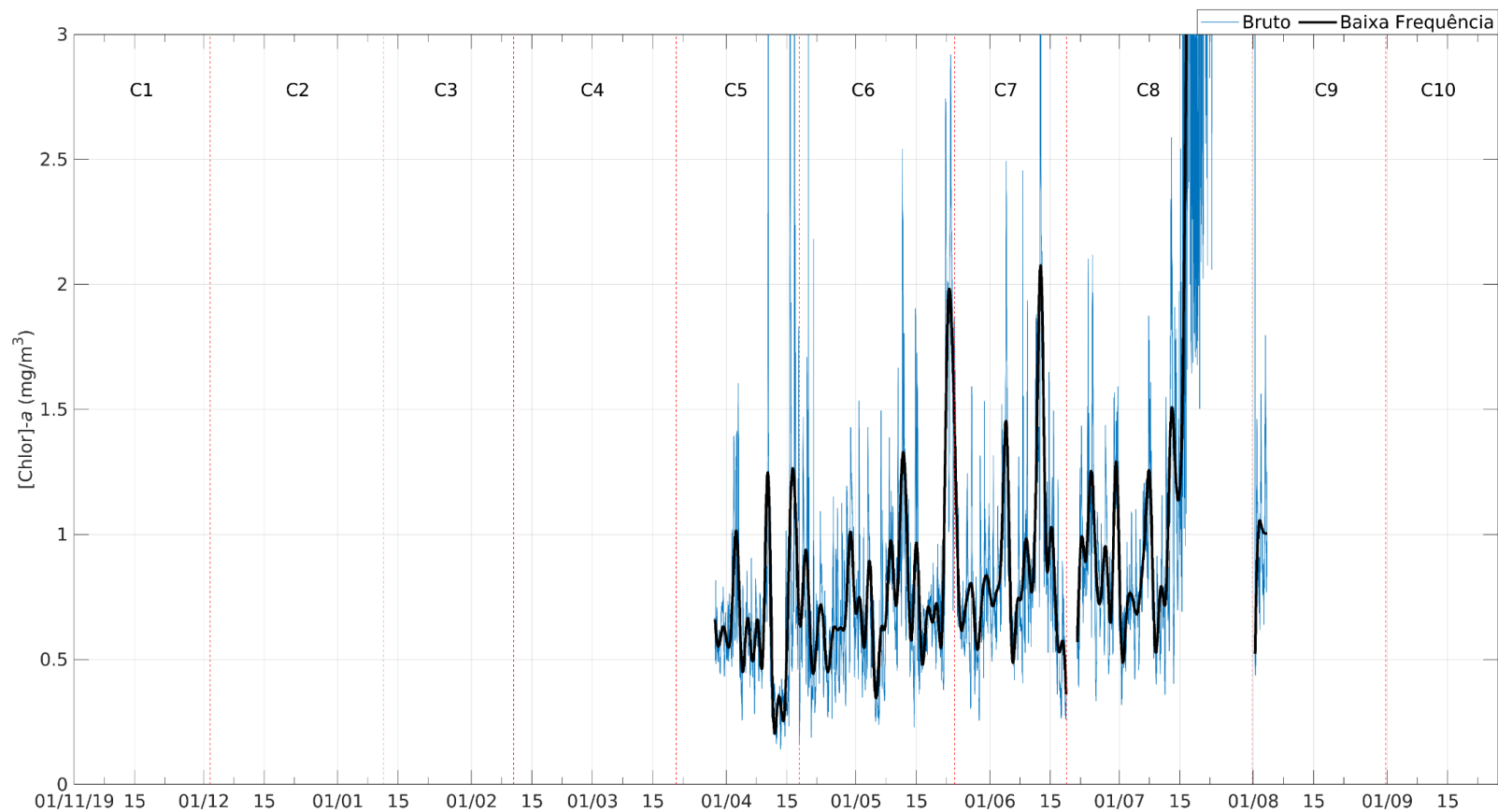


Figura 20: Distribuição temporal de turbidez à superfície no fundeio F3 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

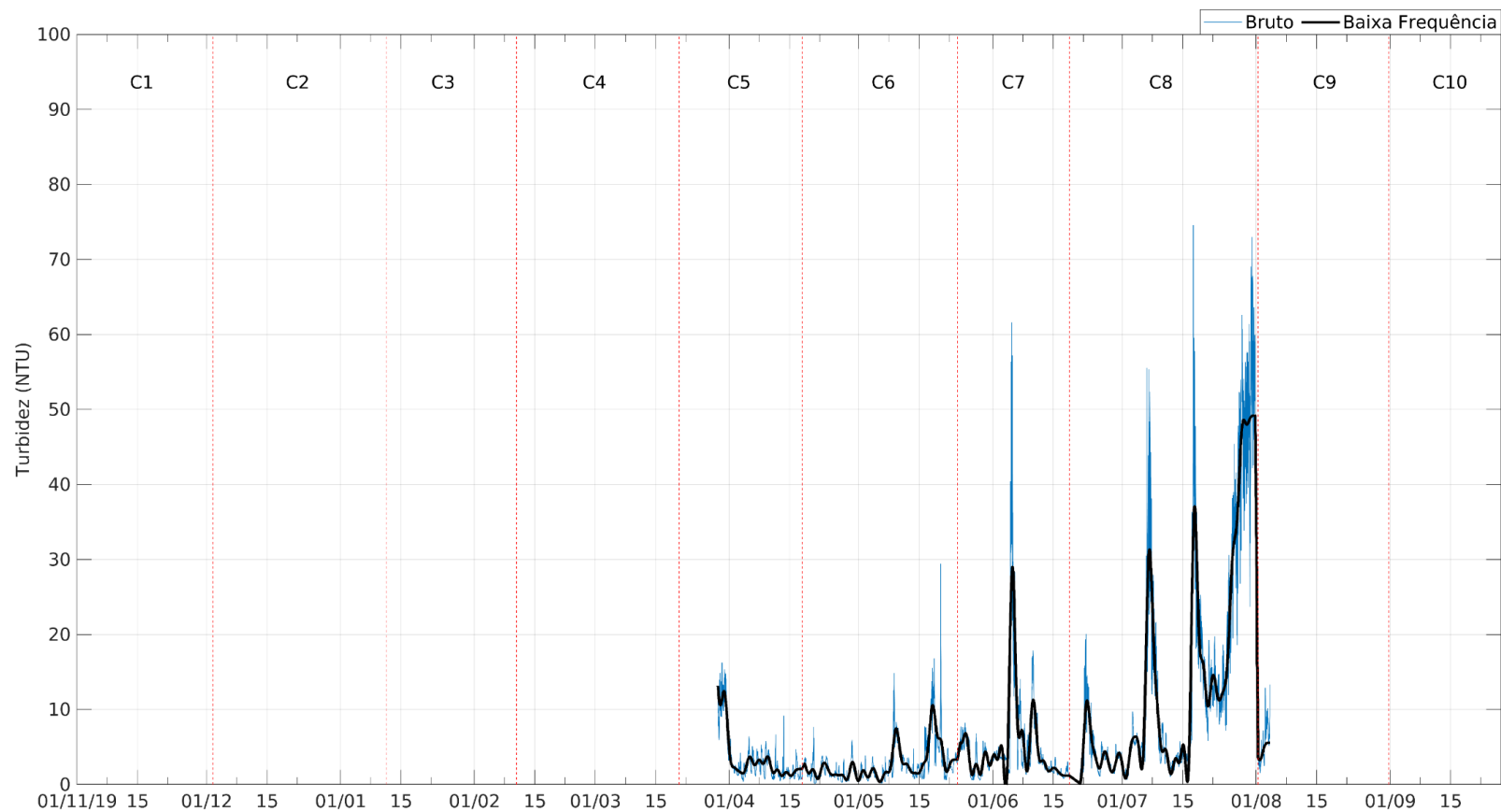


Figura 21: Distribuição temporal da concentração de oxigênio dissolvido à superfície no Fundeio F3 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

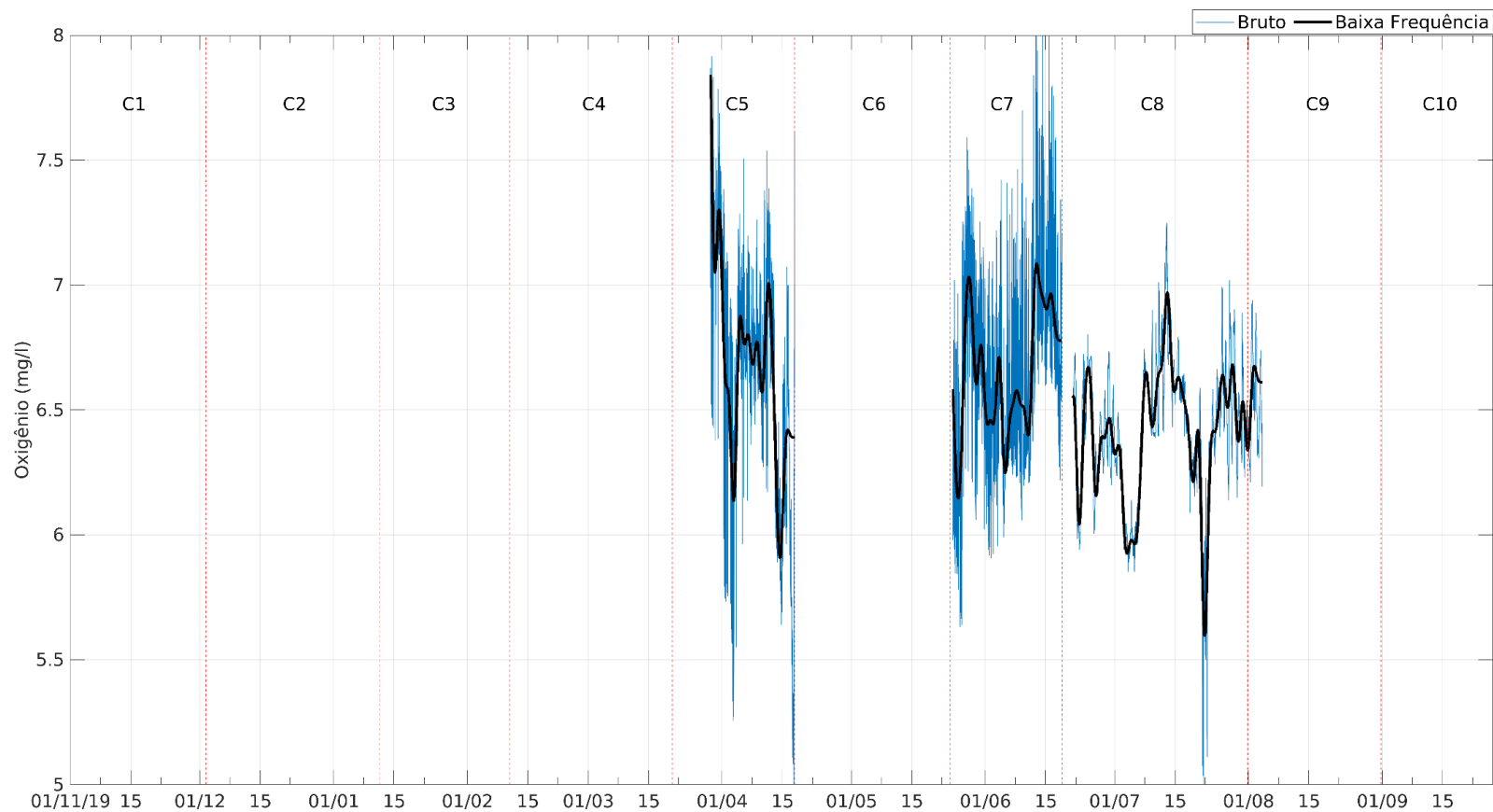


Figura 22: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a junto ao fundo no Fundeio F3 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

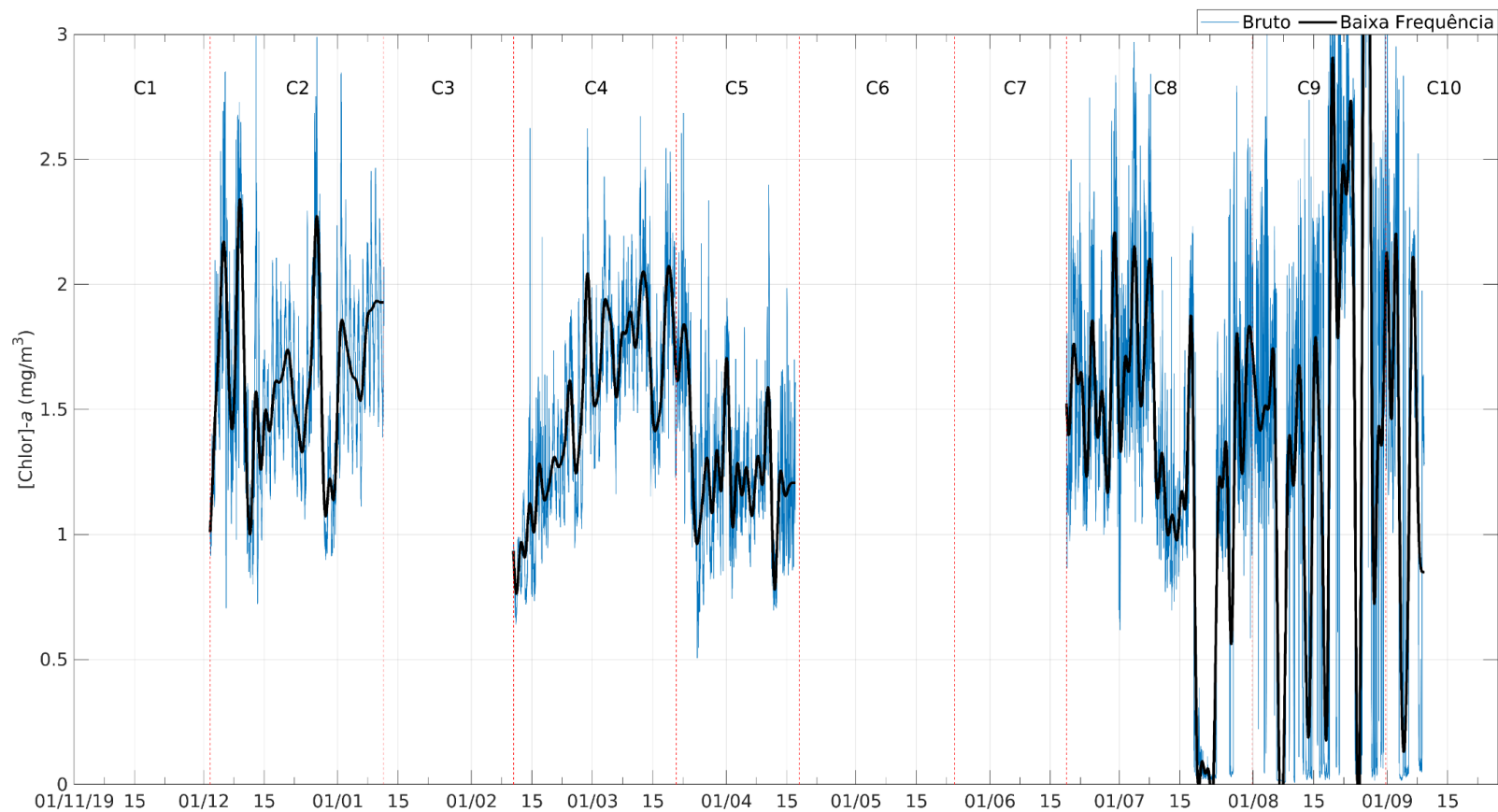


Figura 23: Distribuição temporal de turbidez junto ao fundo no fundeiro F3 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

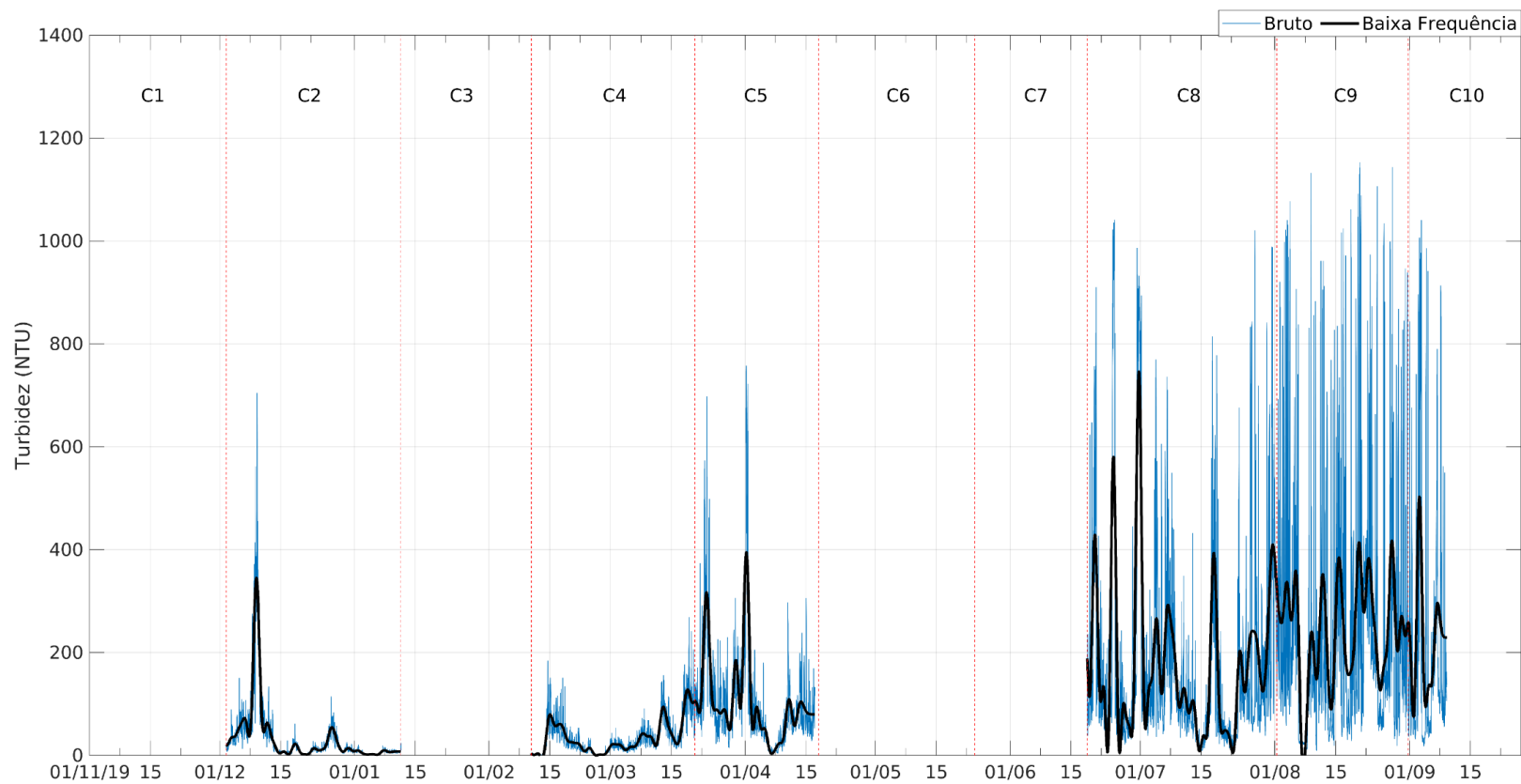


Figura 24: Distribuição temporal de salinidade junto ao fundo no fundeio F3 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

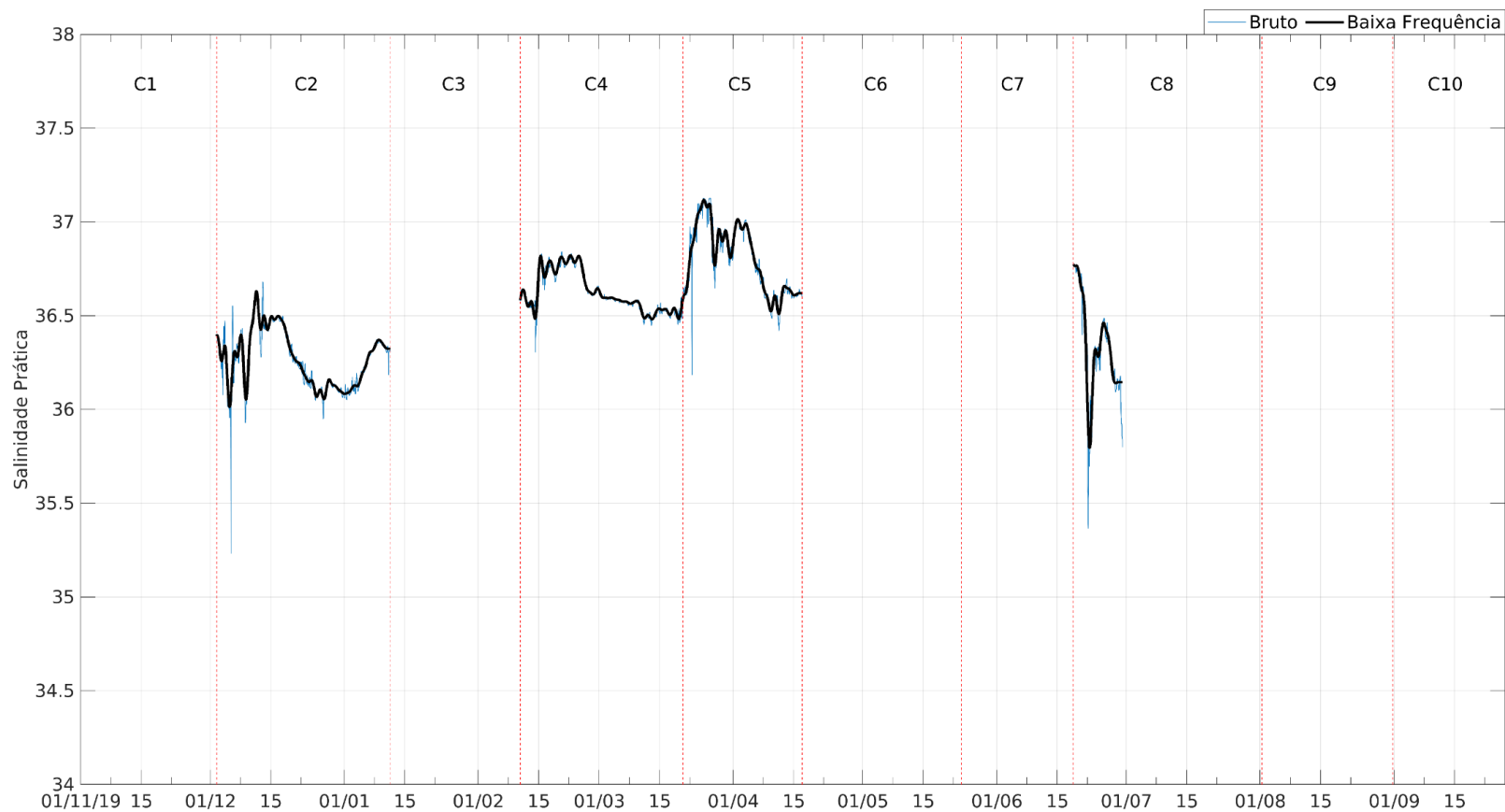


Figura 25: Distribuição temporal da concentração oxigênio dissolvido à superfície no fundeio F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

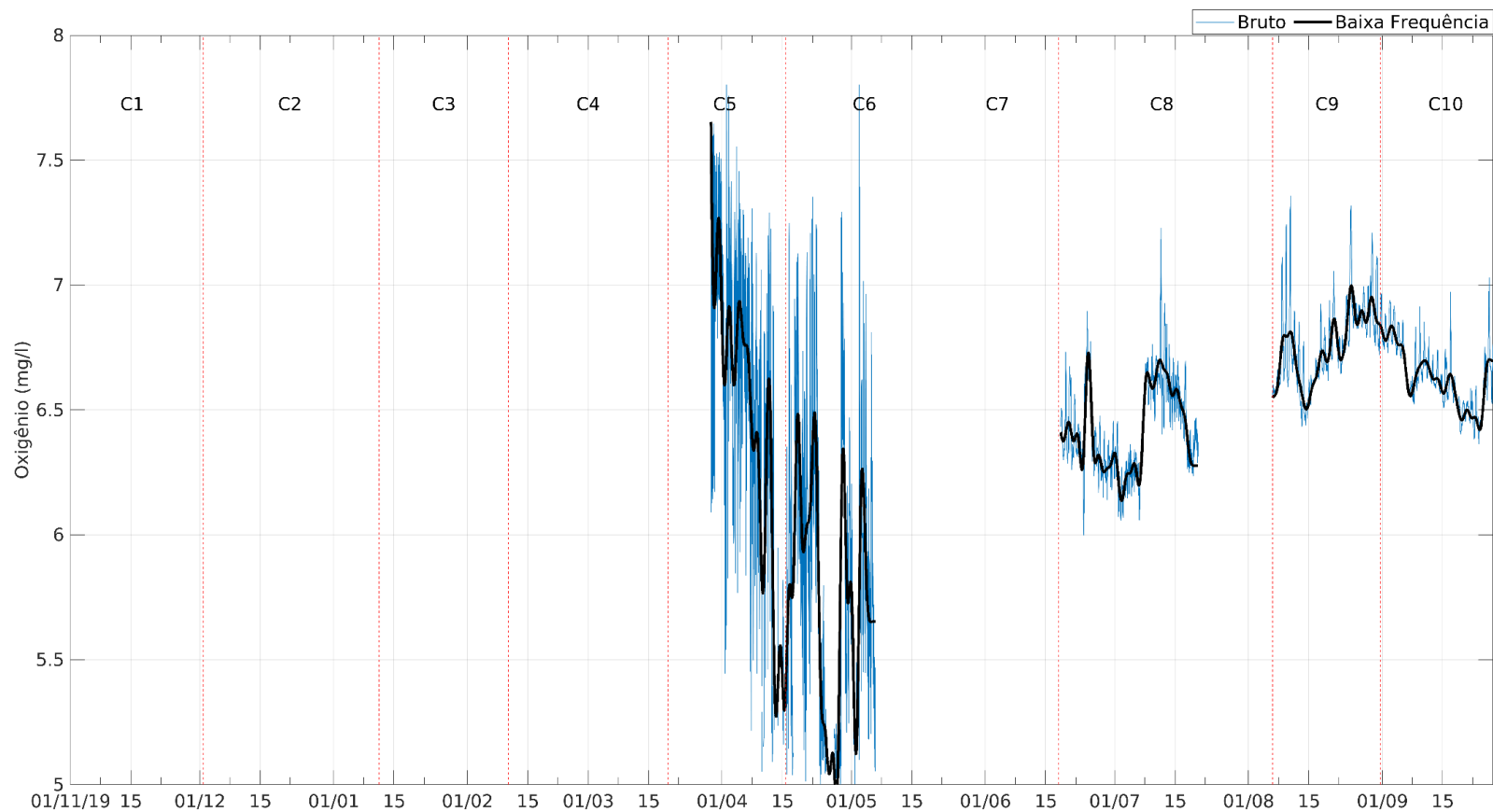


Figura 26: Distribuição temporal de temperatura à superfície no fundeio F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

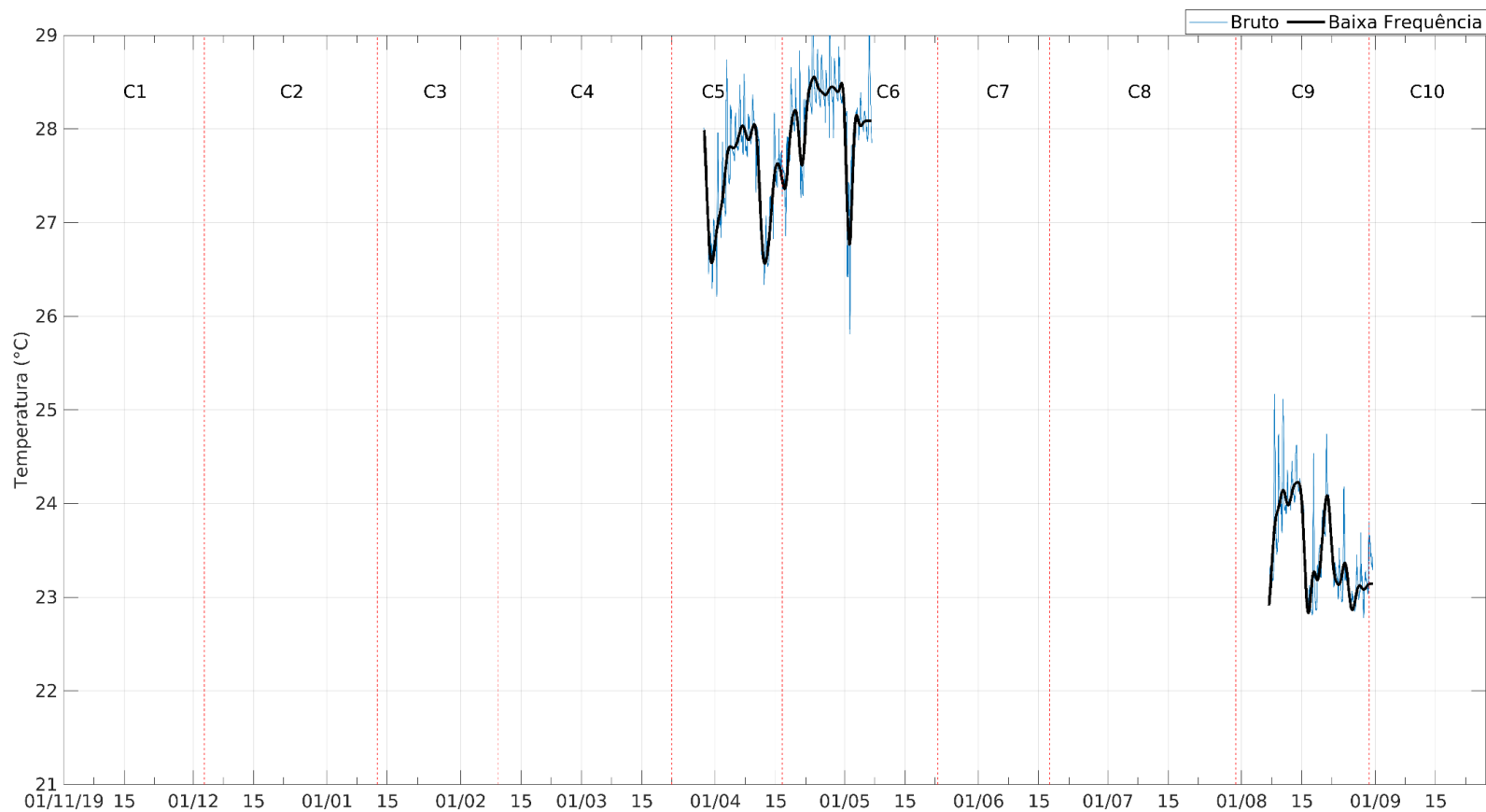


Figura 27: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a à superfície no fundeio F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

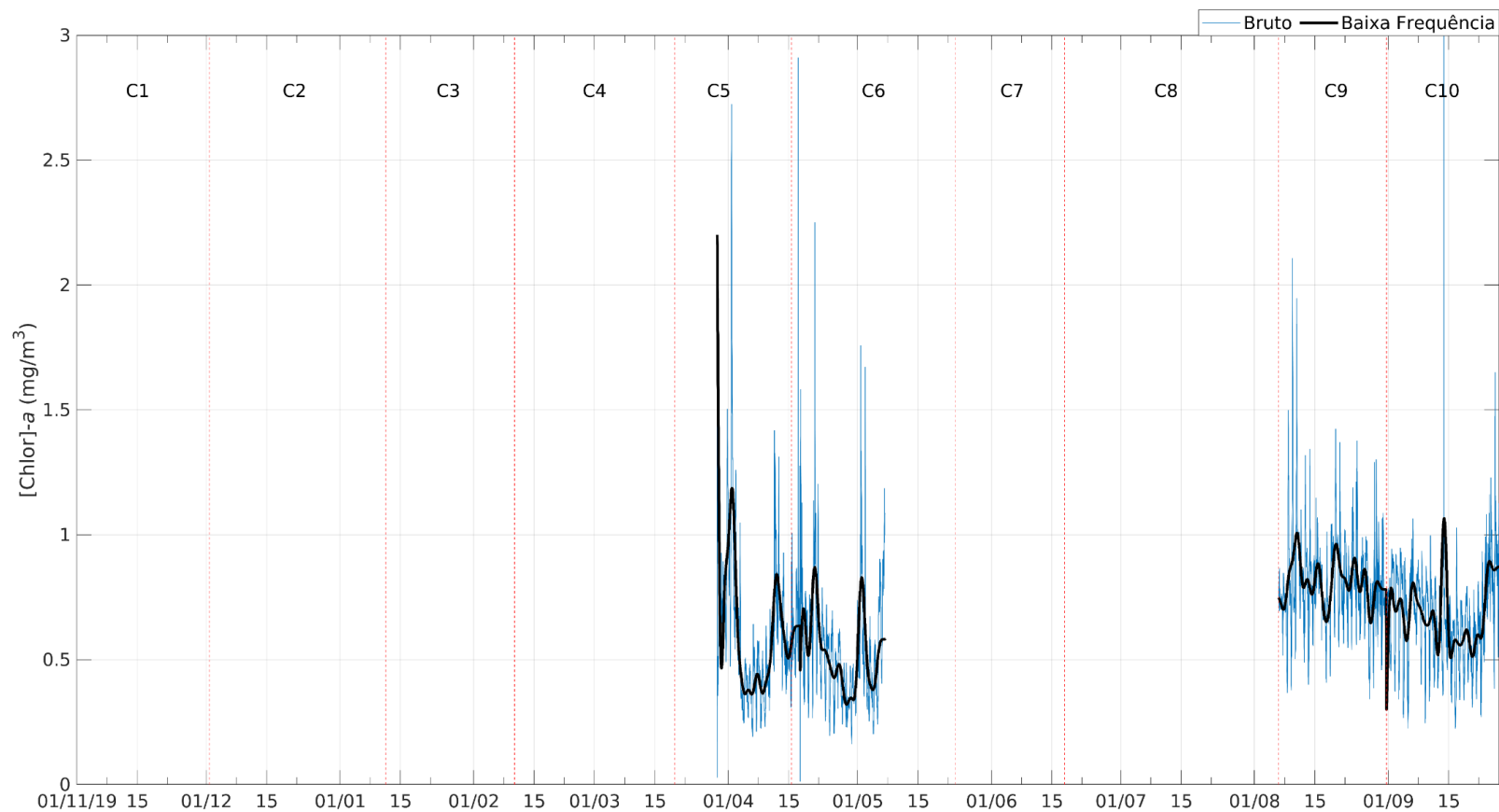


Figura 28: Distribuição temporal de turbidez à superfície no fundeio F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

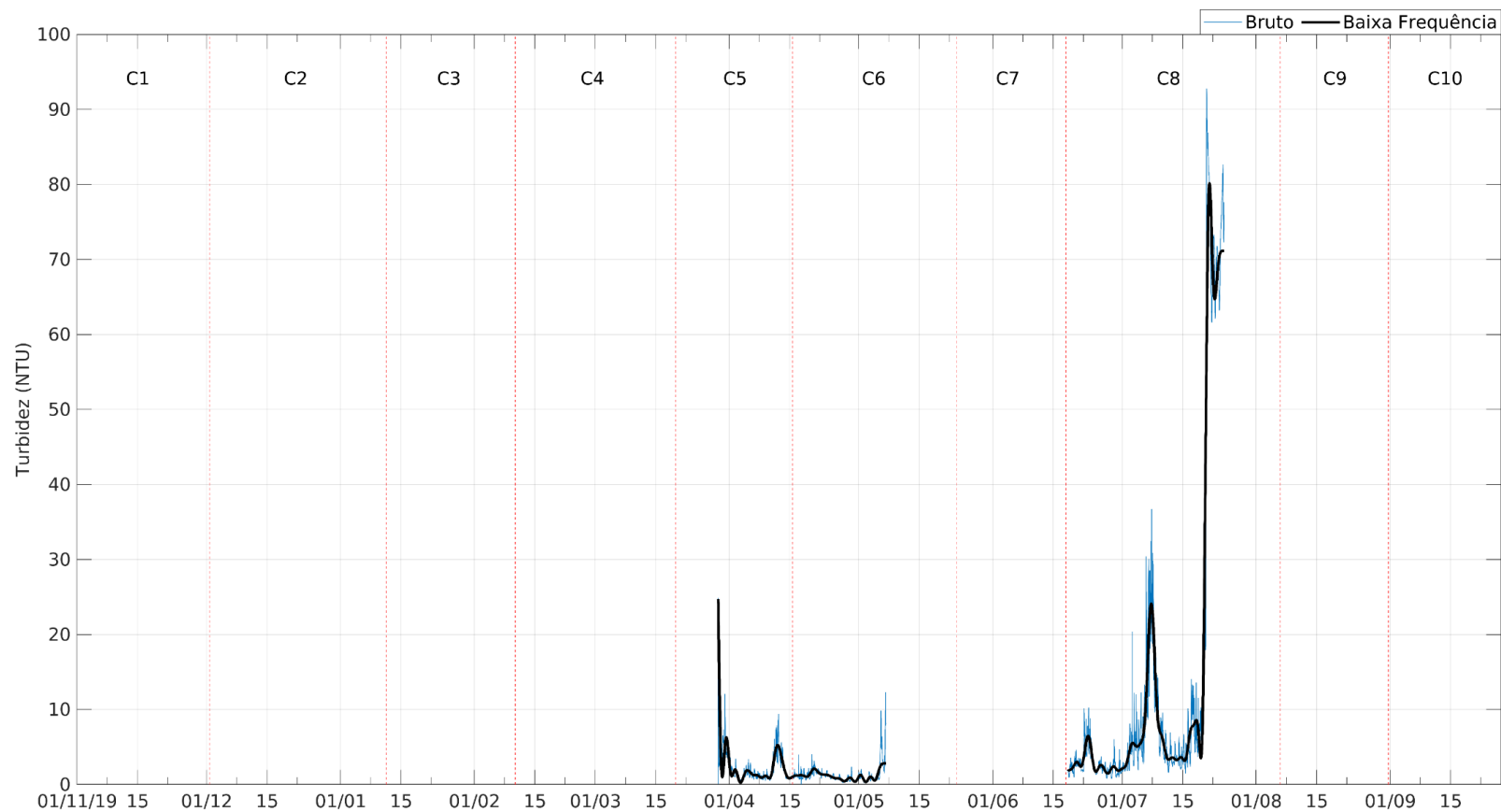


Figura 29: Distribuição temporal da concentração de clorofila-a junto ao fundo no fundeiro F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

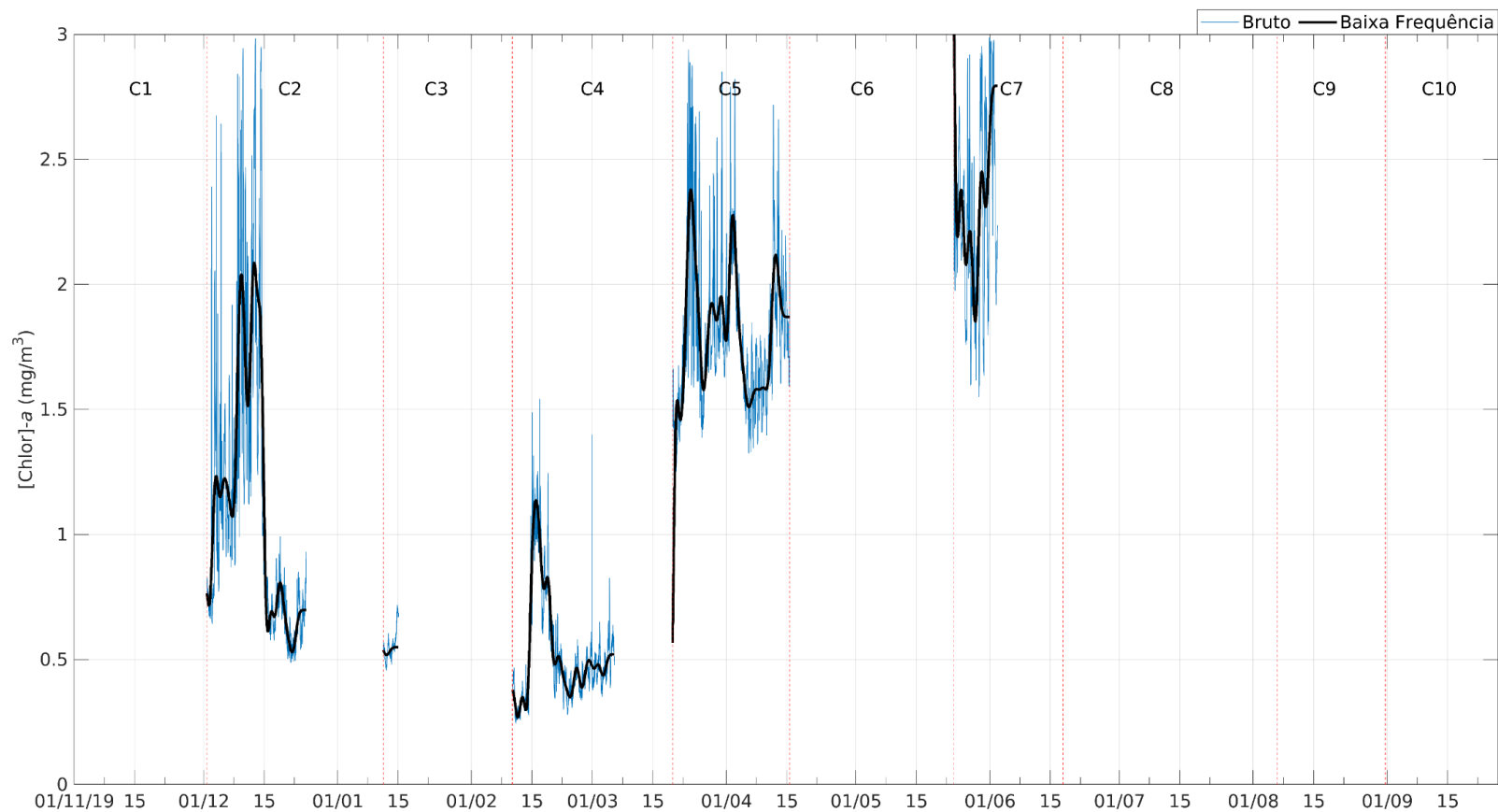


Figura 30: Distribuição temporal de turbidez junto ao fundo no fundeiro F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

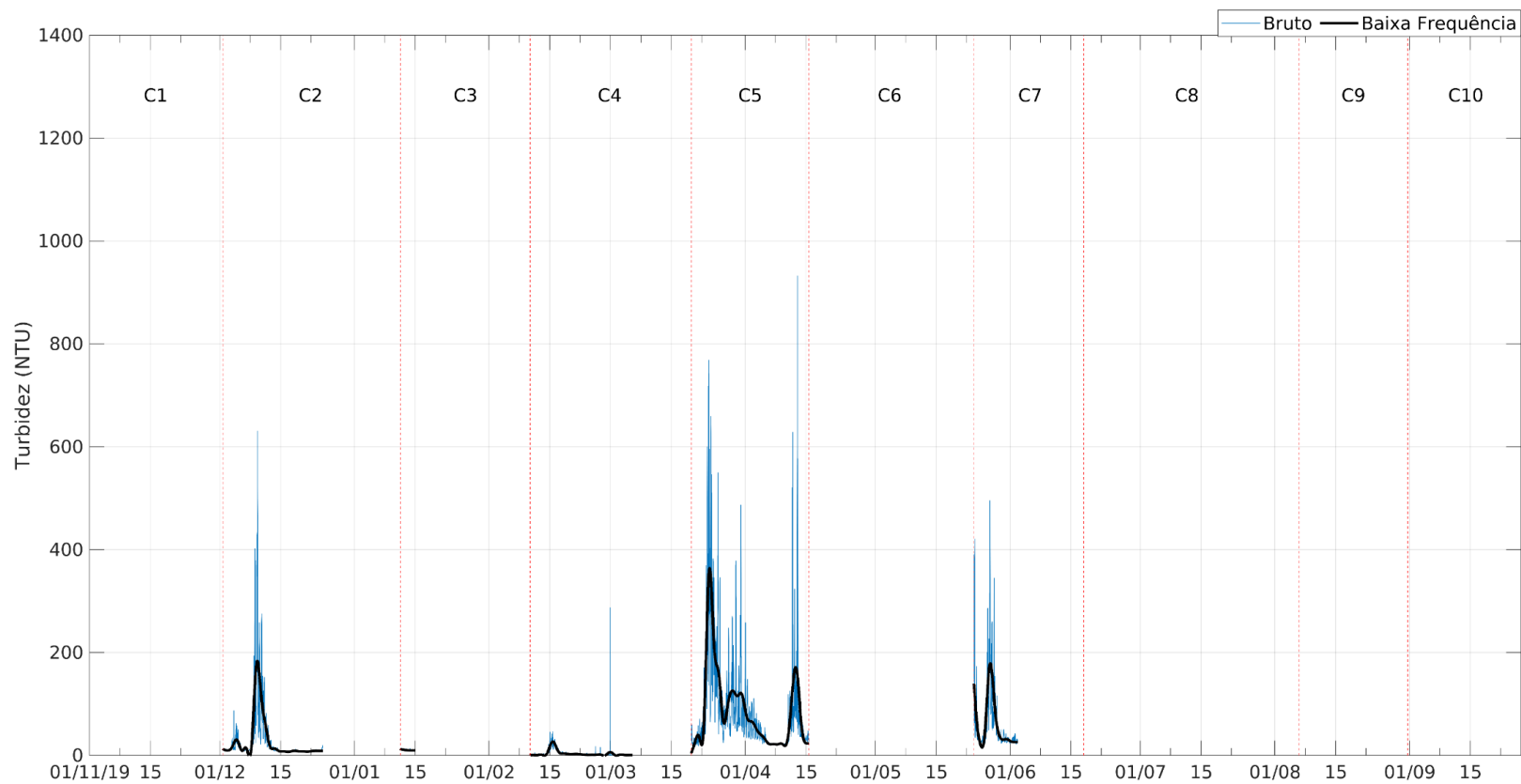


Figura 31: Distribuição temporal de salinidade junto ao fundo no fundeio F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.

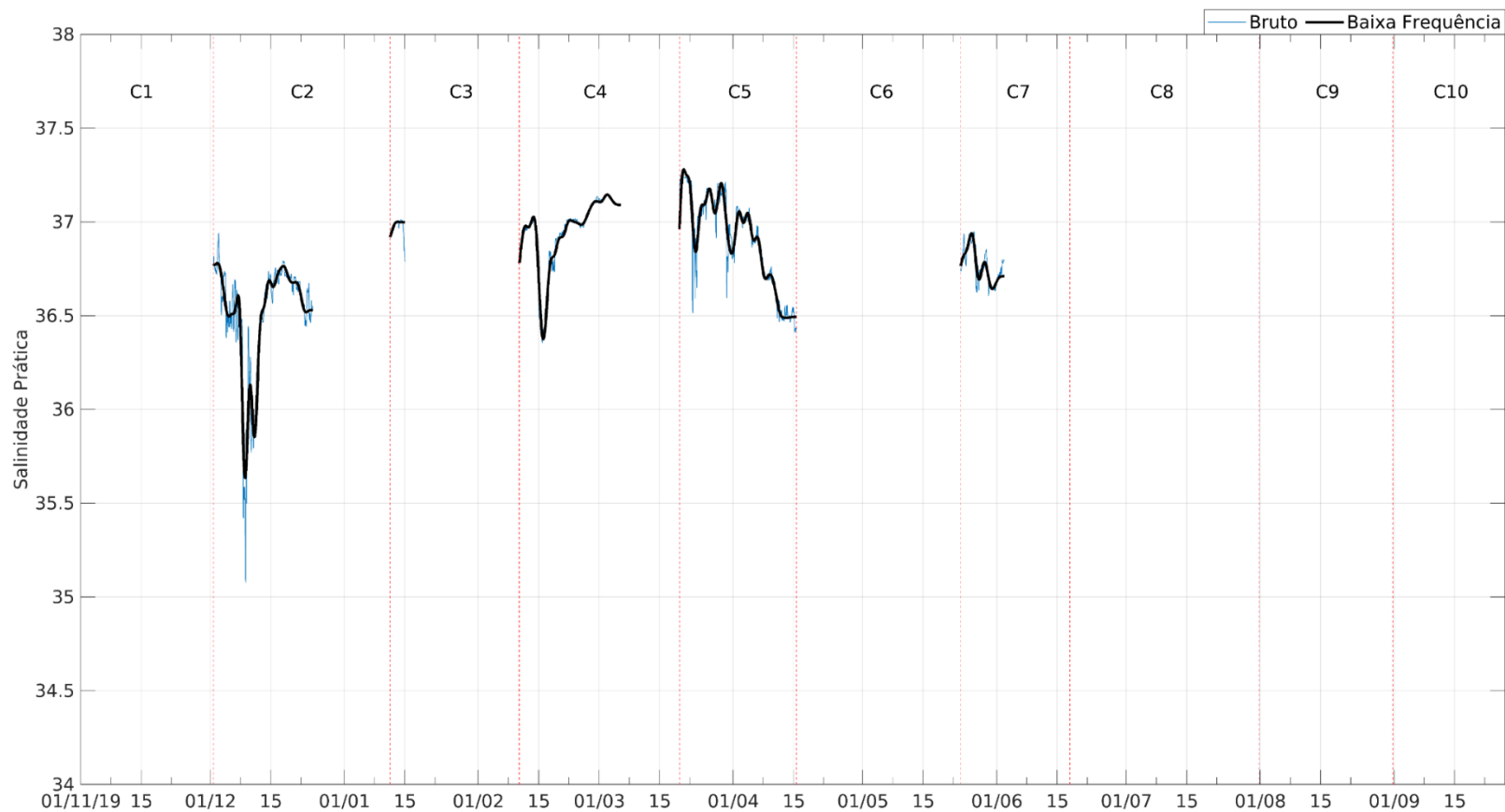
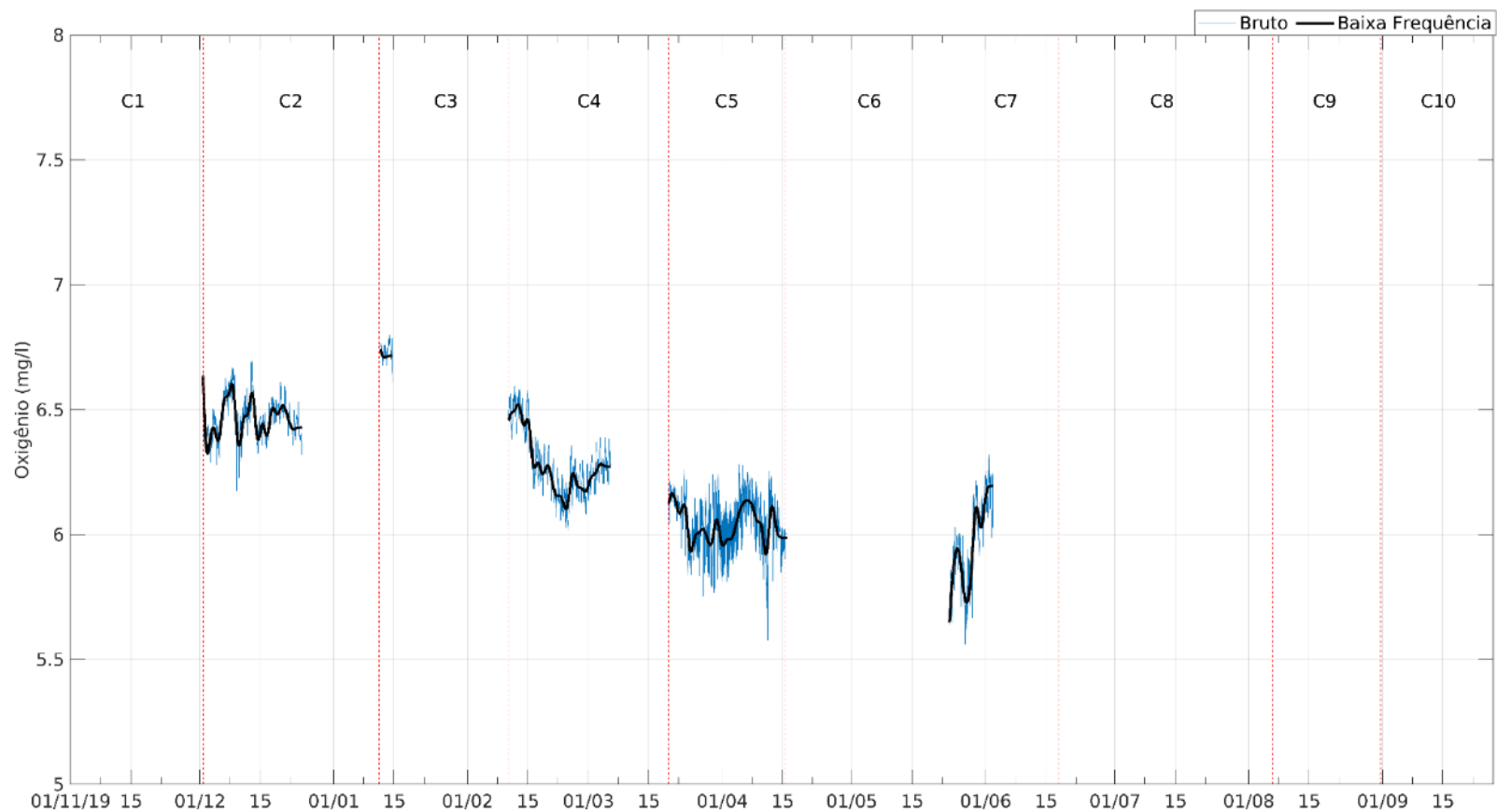


Figura 32: Distribuição temporal da concentração de oxigênio dissolvido junto ao fundo no fundeio F4 no período de novembro/2018 a setembro/2019.



APÊNDICE II

Figura 33: Distribuição de alturas significativas de onda (Hs) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para os meses de novembro/2018 a setembro/2019. As cores representam as faixas de variação de valores de Hs. Os círculos estão espaçados a cada 10%.

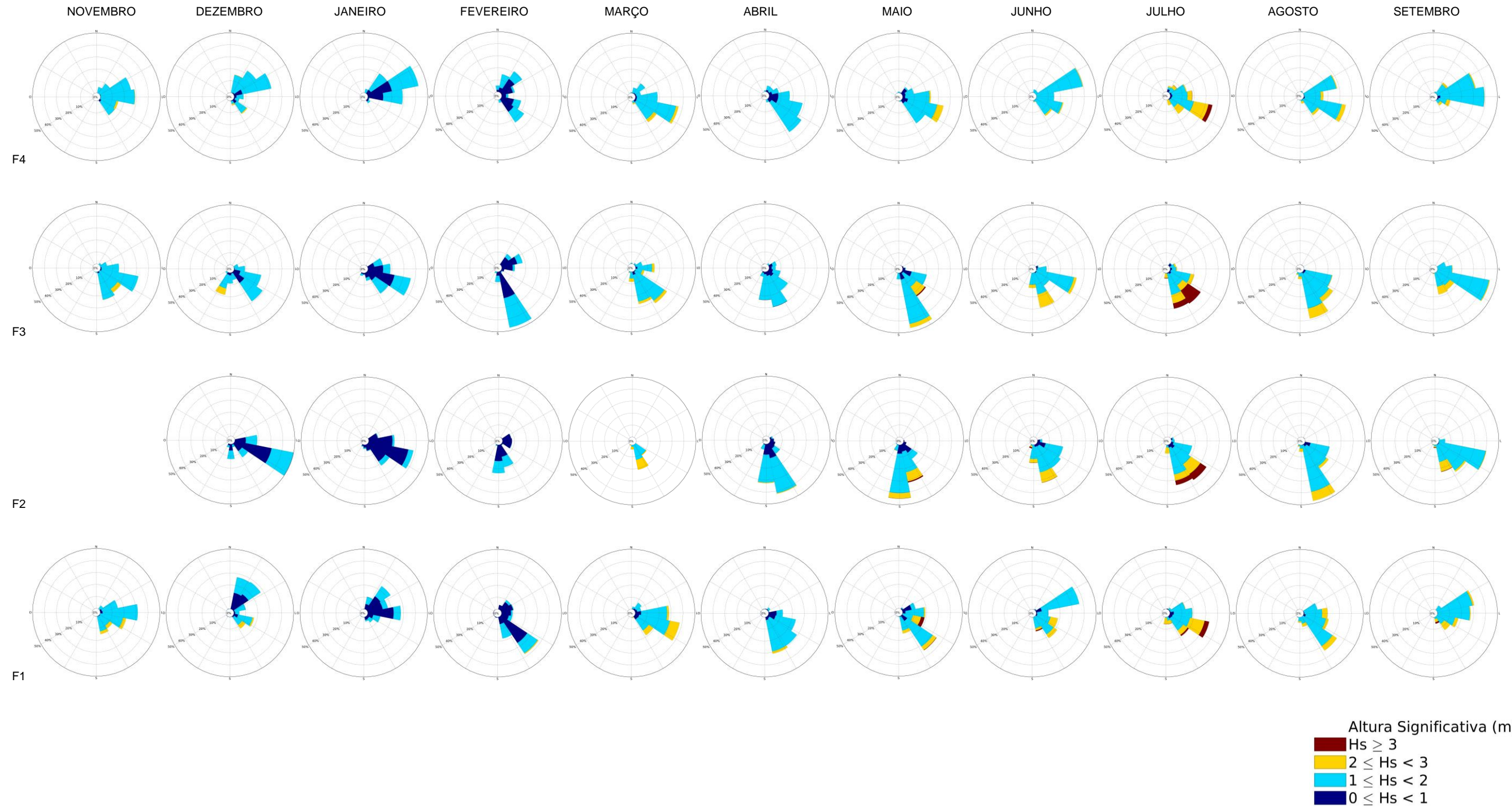


Figura 34: Distribuição de período de pico de onda (Hs) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para os meses de novembro/2018 a setembro/2019. As cores representam as faixas de variação de valores de Tp. Os círculos estão espaçados a cada 10%.

