

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

RELATÓRIO SEMESTRAL – SEÇÃO 3:

Anexo 3 – Marinho Modelagem

RT-07A RRDM/JUN19

Coordenação Geral

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Junho de 2019

COORDENAÇÕES

COORDENAÇÕES POR ANEXO

Anexo 3

Fabian Sá (UFES)

Subprojeto: Modelagem

Renato David Ghisolfi (UFES)

SUMÁRIO

1	SUBPROJETO MODELAGEM NUMÉRICA	23
1.1	RESULTADOS PRETÉRITOS	23
1.2	DESCRIÇÃO GERAL	29
1.3	SENSORIAMENTO REMOTO	35
1.3.1	ANÁLISE E SELEÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	35
1.3.2	CENÁRIOS DE ESTADO DE MAR	38
1.3.3	ANÁLISE CONJUNTA	54
1.4	PERFILAGEM	60
1.4.1	CAMPANHA SEMESTRAL	60
1.4.2	CAMPANHA MENSAL NOVEMBRO	73
1.4.3	CAMPANHA MENSAL DEZEMBRO	79
1.4.4	CAMPANHA TRIMESTRAL	83
1.4.5	CAMPANHA MENSAL FEVEREIRO	94
1.5	FUNDEIOS	101
1.5.1	FUNDEIO 1	102
1.5.2	FUNDEIO 2	104
1.5.3	FUNDEIO 3	105
1.5.4	FUNDEIO 4	107
1.5.5	COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS FUNDEIOS	108
1.5.6	ONDAS	109
1.5.7	VARIABILIDADE DAS CORRENTES E O VENTO LOCAL	114
1.6	MODELAGEM NUMÉRICA	120
1.6.1	INTRODUÇÃO	120
1.6.2	MODELO HIDRODINÂMICO	121
1.7	DISCUSSÃO/INTEGRAÇÃO.....	150

1.7.1	SÍNTESE DOS RESULTADOS	158
1.7.2	PERGUNTAS EM ABERTO E PERSPECTIVAS FUTURAS	159
1.8	REFERÊNCIAS	162

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Médias mensais de vazão medidas na Estação de Colatina - ES. A faixa verde identifica a variabilidade de valores associada à média climatológica entre os anos 2008-2016 (linha contínua). Os círculos vermelhos identificam as médias mensais para os meses de 2015 e os verdes para os meses do ano de 2016..... 23
- Figura 2: Média diária da vazão do Rio Doce ao longo dos anos de 2015 e 2016 medidos na estação de Colatina - ES. A ausência de medidas no período de 03 de outubro a 07 de dezembro de 2016 foi preenchida com uma média dos anos de 2009 a 2016. As setas indicam as datas de realização dos campos *in situ* realizados no período entre novembro de 2015 a dezembro de 2016. 24
- Figura 3: Série temporal da componente paralela (superior) e perpendicular (inferior) da tensão de cisalhamento do vento estimada para o vento extraído do banco de dados do CFSR/NCEP na posição -39,65 e -19,66 para os anos de 2015 e 2016. Em vermelho/azul estão mostradas as componentes NE/SE (superior) e SE/NO (inferior) decompostas em referência ao ângulo de 42° com o N geográfico. Para viabilizar a apresentação gráfica, os valores representam médias de 5 dias. A componente NE do vento paralelo à costa tem em média 7,0 m/s, enquanto que a componente SE do vento perpendicular à costa tem média em torno de 4,5 m/s..... 25
- Figura 4: Imagens de cor verdadeira obtidas pelo sensor VIIRS/Suomi NPP nos dias 29 de novembro de 2015 (primeiro cruzeiro - esquerda) e 02 de dezembro de 2015 (segundo cruzeiro - direita). Os círculos brancos identificam as estações de coletas realizadas durante as campanhas a bordo do NOc. Vital de Oliveira. 26
- Figura 5: Distribuição vertical da Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (µg/l) e Turbidez (NTU) durante a campanha realizada pela CP+ na foz do Rio Doce em fevereiro de 2016. Os perfis verticais das estações amostrais estão apresentados na direção de sul para norte ao longo do trajeto indicado no mapa. 27
- Figura 6: Imagem da Temperatura Superficial do Mar (TSM) obtida pelo sensor Aqua/MODIS no dia 02 de fevereiro de 2016. Os círculos em branco mostram as estações de coleta realizadas na primeira campanha a bordo do Navio Hidrográfico Soloncy Moura. 28
- Figura 7: Distribuição vertical da Temperatura Potencial (°C) ao longo da plataforma continental entre a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APA Costa das Algas) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PARNAMAR dos Abrolhos) na campanha realizada em fevereiro de 2016 a bordo do Navio de pesquisa Soloncy Moura. Os perfis verticais das estações amostrais estão apresentados na direção de sul para norte ao longo do trajeto indicado no mapa. 28
- Figura 8: Médias mensais das componentes do balanço do fluxo de calor na interface oceano-atmosfera estimadas a partir dados de reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP). A linha

pontilhada representa o fluxo líquido de calor. Quando o oceano perde calor, o fluxo líquido de calor é negativo.....	29
Figura 9: Médias mensais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) estimadas via sensoriamento remoto (Aqua/MODIS) para o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2019.	30
Figura 10: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de outubro de 2018.	30
Figura 11: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de novembro de 2018.	31
Figura 12: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de dezembro de 2018.	31
Figura 13: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de janeiro de 2019.....	31
Figura 14: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de fevereiro de 2019.	32
Figura 15: Série temporal de ventos (média de 6 em 6h) medidos na estação automática RDO-16 (Linhares - ES) entre os meses de outubro de 2018 e fevereiro de 2019. A linha vermelha indica o momento (14 de dezembro de 2018) em que se observa a mudança no padrão do regime de ventos, ou seja, a predominância dos ventos de nordeste.....	32
Figura 16: Precipitação acumulada (em mm) de 30 dias entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019..	33
Figura 17: Média mensal da vazão do Rio Doce nos períodos de coleta (em vermelho) e a série climatológica da vazão do Rio Doce entre 1990 e 2017. O intervalo em preto delimita a variabilidade observada o período climatológico.....	33
Figura 18: Vazão média do Rio Doce, de 6 em 6 horas, estimada para a foz a partir de dados medidos na estação de Colatina-ES.....	34
Figura 19: Painel superior: Série temporal da altura significativa da onda. Painel central: Série temporal da direção de pico. Painel inferior: Série temporal do período de pico das ondas.....	38
Figura 20: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) em diversas datas classificados como características do Cenário I. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas finas verdes (nas imagens à esquerda) e azul (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas grossas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.	40
Figura 21: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS em diversas datas classificados como características do Cenário II. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e	

azuis (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros. 46

Figura 22: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS em diversas datas classificados como características do Cenário III. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros. 48

Figura 23: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS em diversas datas classificados como características do Cenário IV. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros. 50

Figura 24: Imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) do dia 2 de agosto de 2013 obtidas pelo sensor MODIS como exemplificação em que o aumento da reflectância do verde não esteve associado a um aumento proporcional de turbidez. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens à direita) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros. 55

Figura 25: Imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância do comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) do dia 6 de janeiro de 2016 obtidas pelo sensor MODIS como exemplificação em que o aumento da reflectância do verde não esteve associado a um aumento proporcional de turbidez. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens à direita) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros. 56

Figura 26: Imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) do dia 6 de janeiro de 2016 obtidas pelo sensor MODIS como exemplificação do comportamento de filamentos de água originados na foz do Doce com deslocamento para sul e sudeste entrando no

Embaçamento de Tubarão. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens à direita) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros. As isolinhas verdes e azuis delimitam o valor de turbidez 2 NTU. As linhas pretas cheias marcam as isóbatas de 25 e 50 metros. 58

Figura 27: Segunda componente principal obtida por análise de funções ortogonais empíricas, responsável por 13,8% da variabilidade dos dados. Painel superior: Distribuição espacial da segunda componente principal. A isolinha azul representa o valor zero no campo espacial, as isóbatas são de 80, 200, 1000 e 2000 m e DR é a localização da foz do Rio Doce. Painel inferior: Distribuição temporal da segunda componente principal entre os anos de 2003 a 2013. Fonte: Fernandes (2015). 59

Figura 28: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o primeiro cruzeiro da campanha semestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 21 de outubro e 03 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m^3) dos pontos amostrados durante o primeiro cruzeiro da campanha semestral. 61

Figura 29: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o segundo cruzeiro da campanha semestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 21 de outubro e 03 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m^3) dos pontos amostrados durante o segundo cruzeiro da campanha semestral. 62

Figura 30: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a (C) obtidas no dia 23 de outubro de 2018 pelo sensor Aqua/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram

as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco nas figuras são referentes à presença de nuvens. 63

Figura 31: : Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o terceiro cruzeiro da campanha semestral (Foz do Rio Doce). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 04 e 16 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m^3) dos pontos amostrados durante o terceiro cruzeiro da campanha semestral..... 64

Figura 32: Painel esquerdo: mapa com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o terceiro cruzeiro da campanha semestral (Foz do Rio Doce). Painel direito: distribuição vertical da Turbidez (NTU) nas estações amostrais realizadas na região da Foz do Rio Doce..... 65

Figura 33: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o quarto cruzeiro da campanha semestral (Foz do Rio Doce). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 04 e 16 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m^3) dos pontos amostrados durante o quarto cruzeiro da campanha semestral. 66

Figura 34: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) obtidas no dia 14 de novembro de 2018 pelo sensor Terra/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco nas figuras são referentes à presença de nuvens. 67

Figura 35: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante

o quinto cruzeiro da campanha semestral (PARNAMAR dos Abrolhos). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 04 e 12 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o quinto cruzeiro da campanha semestral. 68

Figura 36: Imagem da cor verdadeira obtida no dia 06 de dezembro pelo sensor Aqua/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco nas figuras são referentes à presença de nuvens. 69

Figura 37: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o sexto cruzeiro da campanha semestral (Região Norte). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 09 e 16 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o sexto cruzeiro da campanha semestral. 70

Figura 38: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a (C) obtidas no dia 14 de dezembro de 2018 pelo sensor Terra/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 71

Figura 39: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o sétimo cruzeiro da campanha semestral (Região Sul). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 13 e 18 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao

momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o sétimo cruzeiro da campanha semestral. 72

Figura 40: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a (C) obtidas no dia 16 de dezembro de 2018 pelo sensor Aqua/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 73

Figura 41: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de novembro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias entre os dias 25 de novembro e 07 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de novembro. 74

Figura 42: Imagem da cor verdadeira (A) e da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) obtidas no dia 28 de novembro de 2018 pelos sensores VIIRS/SUOMI NPP e Terra/MODIS, respectivamente. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de novembro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. A região em branco das figuras é referente a presença de nuvens. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 76

Figura 43: Imagem da cor verdadeira (A) e da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) obtidas no dia 30 de novembro de 2018 pelos sensores Terra/MODIS e Aqua/MODIS, respectivamente. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de novembro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 76

Figura 44: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização da estação onde foi realizado o levantamento de dados com o CTD no ponto extra

durante a campanha mensal de novembro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 25 de novembro e 07 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de novembro..... 77

Figura 45: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do Ponto Extra (SDPf 00) da campanha mensal de novembro..... 78

Figura 46: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de Dezembro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 15 e 22 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de dezembro..... 79

Figura 47: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do ponto SDS 20 da Campanha Mensal de Dezembro. 81

Figura 48: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do ponto SDN 30 da Campanha Mensal de Dezembro. 82

Figura 49: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a obtidas no dia 19 de dezembro de 2018 pelo sensor Terra/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de dezembro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens..... 83

Figura 50: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor

com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral (Foz do Rio Doce). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 10 e 20 de janeiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral..... 84

Figura 51: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do ponto SDS 30 do primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral..... 85

Figura 52: Distribuição dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do ponto SDN 13 do primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral..... 86

Figura 53: Imagem da cor verdadeira obtida pelo sensor VIIRS/Suomi NPP (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 15 de janeiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha trimestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 87

Figura 54: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o segundo cruzeiro da Campanha Trimestral (Região Norte). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 19 e 27 de janeiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o segundo cruzeiro da campanha trimestral. 88

Figura 55: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração da Clorofila-a (C) obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 23 de janeiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha trimestral e os círculos em verde mostram

as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 89

Figura 56: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o terceiro cruzeiro da Campanha Trimestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 10 e 21 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o terceiro cruzeiro da campanha trimestral. 90

Figura 57: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o quarto cruzeiro da Campanha Trimestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 10 e 21 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o quarto cruzeiro da campanha trimestral. 92

Figura 58: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o quinto cruzeiro da Campanha Trimestral (Região Sul). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 20 e 27 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o quinto cruzeiro da campanha trimestral. 93

Figura 59: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 24 de fevereiro de 2019. Os

círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha trimestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 94

Figura 60: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de fevereiro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 17 e 26 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com o nome da estação amostral são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de fevereiro. 95

Figura 61: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) dos pontos SDS20 da campanha mensal de fevereiro. 96

Figura 62: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do ponto SDN20 da campanha mensal de fevereiro. 97

Figura 63: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do Ponto Extra (SDPf 01) da campanha mensal de fevereiro. 98

Figura 64: Fotografia tirada pela coordenadora de embarque próximo ao Ponto Extra (SDPd 01) da campanha mensal de fevereiro no momento de coleta de dados para ilustrar a frente e a espuma na interface entre a água mais turva e a mais limpa. 98

Figura 65: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD no ponto extra durante a campanha mensal de fevereiro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 17 e 26 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com o nome da estação amostral são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$),

Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) do ponto extra amostrado durante a campanha mensal de fevereiro. 100

Figura 66: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração da Clorofila-a obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 22 de fevereiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de fevereiro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens. 101

Figura 67: Fundeio 1 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. A barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência. 103

Figura 68: Fundeio 2 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. A barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência. 104

Figura 69: Fundeio 3 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. A barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência. 106

Figura 70: Fundeio 4 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. A barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência. 107

Figura 71: Variação da temperatura junto ao fundo nos Fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de Novembro de 2018 a Fevereiro de 2019. 109

Figura 72: Variação da salinidade junto ao fundo nos Fundeios F1 (azul), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de Dezembro de 2018 a Janeiro de 2019.....	109
Figura 73: Distribuição das Alturas Significativas de onda em relação as Direções de Pico preferenciais nos quatro fundeios analisados.....	110
Figura 74: Distribuição dos Períodos de Pico de onda em relação as Direções de Pico preferenciais nos quatro fundeios analisados.	111
Figura 75: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F1.	112
Figura 76: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F2.	112
Figura 77: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F3.	113
Figura 78: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F4.	113
Figura 79: Espalhamento direcional das correntes medidas ao longo do período amostral (Painel à esquerda). As setas vermelhas correspondem aos valores médios de velocidades das correntes medidas próximo à superfície e, as cruces amarelas representam o eixo preferencial das correntes. No painel à direita estão apresentadas as variações temporais de intensidade dos ventos e das correntes, em superfície, medidas nos quatro fundeios.	115
Figura 80: Espalhamento direcional das correntes medidas ao longo do período amostral (Painel à esquerda). As setas vermelhas correspondem aos valores médios de velocidades das correntes medidas próximo ao fundo e, as cruces amarelas representam o eixo preferencial das correntes. No painel à direita estão apresentadas as variações temporais de intensidade dos ventos e das correntes, no fundo, medidas nos quatro fundeios.	115
Figura 81: Espectro das componentes paralelas e perpendiculares das correntes na superfície e no fundo nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).....	116
Figura 82: Espectro da componente paralela de velocidade do vento	118
Figura 83: Coerência espectral entre a componente paralela do vento e as correntes paralelas nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).....	118
Figura 84: Correlação entre o vento paralelo e a corrente paralela e perpendicular à costa na superfície (linha contínua) e no fundo (linha tracejada) na região da Costa das Algas (F1).	119
Figura 85: Correlação entre o vento paralelo e a corrente paralela e perpendicular à costa na superfície (linha contínua) e no fundo (linha tracejada) em Degredo (F4).	120

- Figura 86: 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, localizados em pontos em que ocorreram coleta de dados *in situ* nas primeiras campanhas de monitoramento ambiental. O quadrado verde destaca a localização do marégrafo de Barra de Riacho, enquanto os quadrados rosa e vermelho destacam o ponto de localização onde foram extraídos dados de vento do banco de dados do CFSR/NCEP e de temperatura da Boia do Projeto PIRATA 122
- Figura 87: Painel superior: dados climatológicos mensais (de 1990 a 2016) de vazão do Rio Doce combinados com médias mensais de 2015 a 2016, obtidos na estação da cidade de Colatina. As barras verticais representam o erro padrão. Painel central: medições diárias de vazão de novembro de 2015 a abril de 2016. As setas pretas marcam a data quando ocorreram três cruzeiros oceanográficos. Painel inferior: Seis meses de componente de tensão do vento CFSR/NCEP N-S (de novembro de 2015 a abril de 2016) obtido no quadrado rosa marcado na Figura 28. 124
- Figura 88: 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. 124
- Figura 89: 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. 126
- Figura 90: 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. 127
- Figura 91: Temperatura média simulada para os períodos de verão e inverno nos anos de 2015 e 2016. Na parte superior da figura são apresentados mapas de superfície referentes ao nível sigma 40 (superfície). Na parte inferior da figura são apresentados mapas referentes ao nível sigma 1 (fundo). Os vetores representam a circulação média para os mesmos períodos nos respectivos níveis. 127
- Figura 92: Salinidade média simulada para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015 e 2016, para o primeiro nível sigma (superfície) e nível sigma 40 (fundo). Os vetores representam a circulação média para os mesmos períodos nos respectivos níveis. 129
- Figura 93: Seções verticais médias de temperatura (A, B, C, D) e salinidade (E, F, G, H) simulados com o modelo numérico para os períodos de Verão e Inverno dos anos de 2015 e 2016, para uma seção transversal à costa localizada em frente à desembocadura do Rio Doce. 130
- Figura 94: Seções verticais médias de temperatura (A, B, C, D) e salinidade (E, F, G, H) simulados com o modelo numérico para os períodos de Verão e Inverno dos anos de 2015 e 2016, para uma seção transversal à costa localizada ao sul da desembocadura do Rio Doce, passando pela APA Costa das Algas. 130

Figura 95: Espectros de potência das correntes ao longo da costa (alongshore) simuladas para o período de verão de 2016, na Costa das Algas (sul da foz) e SDN (norte da foz), próximo à isóbata de 25m: à esquerda para as correntes em superfície, à direita para as de fundo.	131
Figura 96: Composições de dados de sensoriamento remoto de reflectância da cor do oceano na banda de 555 nm (parte superior) e os resultados da modelagem numérica de transporte de sedimentos em superfície (parte inferior) para os diferentes cenários apresentados na Tabela 6-12. A isolinha vermelha nos mapas dos painéis inferiores delimita a concentração de 0,02kg/m ²	133
Figura 97: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce após seis meses de simulação (novembro de 2015 até abril de 2016).	134
Figura 98: Mapa mostrando o principal depósito de lama (>50%) e medidas de densidade úmida. A linha azul representa o limite para os sedimentos compostos de mais de 25% de carbonato.	134
Figura 99: Porcentagem de tempo de ocorrência de sedimento em suspensão (painel superior) e a concentração de sedimento encontrada nos pontos limites na plataforma continental (painel inferior). Os limites definidos no painel superior foram definidos aleatoriamente.....	135
Figura 100: Área de estudo da modelagem idealizada na costa do Espírito Santo. Os polígonos em vermelho representam as áreas de proteção ambiental, enquanto o quadrado verde mostra a localização do marégrafo da Barra do Riacho e o ponto amarelo (P1) a foz do rio onde foram feitas as análises de nível de água, profundidade de água doce, velocidade zonal e salinidade. Os transectos T1 e T2 representam a localização da análise do perfil vertical de velocidade, temperatura, frequência de Brunt-Väisälä e transporte de água doce.....	136
Figura 101: Rosa-dos-ventos para a média anual (a) e por estação do ano entre 1990 e 2016 para a região próximo à foz do Rio Doce (b, c, d e e).....	137
Figura 102: Seções verticais de temperatura potencial para os transectos T1 (esquerda) e T2 (direita). Os vetores sobrepostos representam a velocidade zonal nas respectivas seções.	139
Figura 103: Distribuição espacial da profundidade de água doce (m) após 5 dias de simulação em cenários de ventos NE, E, SE e N durante alta vazão (cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente – Quadro 6). O polígono em vermelho representa a APA Costa das Algas. A linha preta contínua delimita a quebra de plataforma em 200 m	139
Figura 104: 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 o transecto T1 durante alta vazão após o 5° dia de simulação.	140
Figura 105: 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 o transecto T2 durante alta vazão após o 5° dia de simulação.	141
Figura 106: Transporte (m ³ /s) e volume (m ³) de água doce no transecto T1 (19,74°S) e transecto T2 (19,45°S) para o período de alta vazão ao longo de 5 dias consecutivos de ventos NE, E, SE e N.	142
Figura 107: Séries temporais de nível da água (dados da estação virtual próxima do marégrafo de Barra do Riacho), velocidade zonal, salinidade e profundidade de água doce na foz do Rio Doce (ponto P1) durante os 5 dias de simulação nos cenários de ventos NE, E, SE e N e alta vazão.	143
Figura 108: Distribuição espacial da profundidade de água doce (m) após 5 dias de simulação em cenários de ventos NE, E, SE e N durante baixa vazão (cenários 5, 6, 7 e 8, respectivamente – Quadro 6). O polígono em vermelho representa a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas. A linha preta contínua delimita a quebra de plataforma em 200 m.	144
Figura 109: 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 o transecto T1 durante baixa vazão após o 5° dia de simulação.	145
Figura 110: 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 o transecto T2 durante baixa vazão após o 5° dia de simulação.	145
Figura 111: Transporte (m ³ .s ⁻¹) e volume (m ³) de água doce no transecto T1 (19.74oS) para o período de baixa vazão ao longo de 5 dias consecutivos de ventos NE, E, SE e N.	146
Figura 112: Séries temporais de nível da água (dados da estação virtual próxima do marégrafo de Barra do Riacho), velocidade zonal, salinidade e profundidade de água doce na foz do Rio Doce (ponto P1) durante os 5 dias de simulação nos cenários de ventos NE, E, SE e N e baixa vazão.	146
Figura 113: Domínio de modelagem considerado nas primeiras simulações realizadas (Grade antiga) e o domínio que vem sendo considerado nos últimos cenários na modelagem.	149
Figura 114: Imagem de turbidez (em NTU) calculada para a região adjacente a foz do Rio Doce (painel à esquerda), reflectância no comprimento de onda 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS no dia 05 de janeiro de 2019. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA). As isolinhas verdes (na imagem à esquerda) e azuis (na imagem ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.	151
Figura 115: Relação entre altura significativa de ondas, componente meridional do vento e a turbidez medida no fundo no Fundeio 3 para o período entre 03 e 24 de dezembro de 2018.	153

Figura 116: Série temporal da Turbidez nos fundeios F1 (azul), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) entre os dias 03 de dezembro de 2018 a 11 de janeiro de 2019..... 154

Figura 117: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (contínuo) e turbidez medida na estação automática RDO-16 bóia (tracejado), (b) média de 6 em 6 h dos ventos medidos na estação automática RDO-16, (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, (e) Altura significativa de onda medida no F3 (amarelo) e no F4 (vermelho), no período de 03 a 20 de dezembro de 2018. 155

Figura 118: Série temporal da (a) Massa específica, (b) Turbidez, (c) Salinidade e (d) Temperatura medidas nos fundeios F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 03 a 20 de dezembro de 2018. 155

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Datas e valores de amplitude máxima das marés astronômicas de sizígia e quadratura na estação de Barra do Riacho – ES para o período entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019.	34
Quadro 2: Cenários agrupados por condições meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas durante o período de análise dos dados diários de sensoriamento remoto.	38
Quadro 3: Orientação da costa em relação ao sistema cartesiano em cada fundeio	102
Quadro 4: Dados e forçantes utilizados como condições iniciais e de contorno na modelagem hidrodinâmica.	123
Quadro 5: Cenários, características e datas escolhidos para a validação do modelo de transporte de sedimentos. AV - alta vazão e BV - baixa vazão.	132
Quadro 6: Cenários de simulação quase-idealizada.	137

1 SUBPROJETO MODELAGEM NUMÉRICA

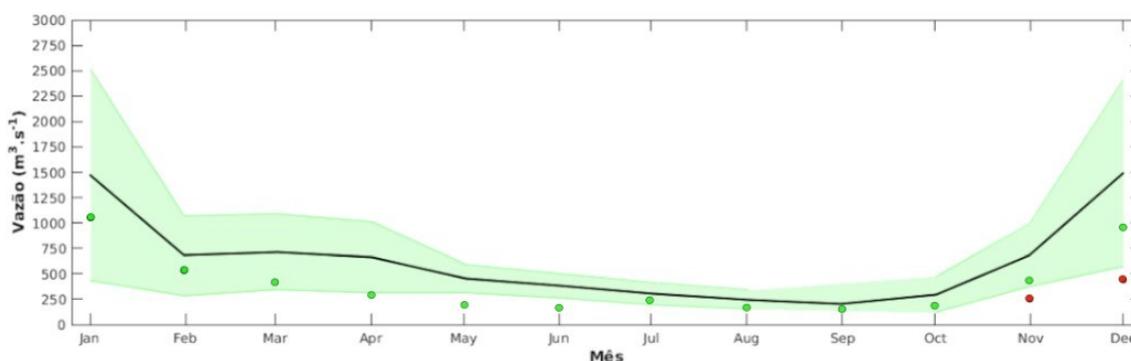
1.1 RESULTADOS PRETÉRITOS

Os principais resultados pretéritos consistem nas análises dos dados físicos coletados em 170 perfisagens de CTD entre novembro de 2015 a dezembro de 2016 na foz do Rio Doce e adjacências. As condições hidrometeorológicas durante as campanhas oceanográficas serão primeiramente apresentadas a seguir a fim de proporcionar o melhor entendimento do comportamento da pluma do Rio Doce.

As coletas foram centradas em períodos de final de primavera ao início do outono que compreendeu a estação úmida para a bacia de drenagem do Rio Doce (novembro a março). Dessa forma, não houve informações da estação seca que se estende de abril a outubro.

Ao longo desses 14 meses de coletas, as médias mensais da vazão do Rio Doce estiveram abaixo da média dos anos 2008 a 2016 (Figura 1), resultado do período de seca que prevaleceu na região. As médias mensais de vazão ficaram abaixo de 500 m³/s na maior parte do período, apresentando somente dois meses com vazões altas (em torno de 1000 m³/s): janeiro e dezembro de 2016.

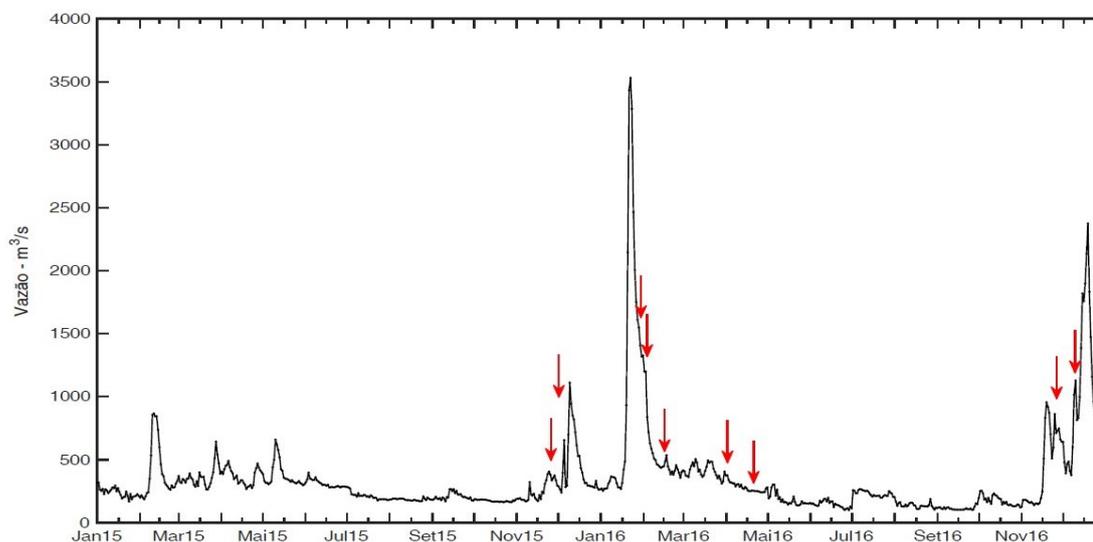
Figura 1: Médias mensais de vazão medidas na Estação de Colatina - ES. A faixa verde identifica a variabilidade de valores associada à média climatológica entre os anos 2008-2016 (linha contínua). Os círculos vermelhos identificam as médias mensais para os meses de 2015 e os verdes para os meses do ano de 2016.



Fonte: autoria própria.

As médias diárias de vazão do período em que houve as coletas ficaram abaixo de 500 m³/s com quatro momentos de picos de vazão: dezembro de 2015, fevereiro, novembro e dezembro de 2016 (Figura 2).

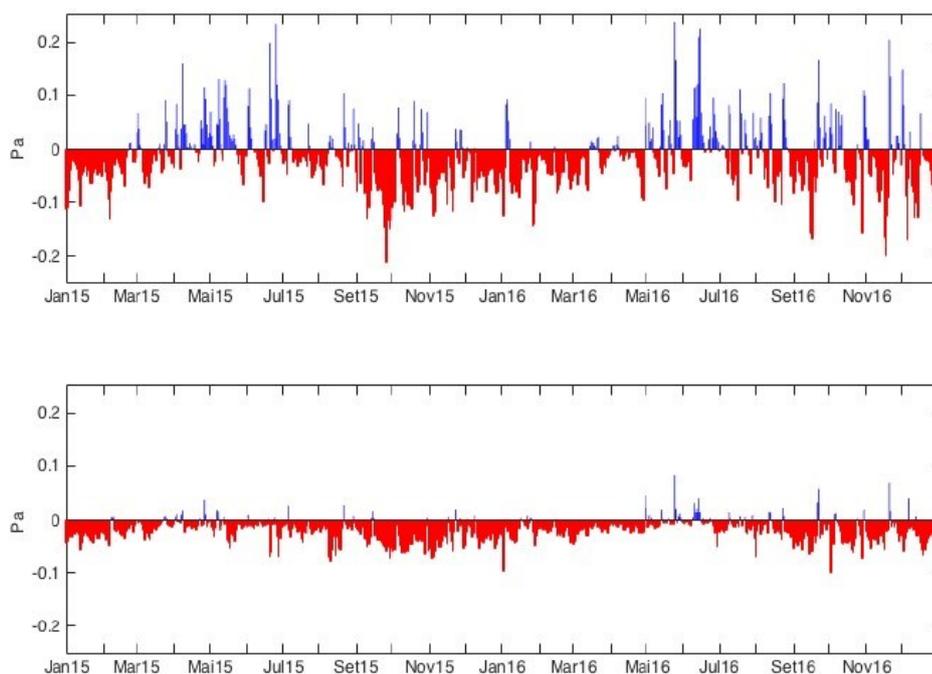
Figura 2: Média diária da vazão do Rio Doce ao longo dos anos de 2015 e 2016 medidos na estação de Colatina - ES. A ausência de medidas no período de 03 de outubro a 07 de dezembro de 2016 foi preenchida com uma média dos anos de 2009 a 2016. As setas indicam as datas de realização dos campos *in situ* realizados no período entre novembro de 2015 a dezembro de 2016.



Fonte: autoria própria.

Desde o final de novembro de 2015, quando houve a chegada da lama de rejeitos à região marinha da costa do Espírito Santo, até a metade de abril de 2016, quando foram realizadas a maior parte das observações *in situ*, a componente da tensão de cisalhamento do vento paralela à costa de maior incidência foi a do quadrante nordeste (valores negativos no painel superior da Figura 3), enquanto que os ventos mais fracos de sudeste predominaram na componente perpendicular à costa (valores negativos no painel inferior da Figura 3). Adicionalmente, a componente da tensão de cisalhamento do vento paralela à costa do quadrante sudoeste (valores positivos no painel superior da Figura 3) foram mais comuns desde o outono até o início da primavera e, apesar de isolados e em pequeno número, provocaram modificações no padrão de dispersão da pluma oriunda da descarga do Rio Doce.

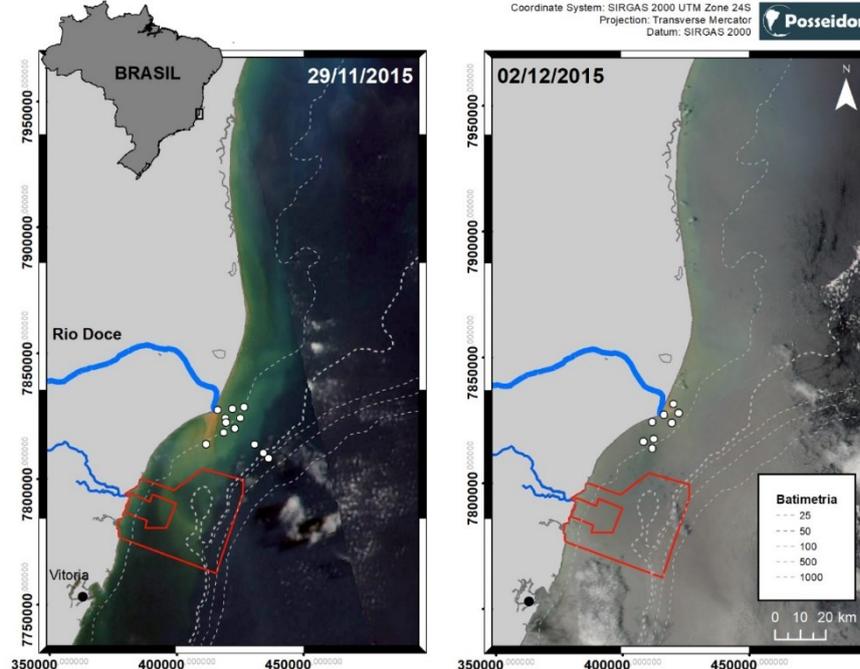
Figura 3: Série temporal da componente paralela (superior) e perpendicular (inferior) da tensão de cisalhamento do vento estimada para o vento extraído do banco de dados do CFSR/NCEP na posição -39,65 e -19,66 para os anos de 2015 e 2016. Em vermelho/azul estão mostradas as componentes NE/SE (superior) e SE/NO (inferior) decompostas em referência ao ângulo de 42° com o N geográfico. Para viabilizar a apresentação gráfica, os valores representam médias de 5 dias. A componente NE do vento paralelo à costa tem em média 7,0 m/s, enquanto que a componente SE do vento perpendicular à costa tem média em torno de 4,5 m/s.



Fonte: autoria própria.

Um exemplo disso foi a inversão no deslocamento da pluma entre a primeira e a segunda pernada de coleta a bordo do NOc. Vital de Oliveira da Marinha do Brasil. As imagens da cor verdadeira, que são composições das cores vermelho, verde e azul, mostraram que na primeira cruzeiro a pluma estava direcionada para sul condicionada por ventos nordeste, enquanto na segunda a sua direção foi nordeste devido à atuação de ventos sul associados à entrada de frente fria (Figura 4).

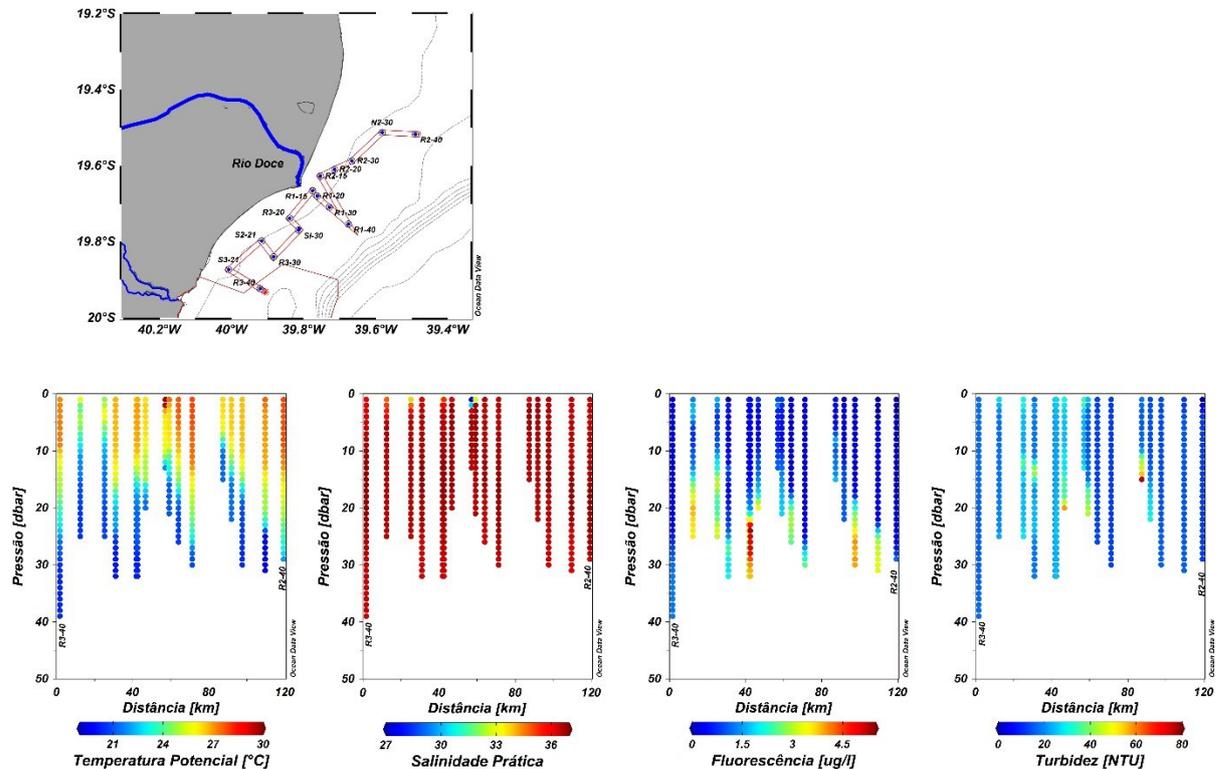
Figura 4: Imagens de cor verdadeira obtidas pelo sensor VIIRS/Suomi NPP nos dias 29 de novembro de 2015 (primeiro cruzeiro - esquerda) e 02 de dezembro de 2015 (segundo cruzeiro - direita). Os círculos brancos identificam as estações de coletas realizadas durante as campanhas a bordo do NOc. Vital de Oliveira.



Fonte: autoria própria.

De uma forma geral, os maiores níveis de turbidez foram encontrados próximo ao fundo, principalmente em frente à desembocadura do rio e ao longo da plataforma continental nas estações localizadas ao sul e na direção nordeste da foz do Rio Doce, como observado na campanha realizada pela empresa privada CP+ em fevereiro de 2016 (Figura 5).

Figura 5: Distribuição vertical da Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (µg/l) e Turbidez (NTU) durante a campanha realizada pela CP+ na foz do Rio Doce em fevereiro de 2016. Os perfis verticais das estações amostrais estão apresentados na direção de sul para norte ao longo do trajeto indicado no mapa.

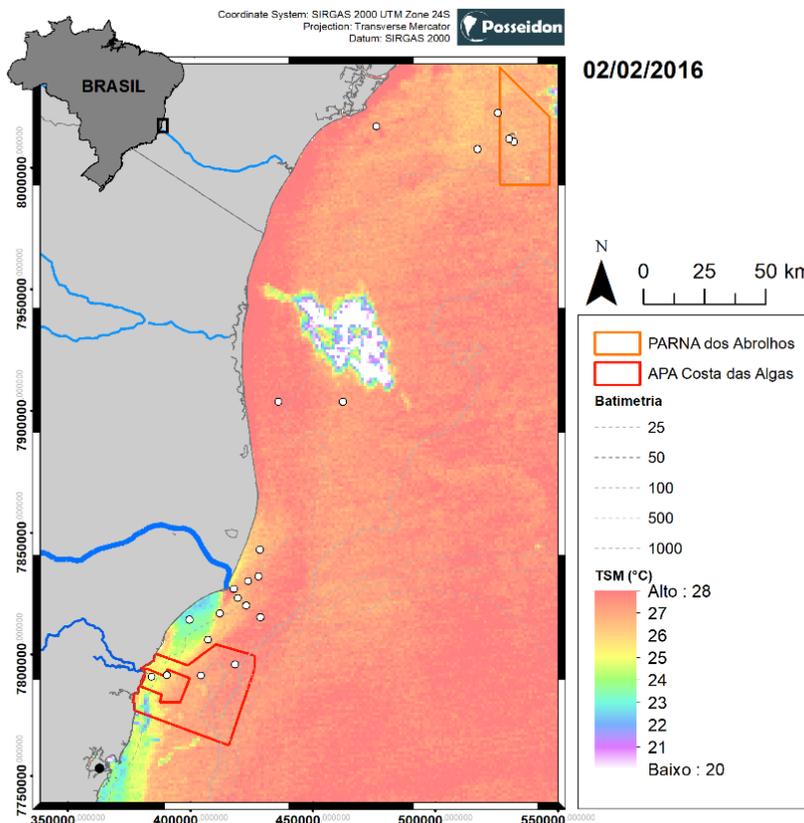


Fonte: autoria própria.

Além disso, os resultados obtidos nas diversas campanhas realizadas *in situ* evidenciaram o processo de ressurgência costeira que se desenvolve na região, como por exemplo a primeira campanha realizada a bordo do Navio de pesquisa Soloncy Moura do Centro de Pesquisa e Conservação da Biodiversidade Marinha do Sudeste e Sul (CEPSUL). A imagem da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do dia 02 de fevereiro 2016 mostrou um gradiente térmico entre as águas quentes (28°C) ao norte e frias (22,5°C) ao sul da foz do Rio Doce (Figura 6).

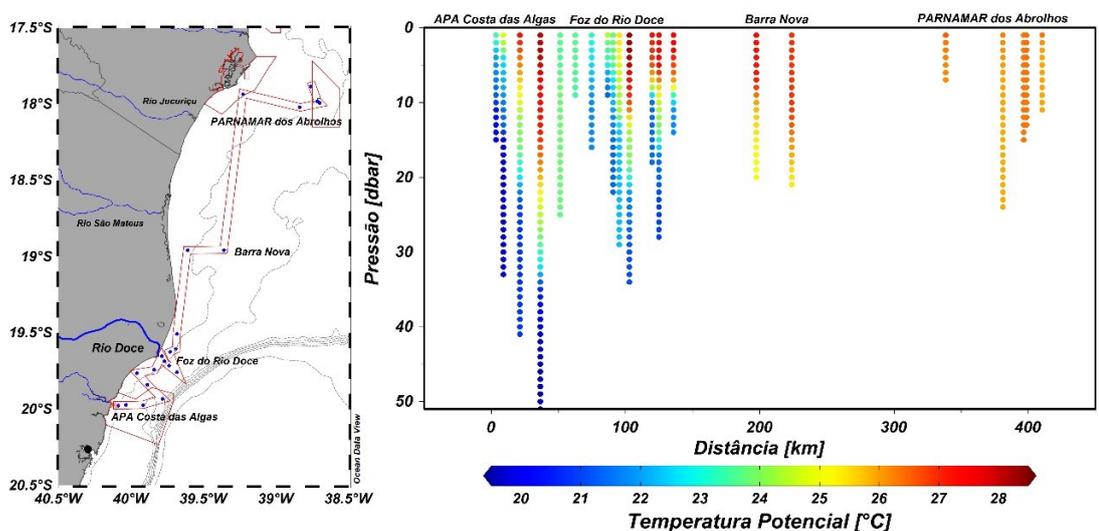
Enquanto que a água fria chegou à superfície ao sul da foz do Rio Doce, principalmente na região da Área de Proteção Ambiental Costa das Algas, na direção norte a presença da água fria ficou restrita à subsuperfície e se estendeu até, aproximadamente Barra Nova. Os pontos amostrados no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos apresentaram a coluna de água sem estratificação térmica (Figura 7).

Figura 6: Imagem da Temperatura Superficial do Mar (TSM) obtida pelo sensor Aqua/MODIS no dia 02 de fevereiro de 2016. Os círculos em branco mostram as estações de coleta realizadas na primeira campanha a bordo do Navio Hidrográfico Soloncy Moura.



Fonte: autoria própria.

Figura 7: Distribuição vertical da Temperatura Potencial (°C) ao longo da plataforma continental entre a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APA Costa das Algas) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PARNAMAR dos Abrolhos) na campanha realizada em fevereiro de 2016 a bordo do Navio de pesquisa Soloncy Moura. Os perfis verticais das estações amostrais estão apresentados na direção de sul para norte ao longo do trajeto indicado no mapa.

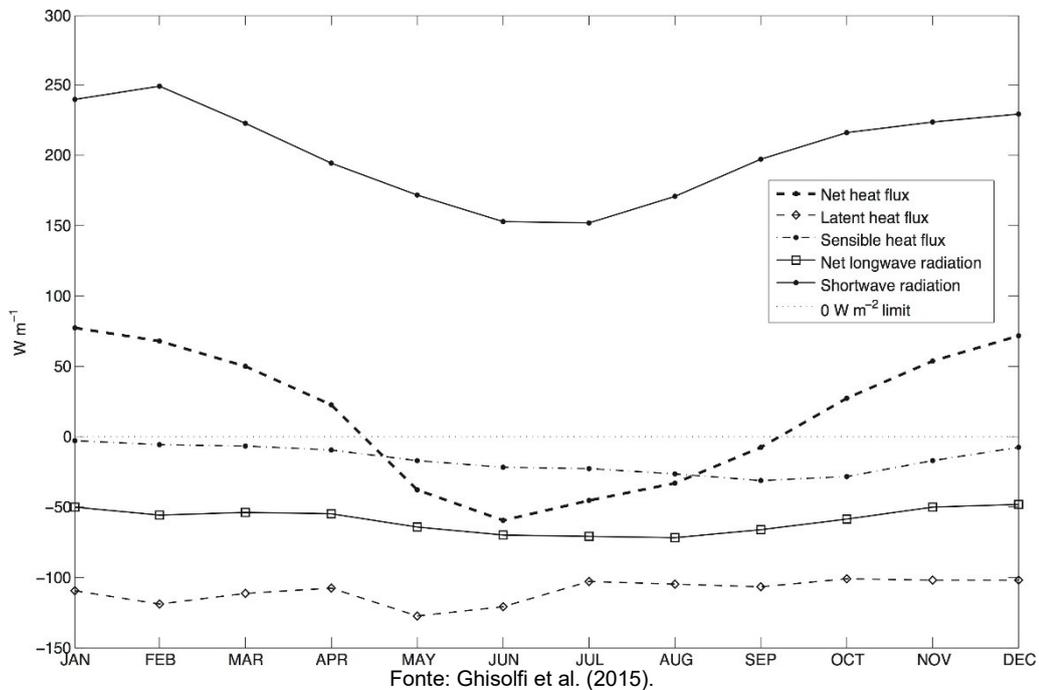


Fonte: autoria própria.

1.2 DESCRIÇÃO GERAL

Esta Seção tem como objetivo apresentar uma visão geral das condições meteo-oceanográficas vigentes durante o período de monitoramento, entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019. Os períodos das coletas de dados representaram os meses em que o fluxo líquido de calor é positivo, conforme descrito por Ghisolfi et al. (2015) (Figura 8), visto que a porção superficial do oceano ganha calor entre setembro e meados de abril, atingindo valores máximos entre os meses de dezembro e janeiro. Climatologicamente, este período também é definido como sendo uma estação úmida, visto que há aumento da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Doce e, conseqüentemente, aumento na descarga do rio (Oliveira e Quaresma, 2017).

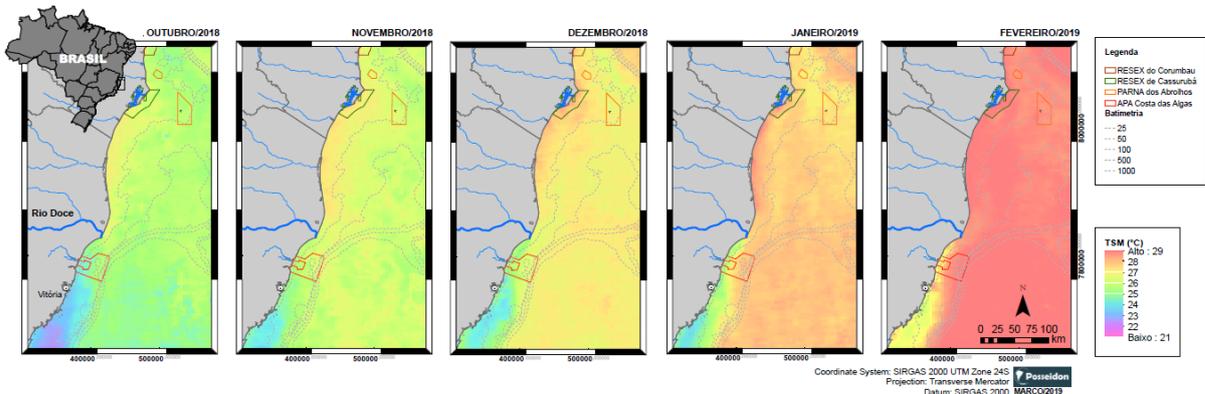
Figura 8: Médias mensais das componentes do balanço do fluxo de calor na interface oceano-atmosfera estimadas a partir dados de reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP). A linha pontilhada representa o fluxo líquido de calor. Quando o oceano perde calor, o fluxo líquido de calor é negativo.



Para a área de estudo, as imagens da temperatura média mensal da superfície do oceano (Figura 9), mostraram que existiu significativo aumento dos valores médios de outubro de 2018 (~25°C) a fevereiro de 2019 (~29°C), o que influenciou a dinâmica oceanográfica.

De modo geral, foram registradas águas mais frias sobre a plataforma continental capixaba ao sul da foz do Rio Doce, em consequência do desenvolvimento da ressurgência costeira. Essa feição foi recorrente em todos os meses analisados gerando um gradiente que variou de 2 a 4°C entre a porção costeira e as demais águas superficiais aquecidas devido ao ganho de calor pelo oceano.

Figura 9: Médias mensais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) estimadas via sensoriamento remoto (Aqua/MODIS) para o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2019.

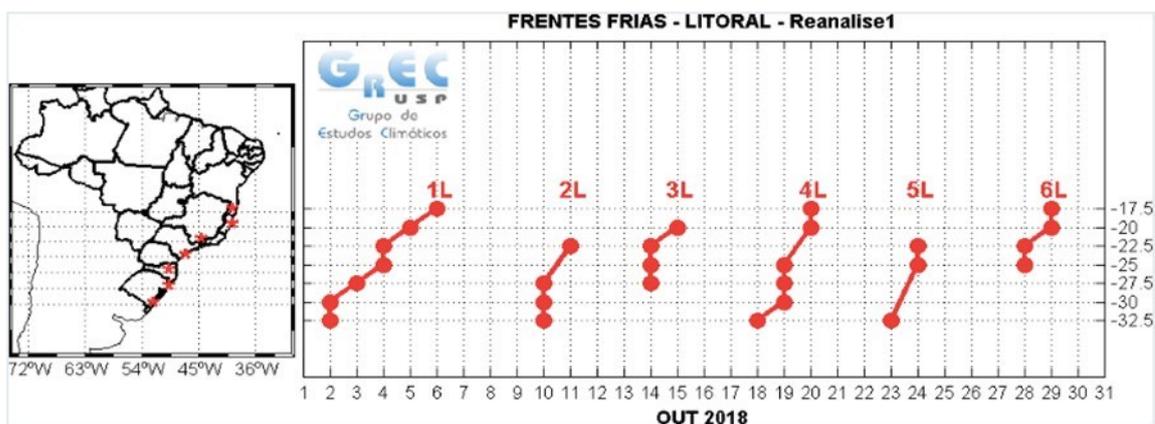


Fonte: autoria própria.

As análises do número de frentes frias que ocorreram no litoral do Espírito Santo (20°S) foram realizadas para o período compreendido entre os meses de outubro de 2018 e fevereiro de 2019 através de resultados obtidos pelo Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP, http://www.grec.iag.usp.br/data/frentes-frias_BRA.php). Os mapas disponibilizados pelo Grupo são apresentados nas Figura 10 até Figura 14.

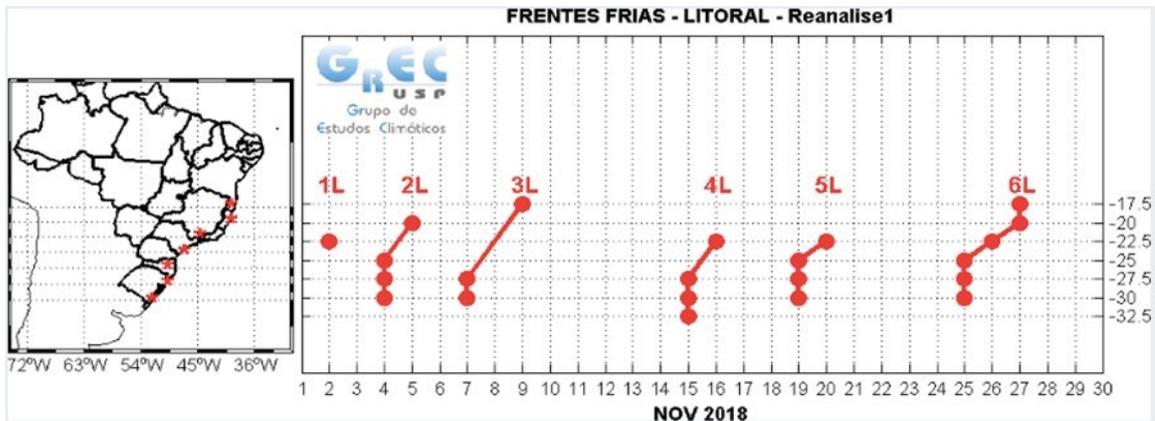
Durante o período analisado, 12 frentes frias ocorreram no litoral do Estado do Espírito Santo, das quais 8 chegaram até o litoral sul da Bahia. Em janeiro de 2019 nenhuma frente fria chegou ao litoral do ES (Figura 13).

Figura 10: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de outubro de 2018.



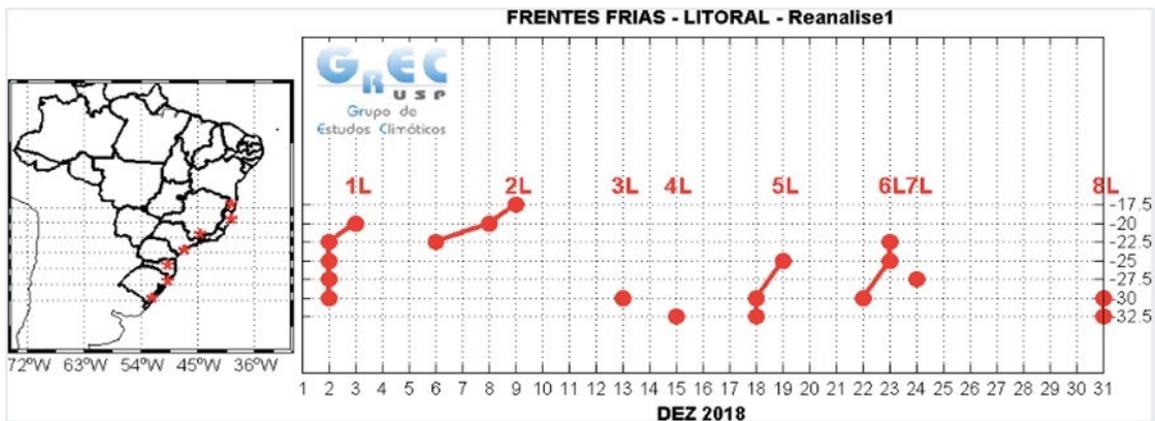
Fonte: Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP), 2019.

Figura 11: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de novembro de 2018.



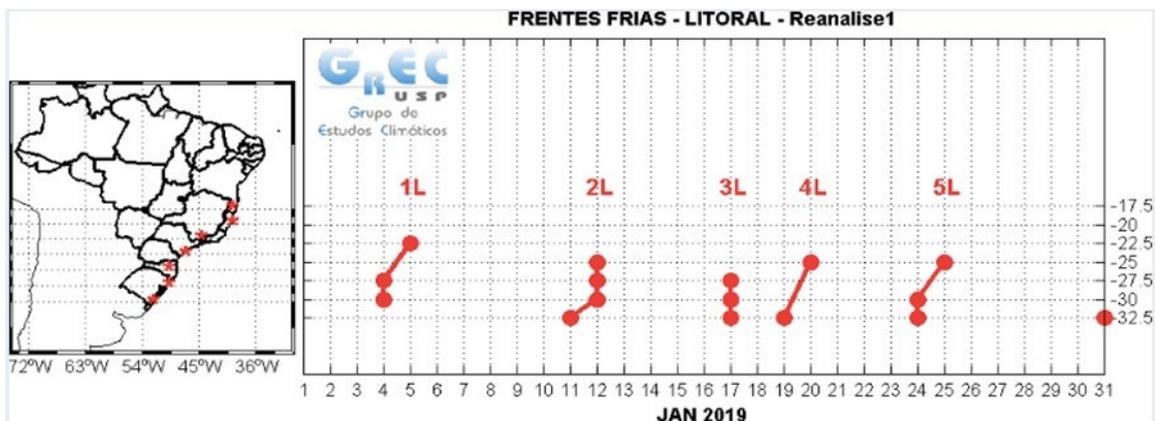
Fonte: Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP), 2019.

Figura 12: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de dezembro de 2018.



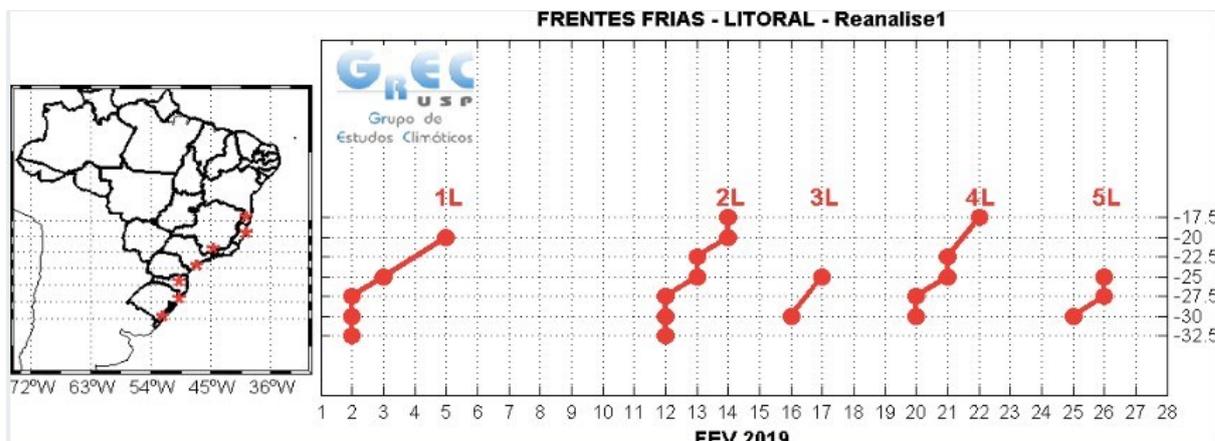
Fonte: Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP), 2019.

Figura 13: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de janeiro de 2019.



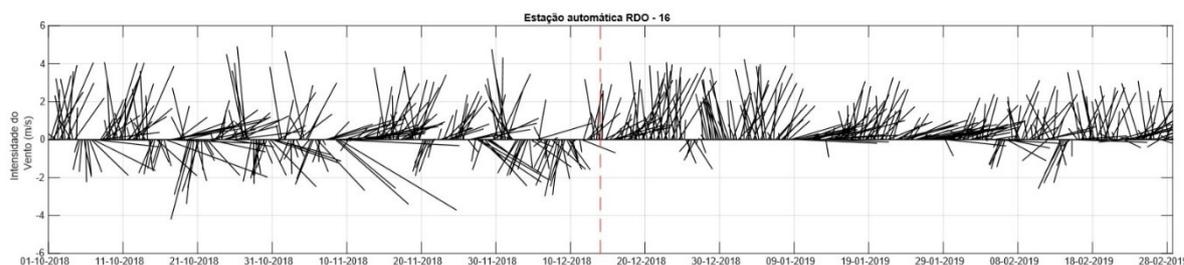
Fonte: Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GREC/USP), 2019..

Figura 14: Passagem de frente ao longo da costa brasileira no mês de fevereiro de 2019.



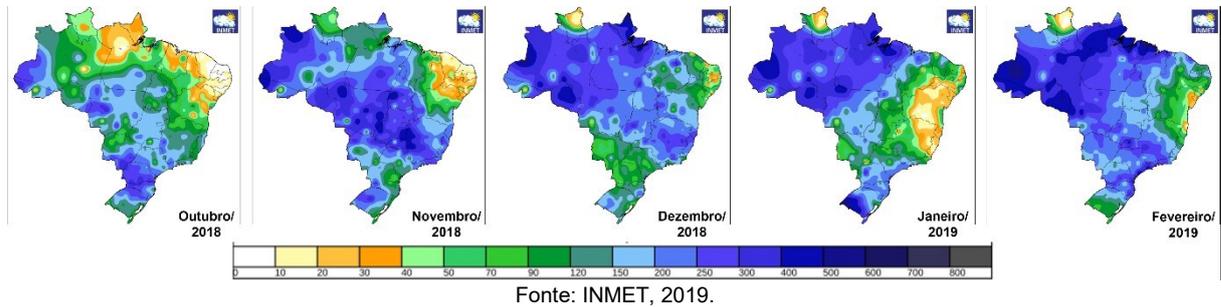
Ao se considerar o regime de ventos, o período de coleta foi marcado por dois padrões de distribuição temporal. O primeiro, que se estendeu de outubro de 2018 até a primeira quinzena de dezembro de 2018, foi marcado por frequentes entradas de frentes frias e alternância de ventos do quadrante norte (condição de tempo bom) para ventos do quadrante sul (associados à entrada de frentes frias). No segundo padrão, identificou-se a predominância de ventos nordeste, com raras inversões das direções dos ventos (Figura 15). Vale ressaltar que sob a ação da tensão de cisalhamento nordeste há o favorecimento ao desenvolvimento da ressurgência costeira na região ao sul da desembocadura do Rio Doce (Castelão e Barth, 2006; Mazzini e Barth, 2013).

Figura 15: Série temporal de ventos (média de 6 em 6h) medidos na estação automática RDO-16 (Linhares - ES) entre os meses de outubro de 2018 e fevereiro de 2019. A linha vermelha indica o momento (14 de dezembro de 2018) em que se observa a mudança no padrão do regime de ventos, ou seja, a predominância dos ventos de nordeste.



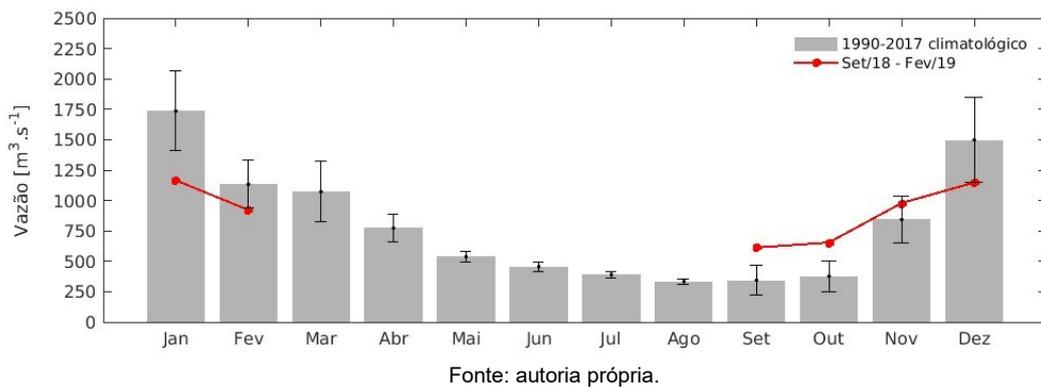
Dentre o período de 5 meses considerado nesta análise, o mês de janeiro de 2019 foi o mais seco com a precipitação acumulada entre 10 e 30mm (Figura 16 – Painel Janeiro/2019), muito embora a vazão média do Rio Doce nesse respectivo mês tenha sido em torno de 1250 m³/s (Figura 17).

Figura 16: Precipitação acumulada (em mm) de 30 dias entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019..



A vazão média mensal do Rio Doce esteve acima da média e da variabilidade climatológica no mês de outubro de 2018, acima da média e dentro da variabilidade climatológica em novembro de 2018 e ficou abaixo da média a partir de dezembro de 2018 (Figura 17).

Figura 17: Média mensal da vazão do Rio Doce nos períodos de coleta (em vermelho) e a série climatológica da vazão do Rio Doce entre 1990 e 2017. O intervalo em preto delimita a variabilidade observada o período climatológico.



Considerando-se a variabilidade horária nas medidas realizadas, observa-se na Figura 18 cinco picos de vazão próximos ou acima de 1500 m³/s ao longo do período, sendo o maior deles com valores acima de 3500 m³/s na primeira semana de janeiro de 2019. Esse pico em particular não foi acompanhado pela passagem de uma frente fria pela costa capixaba (Figura 13).

Figura 18: Vazão média do Rio Doce, de 6 em 6 horas, estimada para a foz a partir de dados medidos na estação de Colatina-ES.



Fonte: autoria própria.

A vazão do Rio Doce é oriunda tanto da precipitação quanto da drenagem (total ou parcial) da bacia deste rio. Assim, um aumento da vazão na foz Rio Doce não é necessariamente consequência de um aumento da precipitação nessa região, fato que impõe grande complexidade na dinâmica espaço-temporal de dispersão do material oriundo da descarga continental na região oceânica.

Os ciclos de sizígia e quadratura da maré impactam diretamente nas dimensões da área de abrangência da pluma oriunda da descarga continental, sendo as maiores variações observadas nos períodos de sizígia (Chant, 2011). Nos períodos de enchente das marés de sizígia, a pluma do rio tende a ficar retida na foz ou dentro do canal de maré do rio. Já nos períodos de vazante de sizígia a água da descarga fluvial tende a se espalhar superficialmente pela plataforma continental interna ficando sujeita, por exemplo, à tensão de cisalhamento do vento. No período de coletas de dados (de outubro de 2018 a fevereiro de 2019) ocorreram 10 marés de sizígia e 11 marés de quadratura, sendo observado que as máximas elevações das marés nas sizíguas corresponderam ao dobro daquelas observadas durante as quadraturas (Quadro 1).

Quadro 1: Datas e valores de amplitude máxima das marés astronômicas de sizígia e quadratura na estação de Barra do Riacho – ES para o período entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019.

MÊS	TIPO	DIA	AMPLITUDE (m)
OUTUBRO/2018	QUADRATURA	2	0,7
OUTUBRO/2018	SIZIGIA	9	1,5
OUTUBRO/2018	QUADRATURA	16	0,5
OUTUBRO/2018	SIZIGIA	24	1,5
OUTUBRO/2018	QUADRATURA	31	0,7
NOVEMBRO/2018	SIZIGIA	7	1,4

MÊS	TIPO	DIA	AMPLITUDE (m)
NOVEMBRO/2018	QUADRATURA	15	0,6
NOVEMBRO/2018	SIZIGIA	23	1,5
NOVEMBRO/2018	QUADRATURA	29	0,8
DEZEMBRO/2018	SIZIGIA	7	1,3
DEZEMBRO/2018	QUADRATURA	15	0,7
DEZEMBRO/2018	SIZIGIA	22	1,5
DEZEMBRO/2018	QUADRATURA	29	0,7
JANEIRO/2019	SIZIGIA	5	1,3
JANEIRO/2019	QUADRATURA	14	0,7
JANEIRO/2019	SIZIGIA	21	1,6
JANEIRO/2019	QUADRATURA	27	0,7
FEVEREIRO/2019	SIZIGIA	4	1,4
FEVEREIRO/2019	QUADRATURA	12	0,7
FEVEREIRO/2019	SIZIGIA	19	1,6
FEVEREIRO/2019	QUADRATURA	26	0,5

Fonte: Marinha do Brasil, 2019.

1.3 SENSORIAMENTO REMOTO

1.3.1 ANÁLISE E SELEÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

Com o objetivo de avaliar a distribuição espacial superficial da pluma oriunda da descarga continental do Rio Doce durante as coletas embarcadas (entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019), foram usados dados diários de reflectância da luz (Remote sensing reflectance - RRS) na banda do vermelho – 645 nm – e do infravermelho próximo – 859 nm - obtidos por satélites para se estimar a turbidez superficial do oceano com resolução espacial de 250 m. Além disso imagens da RRS no comprimento de onda 555 nm (associada à banda da cor verde do espectro visível) com resolução espacial de 500 m, foram analisadas para evidenciar a influência de uma água aportada pelo continente no ambiente marinho e as suas possíveis alterações de cor (NEZLIN et al., 2005). A menor resolução espacial da banda de 555 nm é devido as configurações internas dos próprios sensores.

Para essa análise foram selecionados dados entre 1 de setembro de 2018 e 22 de fevereiro de 2019 obtidos pelo sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (NASA, 2019), um a bordo do satélite Aqua (NASA, 2019) e outro a bordo do satélite Terra (NASA, 2019). Outros sensores orbitais entregam produtos semelhantes com resoluções espaciais de até 30 m, como por exemplo o Landsat 8 e o Sentinel 2. Entretanto, o tempo para a obtenção dos dados na região de interesse pode levar um intervalo de até 15 dias, o que dificultaria a caracterização de eventos com duração menor do que um mês. Somado a isso, a presença de nuvens poderia aumentar ainda mais o tempo para aquisição de dados de qualidade.

Apesar do sensoriamento remoto possibilitar a obtenção de informações da cor superficial do mar de forma diária em qualquer área costeira do país, esses sensores apresentam importantes limitações. A presença de nuvens e a reflexão direta do brilho do sol na água impedem a obtenção desses dados pelos sensores orbitais. Como consequência, foram utilizadas 15 imagens (ou dados) em 2018 e 16 em 2019, totalizando 8% do conjunto de dados inicialmente proposto.

Além disso, a forma diferenciada da absorção e do espalhamento da luz na coluna d'água nos distintos comprimentos de onda, condicionam as respostas fornecidas em cada resultado. Uma vez que o coeficiente de absorção da banda associada à luz vermelha é cinco a seis vezes superior e o coeficiente de espalhamento 50% menor em comparação a banda da luz verde (MOBLEY, 2004), as derivações de turbidez superficial se limitam entre a interface oceano-atmosfera e profundidades entre um e dois metros de coluna d'água. Por outro lado, os resultados de RRS_555 (comprimento de onda com menor absorção pela água) podem ser influenciados pelos componentes presentes na coluna d'água a profundidades maiores, principalmente em regiões oceânicas (GORDON e McCLUNEY, 1975).

Com um total de 31 imagens disponíveis foi feita uma análise qualitativa do comportamento espaço-temporal da pluma do Rio Doce a partir do padrão de distribuição espacial da turbidez e da reflectância no comprimento de onda 555 nm como indicadores de sua área de influência. Ao mesmo tempo, as condições de vento (intensidade, direção e sentido), onda (altura e direção) e vazão do rio foram consideradas de forma a se propor possíveis influências secundárias sobre a dinâmica da turbidez e da reflectância superficial no comprimento de onda de 555 nm. Essas análises buscam, quando possível, descrever a direção preferencial de propagação do aporte fluvial do Rio Doce na região costeira, os efeitos da ressuspensão do sedimento do leito marinho e o incremento de biomassa de fitoplâncton – já que a clorofila-a, presente nos grupos fitoplanctônicos, possui picos de absorção da luz nas bandas do azul e vermelho e de reflexão na banda do verde (MOBLEY, 2004).

A turbidez superficial da água foi derivada a partir dos dados de reflexão da luz nos comprimentos de onda de 645 nm (banda da cor vermelha do espectro visível) e 859 nm (reflectância no comprimento de onda no infravermelho próximo) em ambientes marinhos de alta e baixa turbidez (Dogliotti et al., 2015; Aurin et al., 2013). Foi desconsiderado o primeiro quilômetro a partir da costa devido à contaminação por stray lights – vide protocolo. Esse resultado tende a fornecer uma análise satisfatória da dispersão de sedimentos terrígenos na superfície dos oceanos. Contudo, uma análise focada somente em resultados derivados do vermelho e infravermelho próximo não permite a avaliação de efeitos secundários da pluma do Rio Doce, tais como o aporte de substâncias orgânicas e inorgânicas com outras tonalidades e suas contribuições para o incremento da biomassa do fitoplâncton. Como alternativa, empregou-se também o uso da reflectância no comprimento de onda associado à banda da cor verde do espectro visível (Rrs em 555 nm), conforme proposto por Gordon e McCluney (2005).

Outras metodologias são comumente utilizadas para estudar a dispersão de plumas de rios por sensoriamento remoto, como a salinidade superficial do mar e a temperatura da superfície do mar. No primeiro caso, a resolução espacial e temporal dos dados *in situ* foi muito baixa para identificar com

resolução adequada a área de influência da pluma do Rio Doce. Já o segundo foi descartado por não existir uma clara distinção térmica entre as águas provenientes do rio e as águas costeiras próximas à foz. Diante disso, foi empregado o uso da cor do oceano.

Para compreensão do papel das forçantes que atuam sobre o aporte fluvial na foz do Rio Doce e posterior espalhamento das águas, foram selecionados resultados/dados de altura significativa de onda diários (instantâneos às 12h local), provenientes de duas fontes: do Modelo Global ERA5 (C3S, 2019), no ponto 19,5°S e 39,5°W e; do ADCP fundeado no ponto Fundeio 3 (mais detalhes sobre a posição do fundeio na Seção 1.5). Não foi utilizada uma única fonte de dados porque nenhuma delas contemplava todo o período avaliado. Os dados de vazão da foz do Rio Doce foram estimados a partir dos dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2019) para a estação localizada em Colatina - ES. Os dados de vento para o período das coletas embarcadas são provenientes da estação automática RDO-16, localizada em Regência, no município de Linhares. Para os eventos pretéritos selecionados também foram considerados dados de altura significativa de onda e vento do modelo Global ERA5. Neste caso, foram utilizados instantâneos diários às 12 horas local das componentes zonal e meridional. As variações do nível do mar não foram consideradas nessa análise devido às baixas resoluções espaciais e temporais das imagens para essa aplicação específica. A maré exerce influência sobre a dispersão e mistura da pluma com o oceano adjacente somente em uma região bem próxima à foz (Chant, 2011), ou seja, em uma área muito pequena para ser estudada por esse conjunto de dados. Além disso, o fato de a obtenção das imagens ser diária não permite relacionar a dispersão do aporte continental do Rio Doce com a maré no momento da aquisição.

Além da análise dos dados no período entre outubro de 2018 a fevereiro de 2019, também foram selecionados eventos pretéritos a fim de avaliar a resposta superficial em momentos distintos da dinâmica local no passado e compará-la aos períodos quando ocorreram as campanhas de levantamentos de dados *in situ*.

Os eventos pretéritos foram escolhidos dentro de um banco de dados com imagens diárias desde janeiro de 2003 a fevereiro de 2019, de forma manual e visual. Foram considerados momentos cujo o mar costeiro apresentava tonalidades voltadas para o verde e/ou o marrom em maiores proporções e que permitiam uma mínima compreensão da distribuição da turbidez e reflectância no comprimento de onda 555 nm associados à foz do Rio Doce.

A avaliação da distribuição espacial e temporal da concentração da clorofila-a na região foi retirada de Fernandes (2015) que utilizou informações obtidas a partir do sensor Aqua/MODIS. A variabilidade foi avaliada a partir da decomposição de um grande conjunto de dados em algumas componentes principais representativas de modos de variação que, quando somadas, - a grosso modo - retornariam os dados brutos. Para isso foi empregado o uso de funções ortogonais empíricas (EOF) (Bjornsson e Venegas, 1997) sobre dados mensais de concentração de clorofila-a entre 2003 e 2013. Em seguida, a significância estatística desses modos foi testada de acordo a metodologia apresentada por North et al. (1982).

1.3.2 CENÁRIOS DE ESTADO DE MAR

Entre os meses de setembro de 2018 e fevereiro de 2019 foram identificados quatro cenários principais de estado do mar. Esses cenários agruparam momentos em que as condições meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas apresentavam semelhanças que permitiram uma análise conjunta de dados diários de sensoriamento remoto. O Quadro 2 apresenta as principais características dos quatro cenários definidos.

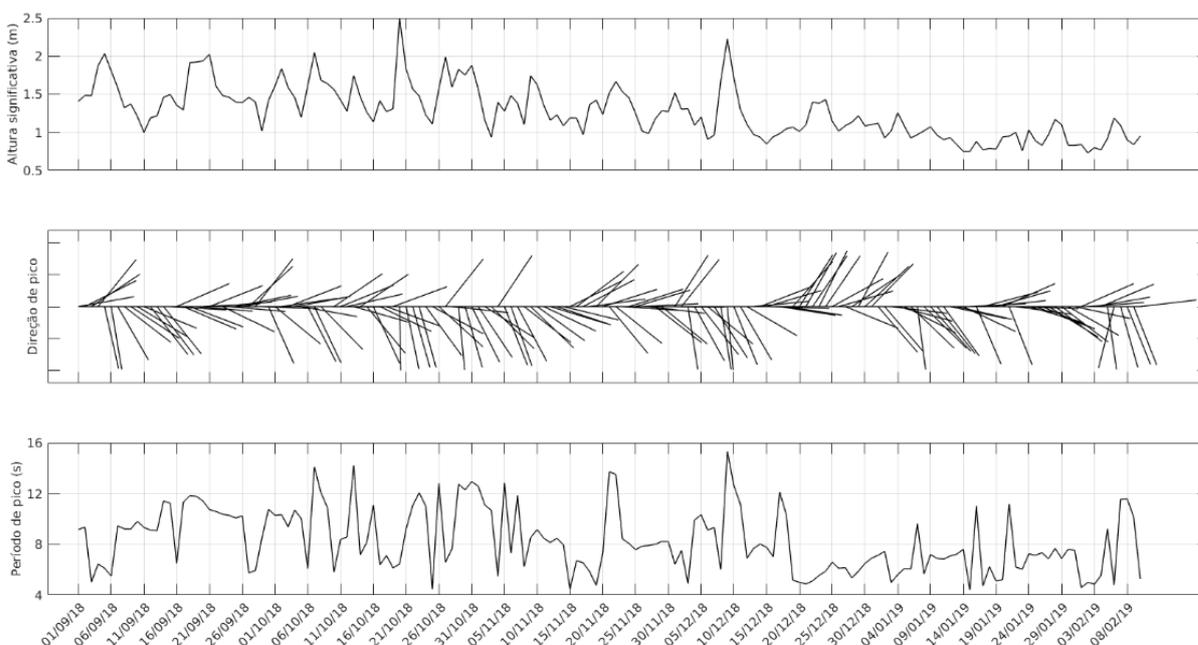
Quadro 2: Cenários agrupados por condições meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas durante o período de análise dos dados diários de sensoriamento remoto.

Cenário	Período	Vazão	Ondas	Vento
I	Setembro à primeira quinzena de dezembro de 2018	<700 m ³ /s em setembro e outubro. Entre 700 a 1600 m ³ /s a partir de novembro	~1,5 m	NE e SE
II	Segunda quinzena de dezembro 2018	Entre 700 e 1200 m ³ /s	1,0 - 1,5 m	NE
III	01 a 08 de janeiro de 2019	Pico de vazão, >3000 m ³ /s	~1,0 m	N e NE
IV	Após 9 de janeiro e o mês de fevereiro	Entre 700 e 800 m ³ /s	0,8 - 1,0 m	NE

Fonte: autoria própria.

A Figura 15 mostra a série temporal da distribuição de vento e a Figura 18, da vazão, enquanto que na Figura 19 são visualizados os dados referentes à série temporal de onda.

Figura 19: Painel superior: Série temporal da altura significativa da onda. Painel central: Série temporal da direção de pico. Painel inferior: Série temporal do período de pico das ondas.



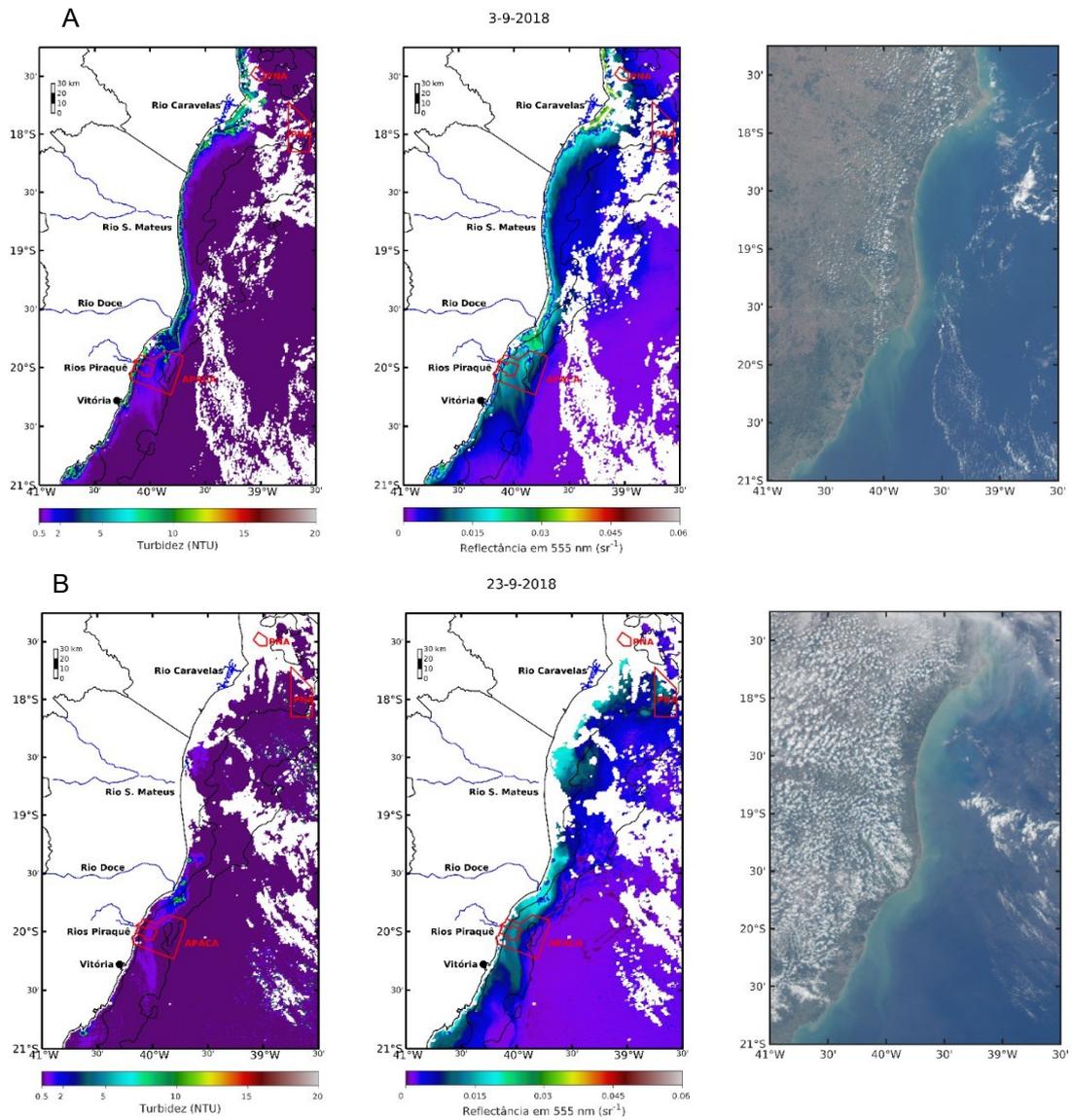
Fonte: autoria própria.

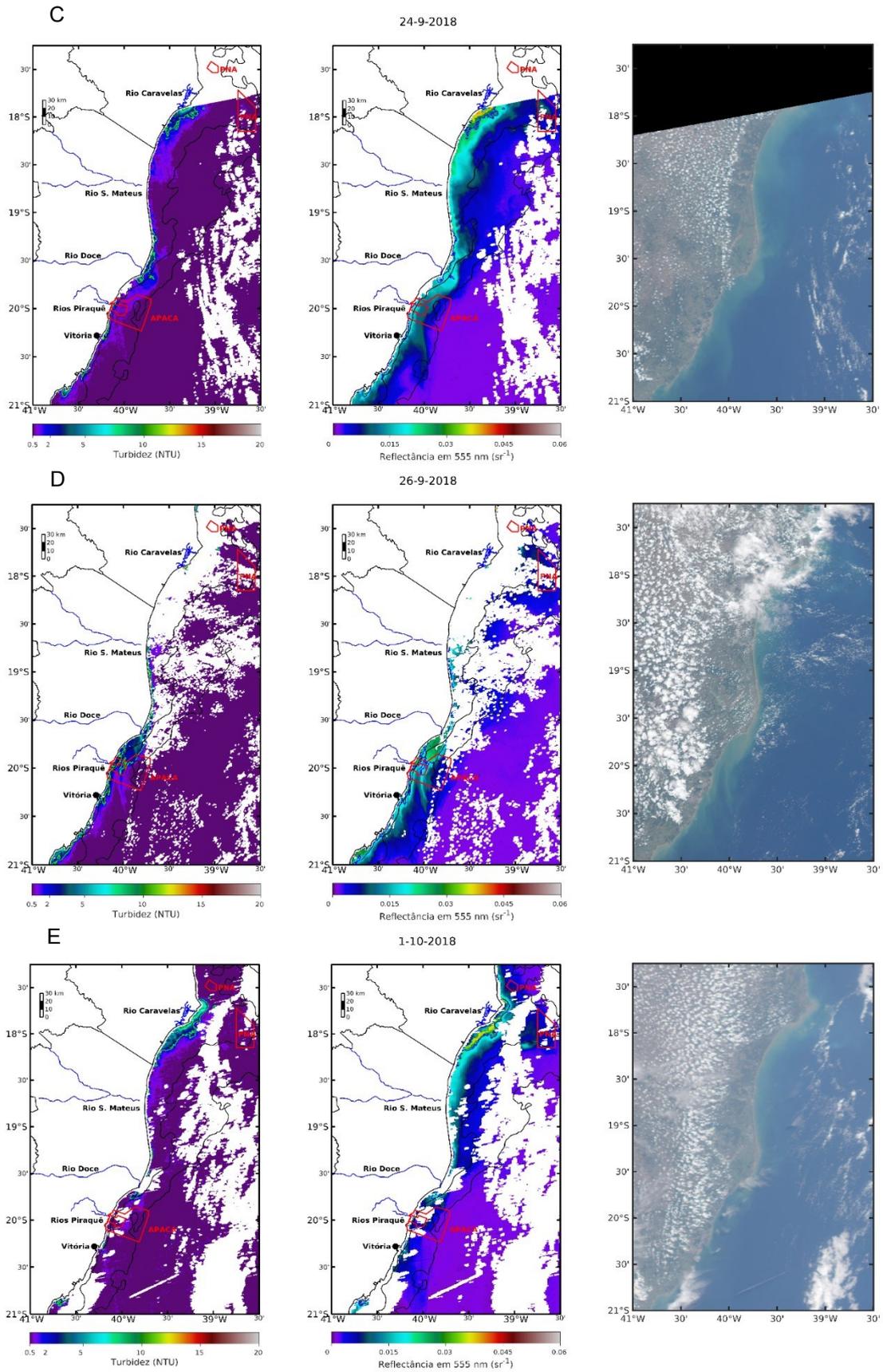
1.3.2.1 Cenário I

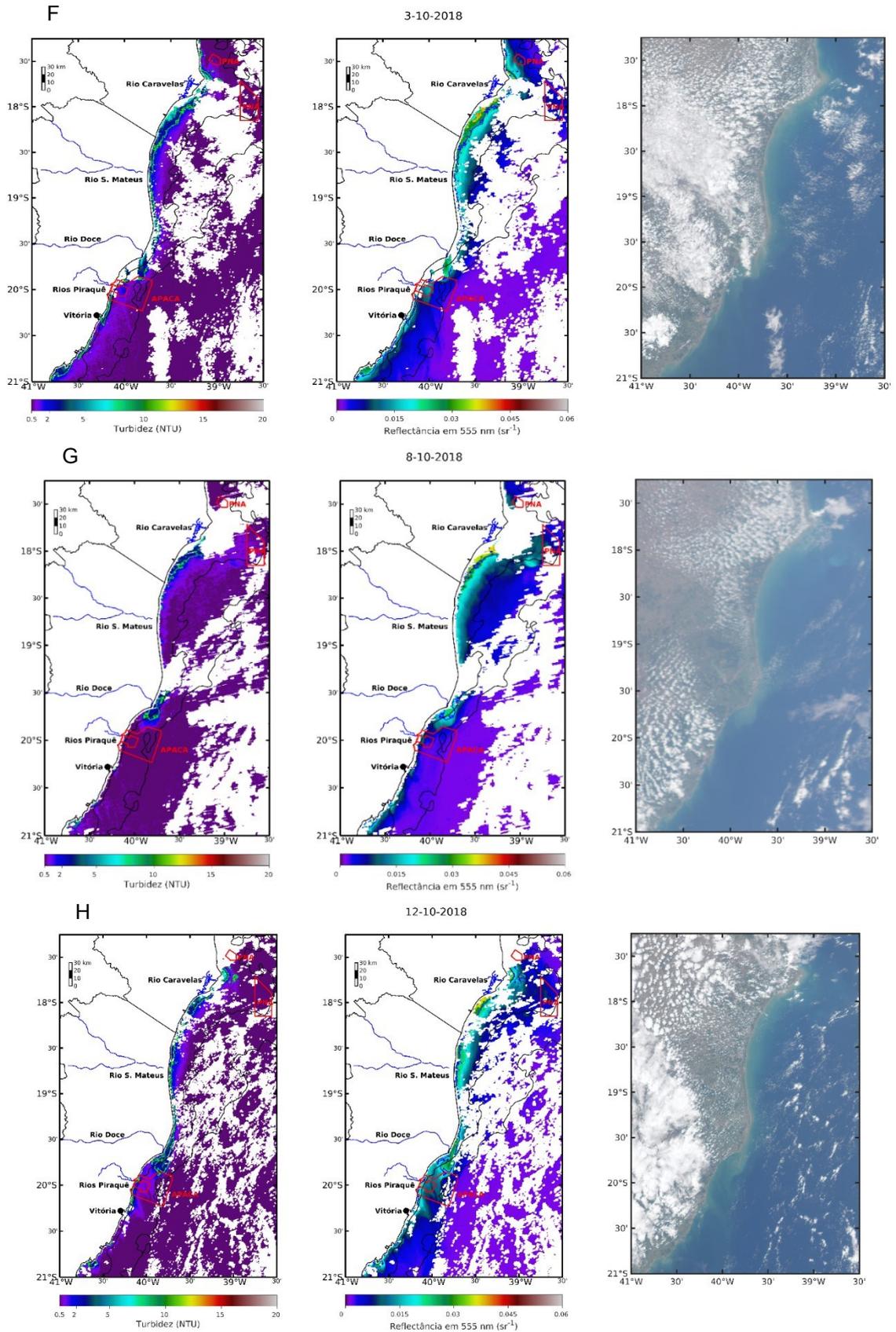
O primeiro cenário (Figura 20 A-M) foi caracterizado pelos maiores valores e abrangência espacial da reflectância no comprimento de onda 555 nm ao longo da plataforma continental. Por sua vez, a turbidez apresentou os valores mais elevados atingindo maiores distâncias ao longo da costa em relação aos demais cenários. No entanto, os maiores valores ocorreram justamente próximos às desembocaduras dos Rios Doce e Caravelas sendo, na maior parte do tempo, valores abaixo de 5 NTU na foz do Rio Doce. O valor de 24 NTU estimado na foz do Rio Doce no dia 15 de dezembro foi coincidente com um período de alta vazão do rio (~1500 m³/s).

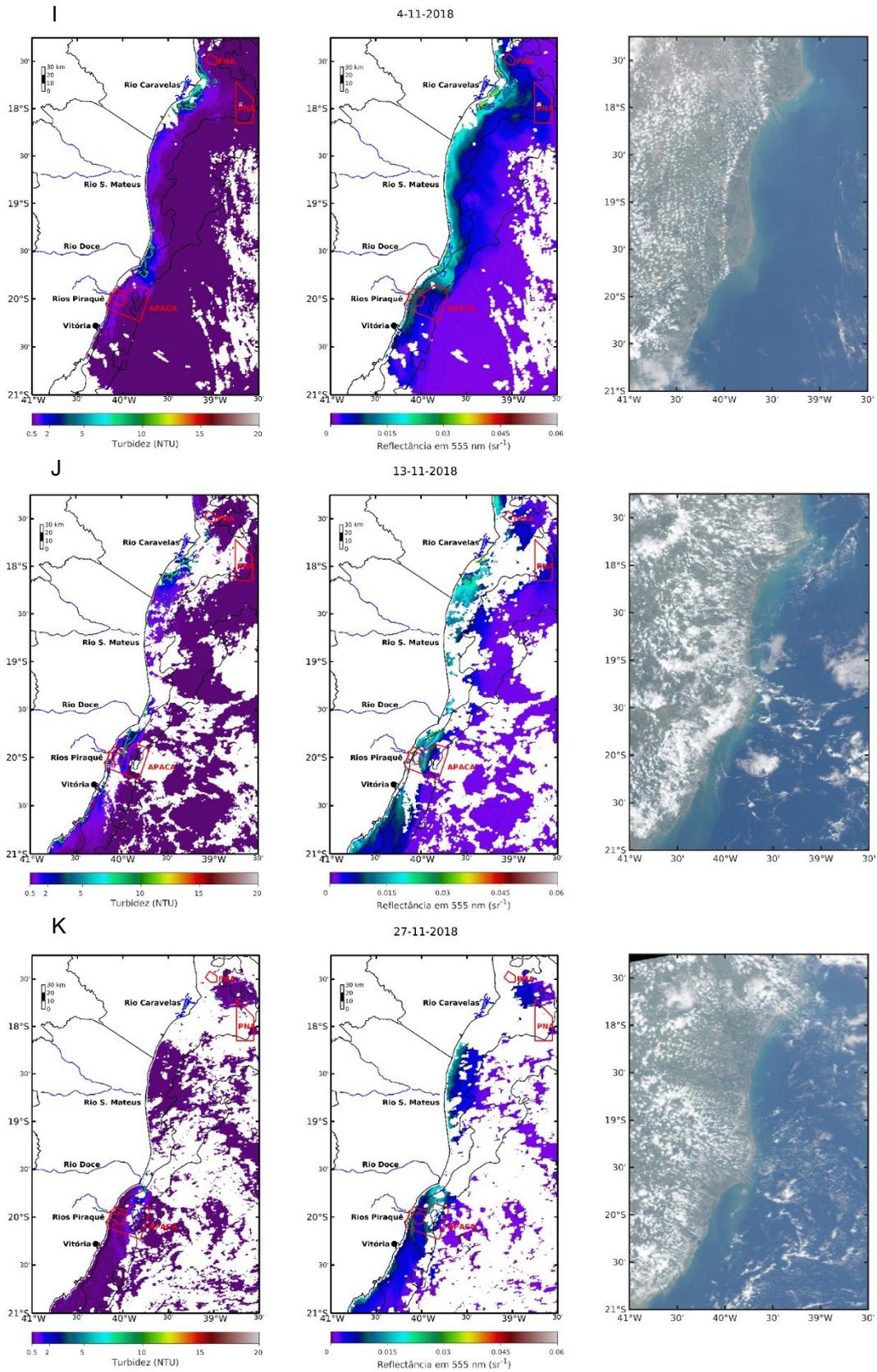
Esse cenário foi marcado pela atuação de ventos tanto norte e nordeste quanto sudeste. Para o segundo caso, a única imagem disponível foi a do dia 6 de dezembro de 2018 (Figura 20 L). Isso ocorreu porque ventos do quadrante sul são acompanhados, normalmente, de instabilidade atmosférica e alta cobertura nebulosa em toda a área de interesse, impossibilitando à obtenção de imagens viáveis à análise.

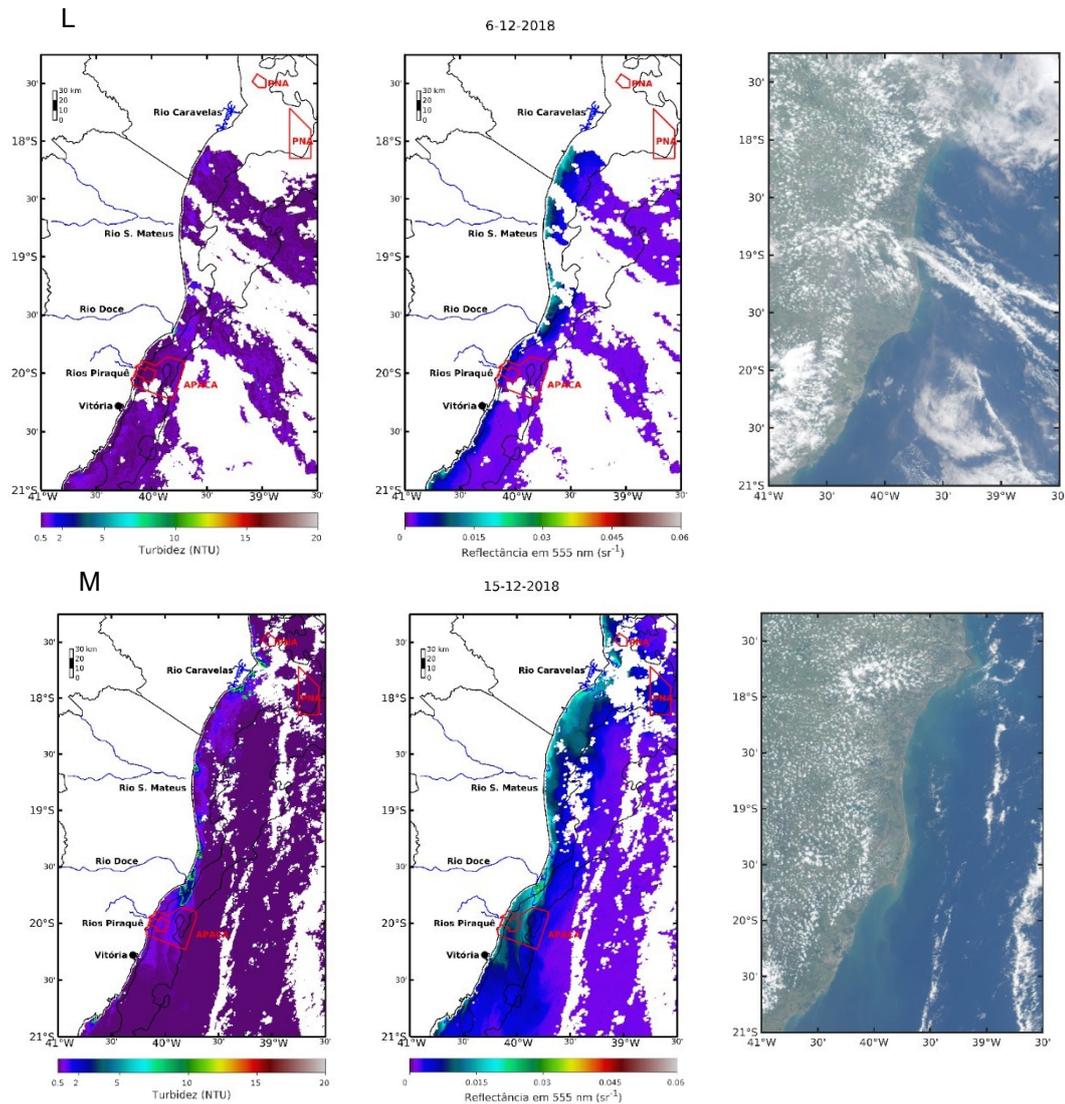
Figura 20: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) em diversas datas classificadas como características do Cenário I. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas finas verdes (nas imagens à esquerda) e azul (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas grossas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.











Fonte: autoria própria.

Sob a ação de ventos N e NE, o deslocamento preferencial do material oriundo da descarga do Rio Doce foi para sul (ou suas variações, como para sudeste ou sudoeste). De fato, filamentos de água oriundos da foz do Rio Doce como extensões do aporte fluvial em direção ao sul foram as feições predominantes nessas observações. Esses filamentos apresentaram um sinal mais claro (maior reflectância) e surgiram também em profundidades menores que 25 m, tanto nas imagens de cor verdadeira como na reflectância no comprimento de onda 555 nm, associados à foz do Rio Doce e do Rio Caravelas.

Neste cenário, uma outra característica que vale destacar é a magnitude e abrangência espacial das alterações de cor da água exibidas nas imagens de cor verdadeira e na reflectância no comprimento de onda 555 nm em comparação aos dados de turbidez superficial. Em 15 de dezembro de 2018 (Figura 20 M), por exemplo, a turbidez superficial exibia o maior valor próximo à foz do Doce ao mesmo tempo que ao sul de Vitória os níveis de turbidez da plataforma continental interna e média se comportavam como de águas oceânicas, com valores menores que 0,5 NTU. Em contraste, a reflectância no

comprimento de onda 555 nm apresentou valores próximos de 0,006 sr⁻¹ em uma área consideravelmente maior (na plataforma interna e média e metade disso a partir da plataforma externa), quando na imagem de cor verdadeira se pode notar uma continuidade no filamento proveniente da desembocadura do Rio Doce.

Embora o período agrupado no primeiro cenário tenha sido o maior em comparação aos demais, e com recorrência de cobertura de nuvens (e conseqüente ausência de dados), a presença de filamentos se estendendo até ou para além da APA Costa das Algas em direção sul foi uma condição que se repetiu em todas as outras imagens desse período, com exceção do dia 6 de dezembro. Para esse caso, foi possível se analisar o padrão da reflectância no comprimento de onda 555 nm e da turbidez durante a atuação de um vento sul. Apesar do rio estar com uma vazão próxima de 1.500 m³/s, a dispersão da pluma de turbidez para o norte foi consideravelmente menor comparativamente àquela do dia 15 do mesmo mês, quando a vazão era semelhante, porém, a dispersão estava sob ação de ventos norte/nordeste. Apesar disso, na imagem do dia 6 de dezembro há um padrão de reflectância no comprimento de onda 555 nm na região da plataforma interna entre o norte da foz do Rio Doce até a foz do Rio Caravelas, que não é visível ao sul da foz do rio. Esses resultados permitem sugerir que essas alterações na cor do mar originadas na foz do Doce podem estar associadas a um efeito secundário do transporte superficial do sedimento exportado pelo rio. Nesse caso, sugere-se que essa água contenha outros materiais orgânicos e/ou inorgânicos, tais como nutrientes, e as próprias florações de fitoplâncton favorecidas por uma maior disponibilidade de novos nutrientes trazidos pelo rio e/ou ressuspensos localmente pela atuação de ondas e ventos mais energéticos do que a média.

1.3.2.2 Cenário II

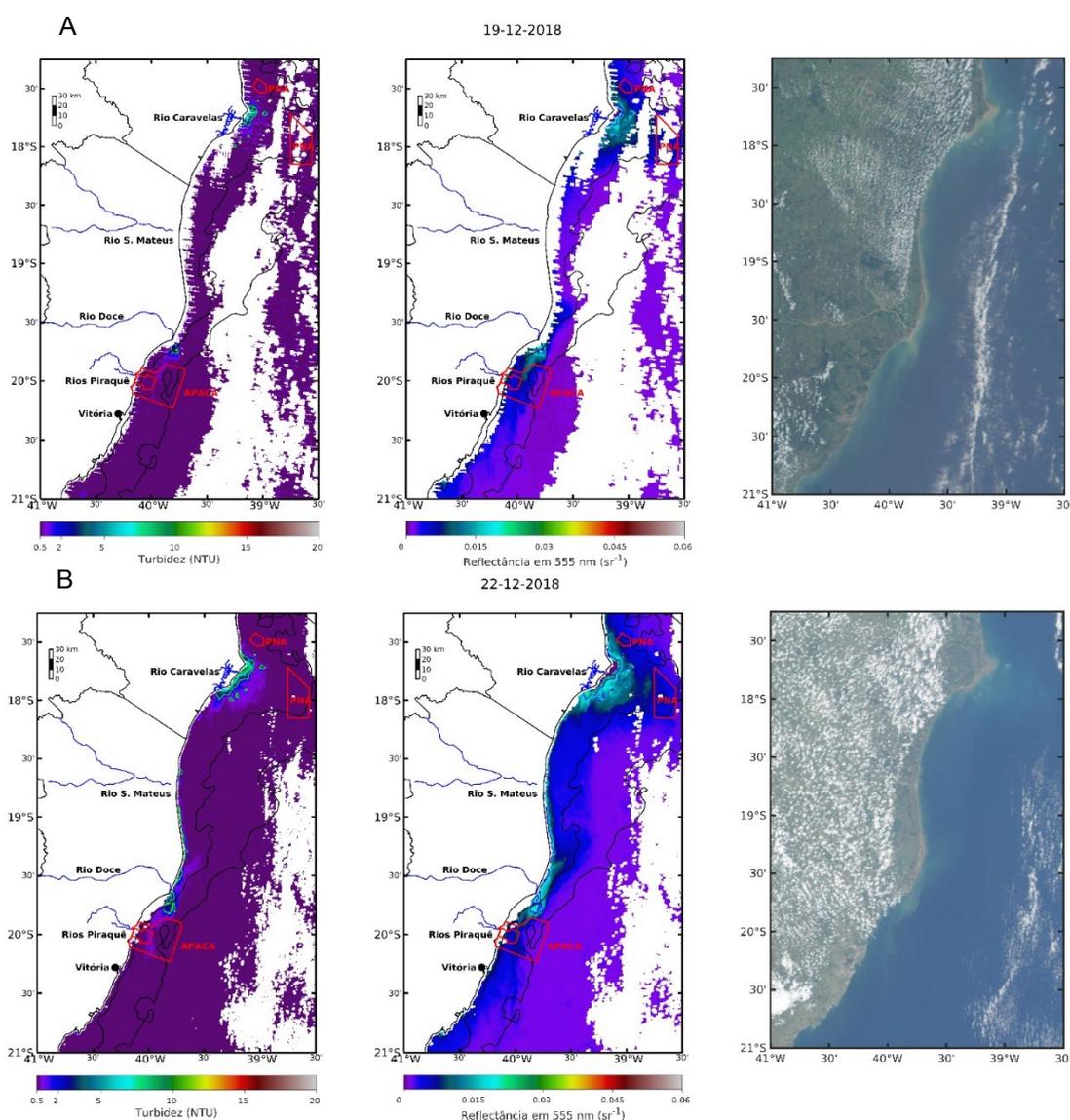
Este cenário foi caracterizado por baixos valores de reflectância no comprimento de onda 555 nm (banda da cor verde do espectro visível) e de turbidez (Figura 21 A-B), com exceção das áreas associadas às desembocaduras dos Rios Doce e Caravelas e de uma faixa litorânea com extensão aproximada de 100 km ao norte da foz do Rio Doce. Toda a área avaliada apresentou valores de turbidez calculados menores que 0,5 NTU e reflectância no comprimento de onda 555 nm menor que 0,008 sr⁻¹.

Nesse período a vazão do Rio Doce estava relativamente baixa, variando entre 800 e 900 m³/s, semelhante ao primeiro cenário entre os meses de setembro e outubro, porém com altura significativa de ondas próxima de 1,0 m e vento predominantemente norte-nordeste com intensidades entre 5 e 8 m/s. A presença dos filamentos para sul foi visível nestas duas imagens, além de um segundo filamento, em direção a nordeste, a partir da foz do Rio Doce (Figura 21 B), mais facilmente observado nas imagens de cor verdadeira e nos dados de reflectância no comprimento de onda 555 nm.

A principal diferença entre as condicionantes da cor da água do mar do primeiro e do segundo cenário pode ser creditada à persistência de ventos nordeste e, por conseqüência, a redução em 0,5 m da altura significativa de onda. Esse menor aporte de energia ao sistema pode ter sido suficiente para proporcionar uma menor agitação marítima e, conseqüentemente, menor capacidade de manutenção

dos sedimentos em suspensão ou mesmo de ressuspender sedimentos que se encontravam depositados no fundo da área costeira. Além disso, esse padrão de ventos favoreceu a formação de uma forte estratificação térmica observada *in situ* (Seção 1.4) na região ao norte da foz do Rio Doce que atuou com o uma barreira na dispersão de sedimentos. Como consequência, a parcela do espectro visível refletida pela água teve menos interferência desse material.

Figura 21: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS em diversas datas classificados como características do Cenário II. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.



1.3.2.3 Cenário III

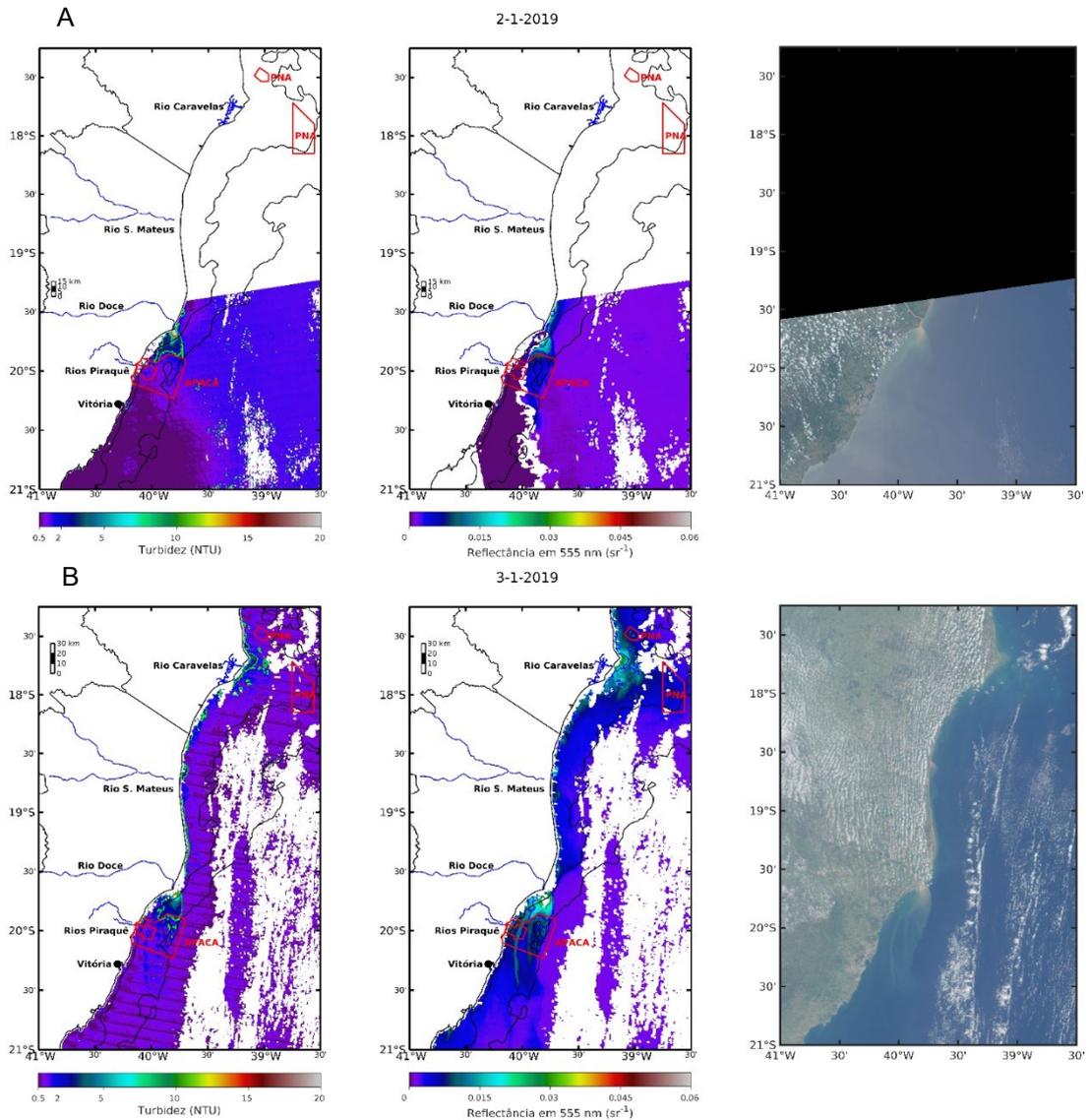
O terceiro cenário mostrou um evento de pico da vazão do Rio Doce, com ventos, em sua maioria, de norte/nordeste e ondulações próximas de 1,0 m (Figura 22 A-E). Pôde-se observar nas imagens de cor

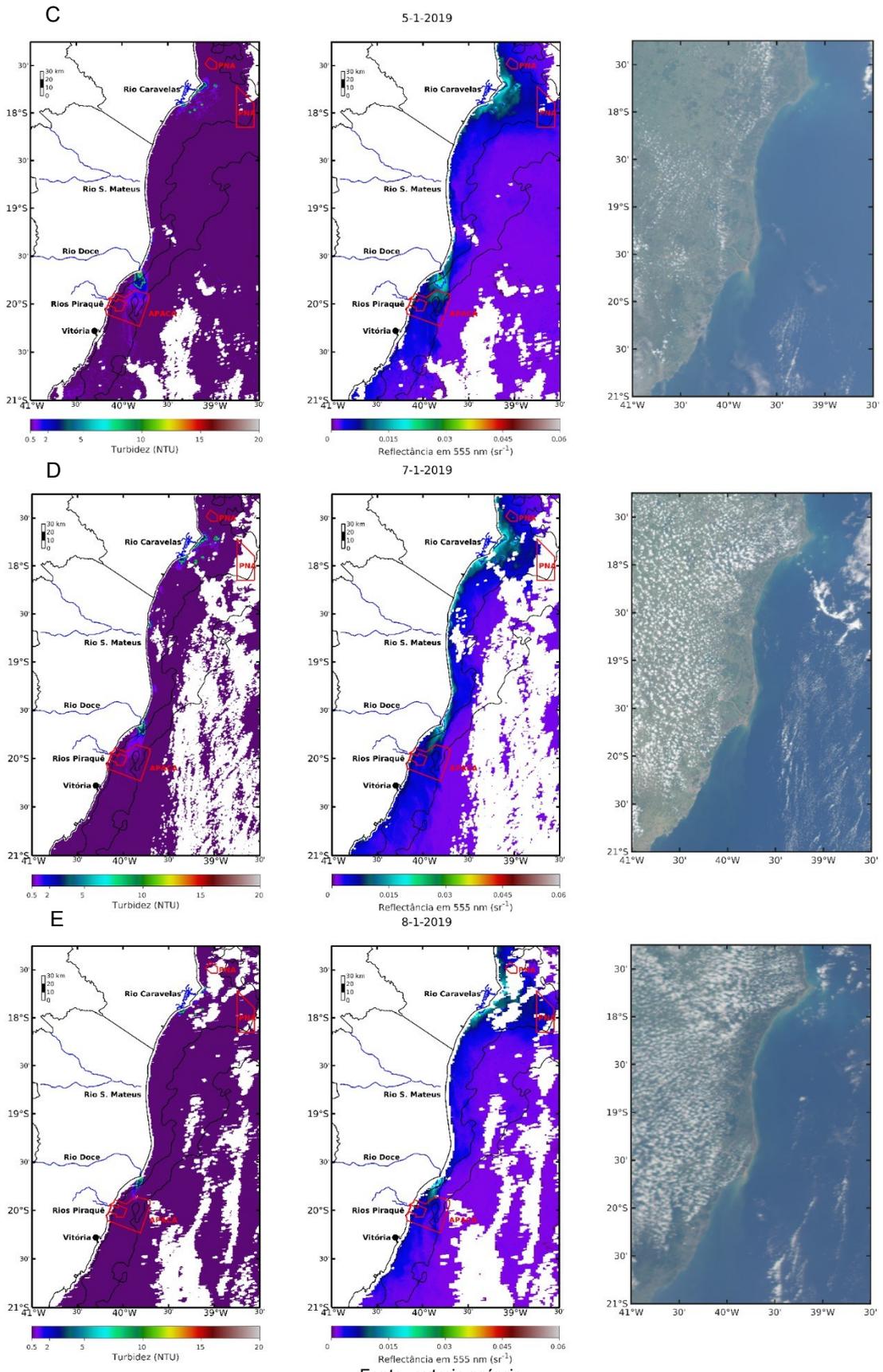
verdadeira que o tom marrom da água na foz do Rio Doce foi o mais intenso do que nos outros três cenários (Cenário I - Figura 20, Cenário II - Figura 21 e Cenário IV - Figura 23 a ser apresentada na sequência). Durante a semana entre 1 e 8 de janeiro de 2019, o pico da vazão do Rio Doce foi de quatro a cinco vezes superior do que no restante do período analisado e, por consequência, essa pode ter sido a forçante mais importante naquele momento no entorno da sua foz. Apesar região costeira, com exceção da foz do Rio Doce, ter apresentado valores de turbidez calculada e reflectância no comprimento de onda 555 nm semelhantes aos do Cenário II, nos dias 2 e 3 de janeiro a turbidez superficial calculada atingiu 167 e 135 NTU, respectivamente, a distâncias aproximadas de um quilômetro da desembocadura do rio. Esses valores podem ter sido ainda maiores em locais mais próximos do continente, porém não foram quantificados devido à limitação dos sensores MODIS em áreas muito rasas.

Com a progressiva redução da vazão do rio nos dias que precederam ao dia 8, os níveis de turbidez baixaram gradativamente para um máximo de 90 NTU, 46 NTU e 12 NTU nos dias 5, 7 e 8 de janeiro de 2019, respectivamente, retornando, assim, aos níveis próximos do segundo cenário.

Assim como no Cenário I (Figura 20), a propagação e área de abrangência de filamentos observada nos resultados de reflectância no comprimento de onda de 555 nm foram maiores do que naqueles de turbidez. Por exemplo, no dia 3 de janeiro (Figura 22 B) a imagem de cor verdadeira mostrou que a água originada na foz do Rio Doce se propagou pela plataforma continental interna e média para sul até ao sul da cidade de Vitória - ES. Na imagem da turbidez calculada a abrangência espacial da pluma ficou restrita aos primeiros quilômetros ao sul da foz, enquanto que na imagem da reflectância no comprimento de onda de 555 nm ela foi maior, acompanhando o padrão evidenciado na imagem da cor verdadeira. Esse resultado sugeriu que a maior parte do sedimento exportado pelo rio naquele dia decantou a níveis mais profundos do que os detectáveis pelo sensor MODIS nos primeiros quilômetros de propagação no ambiente marinho, enquanto que a continuidade da mancha tenha sido consequência da presença de outros materiais orgânicos e/ou inorgânicos, tais como nutrientes, e as próprias florações de fitoplâncton favorecidas por uma maior disponibilidade de novos nutrientes aportados pelo rio. Esse mesmo tipo de padrão de dispersão foi observado nos outros dias do terceiro cenário, todavia em menores proporções (Figura 22).

Figura 22: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS em diversas datas classificadas como características do Cenário III. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.

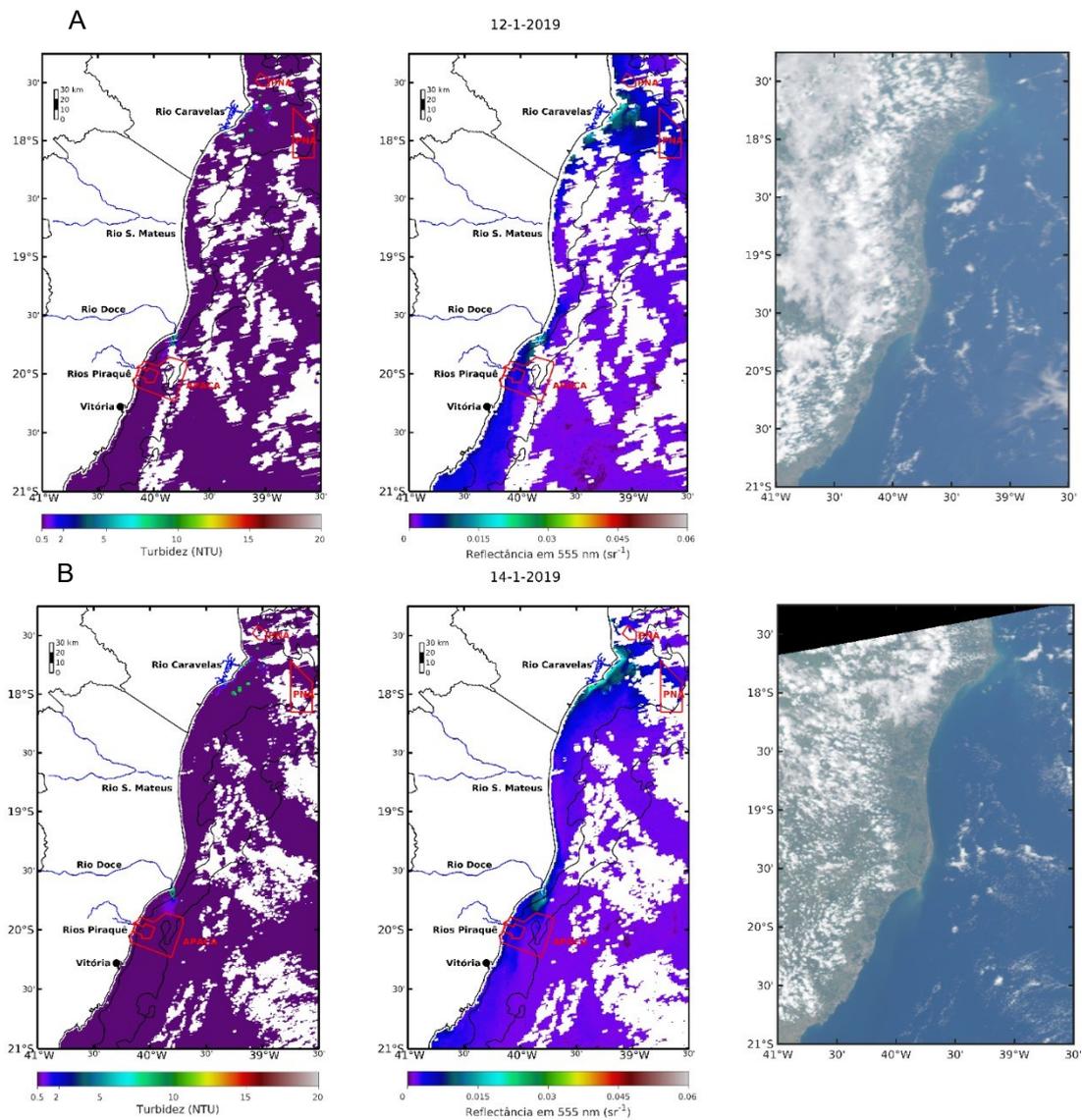


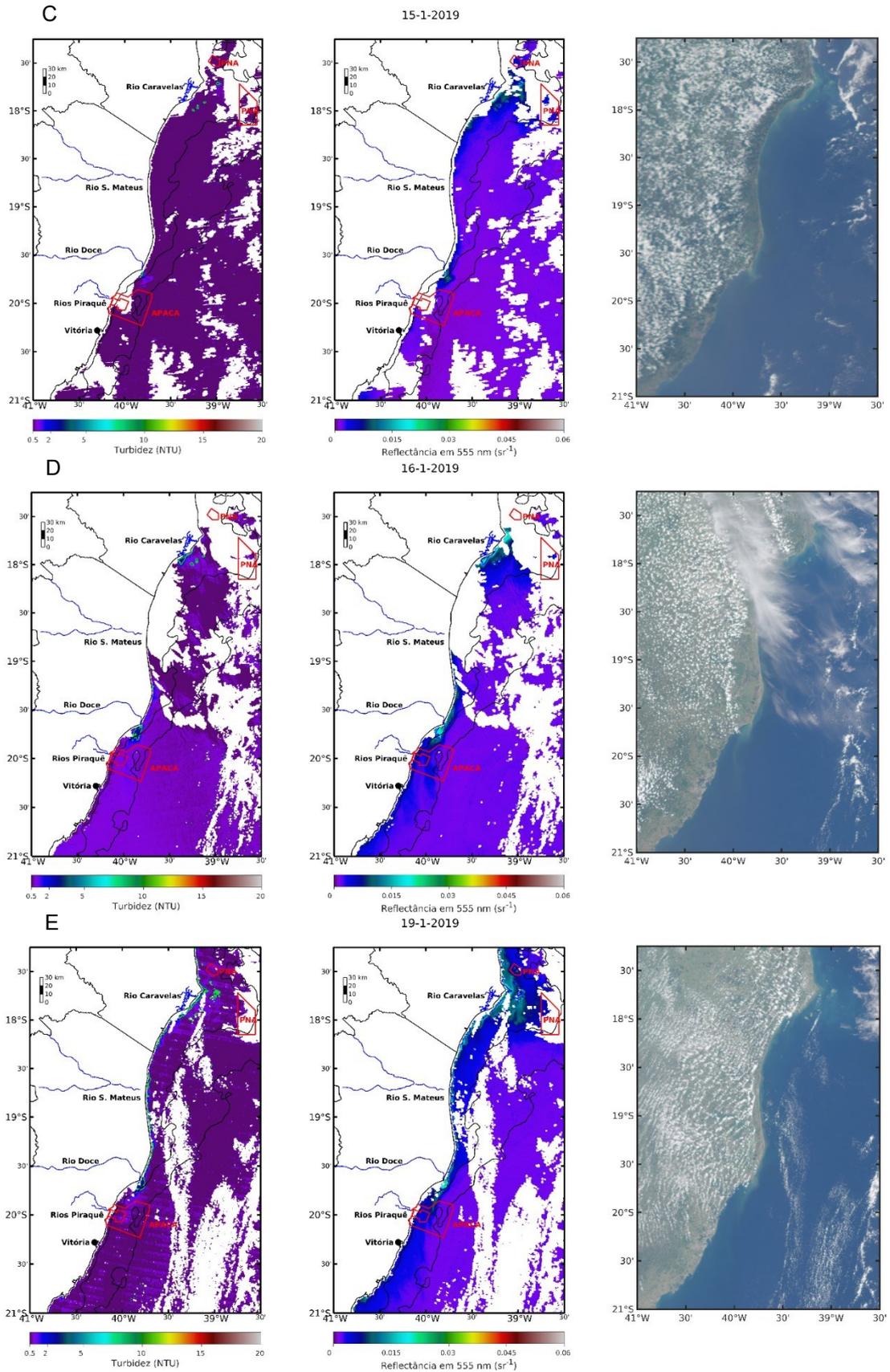


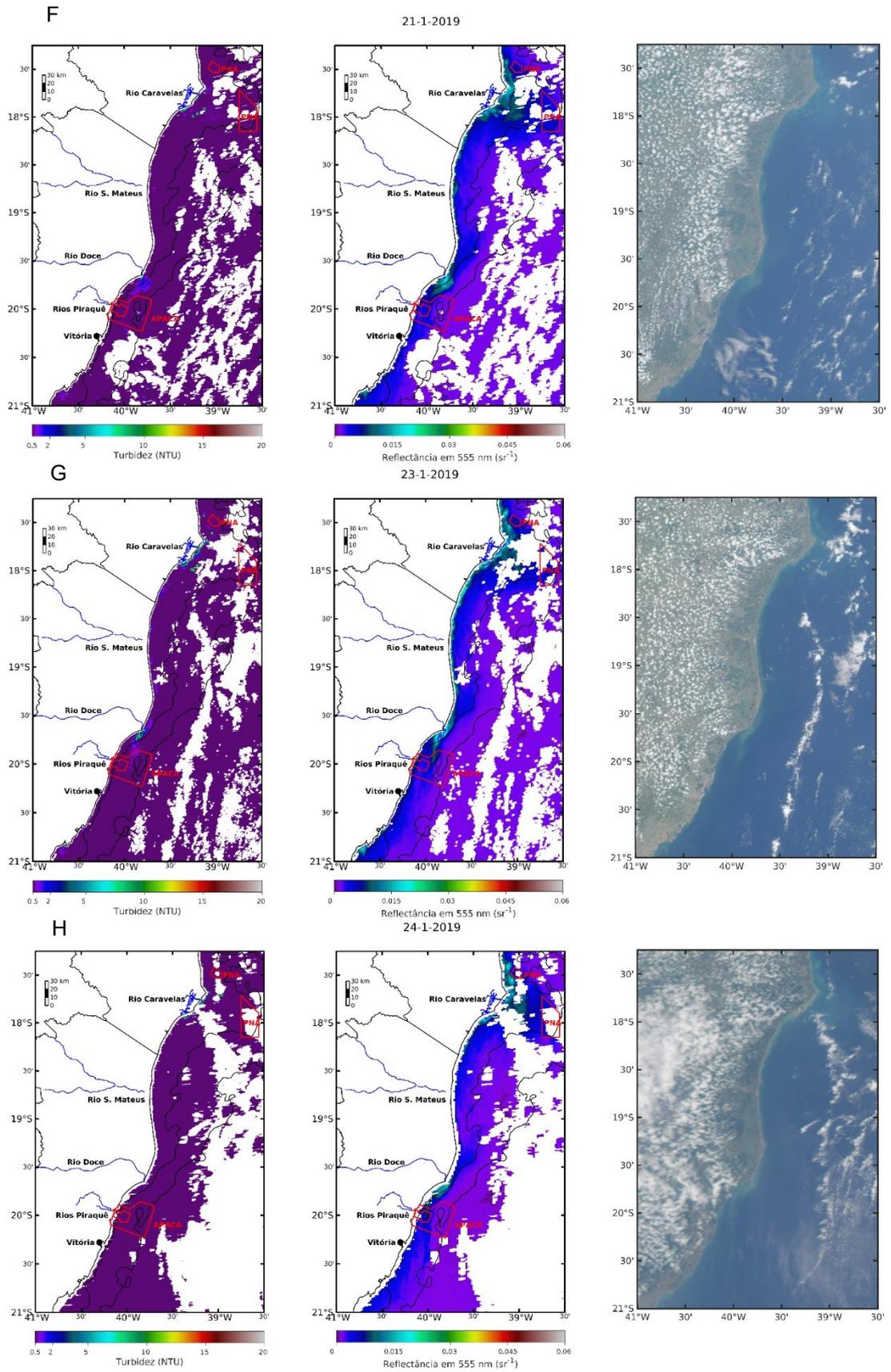
1.3.2.4 Cenário IV

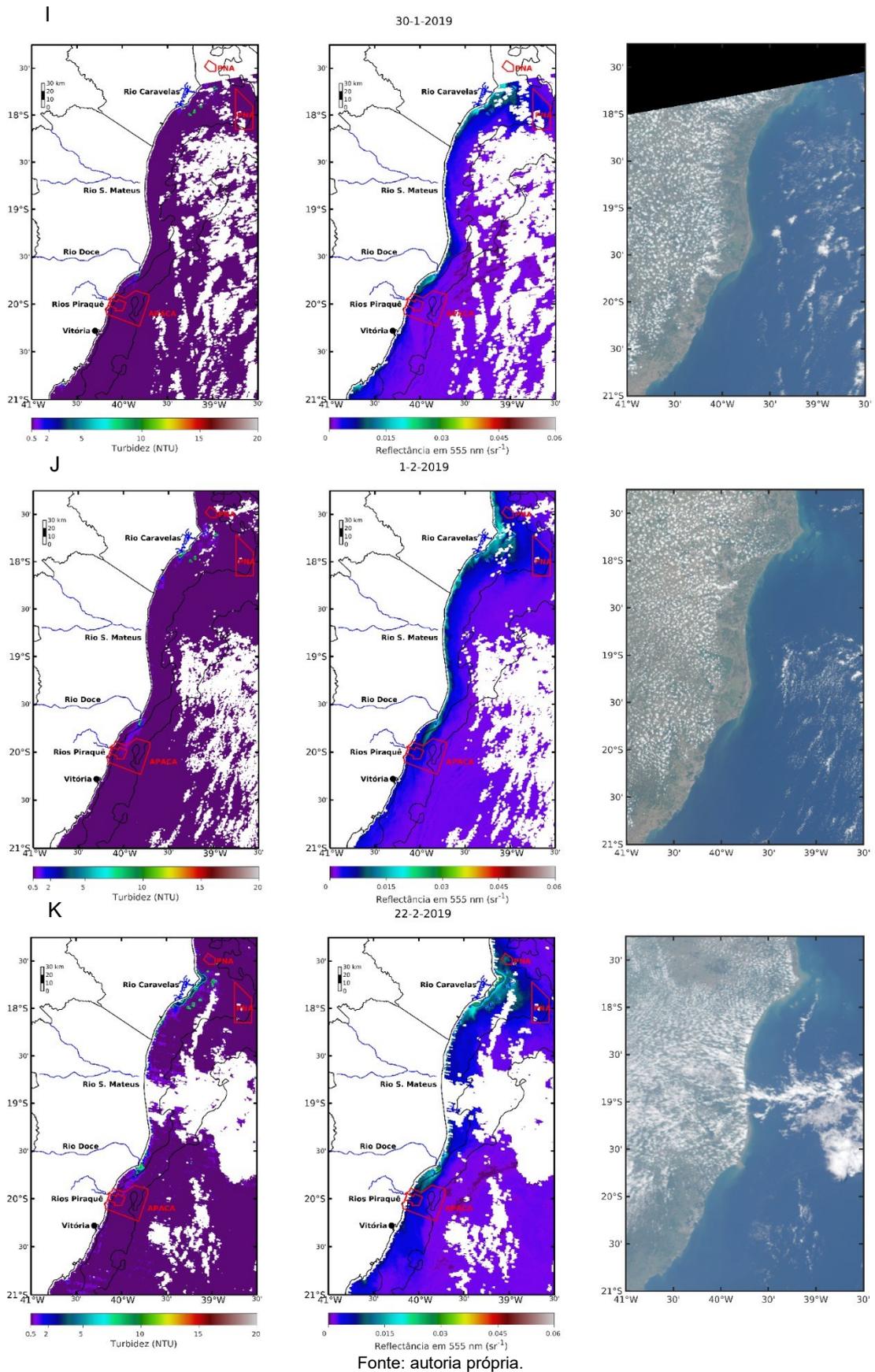
As condições meteo-oceanográficas no Cenário IV (Figura 23) refletem uma condição de relativa calmaria na hidrodinâmica do oceano. O padrão de dispersão da pluma de turbidez decorrente da descarga continental do Rio Doce foi semelhante àquela do Cenário II (Figura 21), com menor área de propagação e filamentos direcionados para sul, apresentando valores de turbidez inferiores a 5 NTU ao longo dos dias analisados. Novamente, o espalhamento espacial da pluma de turbidez superficial próximo à foz do Rio Doce foi menor quando comparada ao sinal superficial de reflectância no comprimento de onda 555 nm (Figura 23 A-K).

Figura 23: Sequência de imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS em diversas datas classificadas como características do Cenário IV. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.









1.3.3 ANÁLISE CONJUNTA

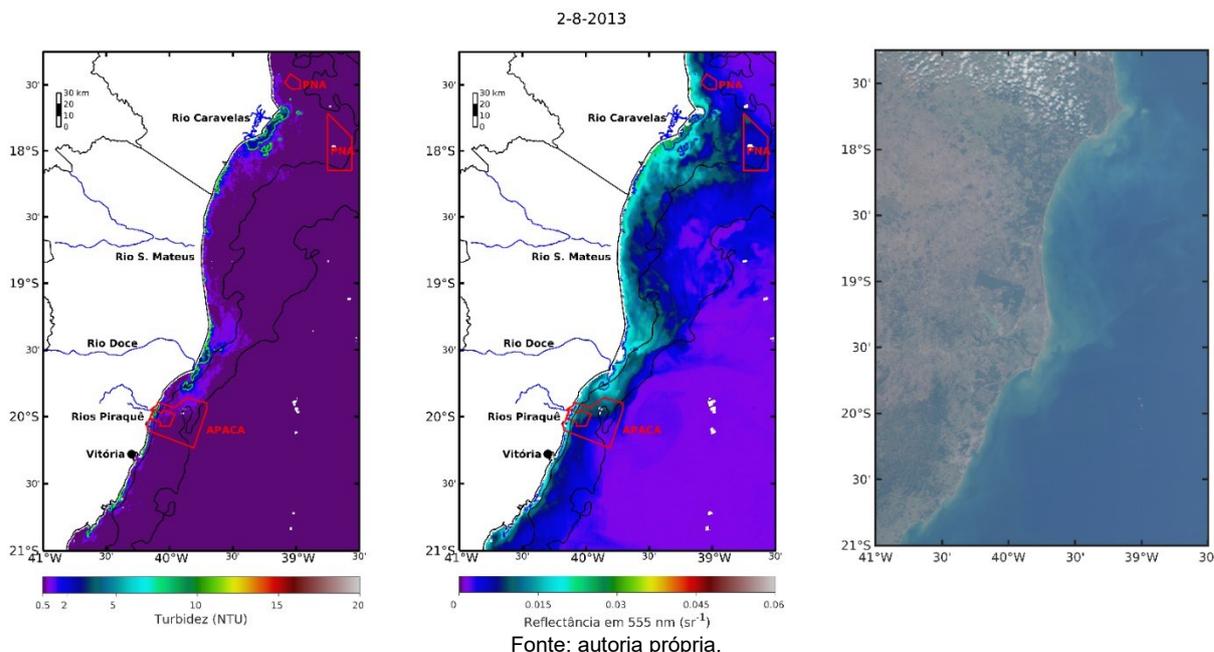
Os resultados mostraram que a dinâmica da pluma de turbidez do Rio Doce e da cor do mar na região analisada está condicionada à atuação conjunta das forçantes meteorológicas, oceanográficas e hidrológicas.

Somente em um dia foi possível obter dados de satélite de qualidade durante a atuação de um vento sul, em 6 de dezembro de 2018. Nesta data, apesar da vazão estar acima de média para o período avaliado, próxima a 1.500 m³/s, a pluma de turbidez ficou aprisionada junto à costa a uma distância menor do que 5 km ao norte da foz, com valores calculados abaixo de 7 NTU. Nove dias depois, com uma vazão de 1050 m³/s e um vento nordeste, a pluma de turbidez alcançou 24 NTU de valor máximo e teve sua dispersão para sul desconectada da costa em uma área maior (Figura 20 M).

A agitação marítima proporcionada pelas ondas também tem um importante papel na distribuição de partículas na água, bem como na alteração da sua coloração. Um bom exemplo é a diferença entre a turbidez e a reflectância no comprimento de onda 555 nm na região costeira entre o cenário I e os demais. Durante o primeiro, a altura significativa das ondas oscilava em torno de 1,5 m, 50% maior do que no restante do tempo, e a vazão, na maior parte do tempo, abaixo de 800 m³/s. Porém, principalmente em profundidades menores que 25 metros ao longo de toda a costa, os níveis de turbidez calculados e de reflectância no comprimento de onda 555 nm eram superiores aos demais cenários. Isso também pôde ser observado nas imagens de cor verdadeira. Esse comportamento somente não aconteceu na foz do Rio Doce durante o Cenário III, quando a vazão e a turbidez local foram máximas (Figura 18). A agitação marítima proporcionada pelas ondas também tem um importante papel na distribuição de partículas na água, bem como na alteração da sua coloração. Um bom exemplo é a diferença entre a turbidez e a reflectância no comprimento de onda 555 nm (banda da cor verde do espectro visível) na região costeira entre o cenário I e os demais. Durante o primeiro, a altura significativa das ondas oscilava em torno de 1,5 m, 50% maior do que no restante do tempo, e a vazão, na maior parte do tempo, abaixo de 800 m³/s. Porém, principalmente em profundidades menores que 25 metros ao longo de toda a costa, os níveis de turbidez calculados e de reflectância no comprimento de onda 555 nm eram superiores aos demais cenários. Isso também pôde ser observado nas imagens de cor verdadeira. Esse comportamento somente não aconteceu na foz do Rio Doce durante o Cenário III, quando a vazão e a turbidez local foram máximas (Figura 18). Isso sugere que a condição hidrodinâmica seja o fator determinante na abrangência espacial do sinal superficial ao longo da costa nas bandas avaliadas.

Condições pretéritas ao período dos cruzeiros realizados neste monitoramento apresentam características semelhantes aos Cenários I, II, III e IV. O primeiro exemplo é mostrado na Figura 24.

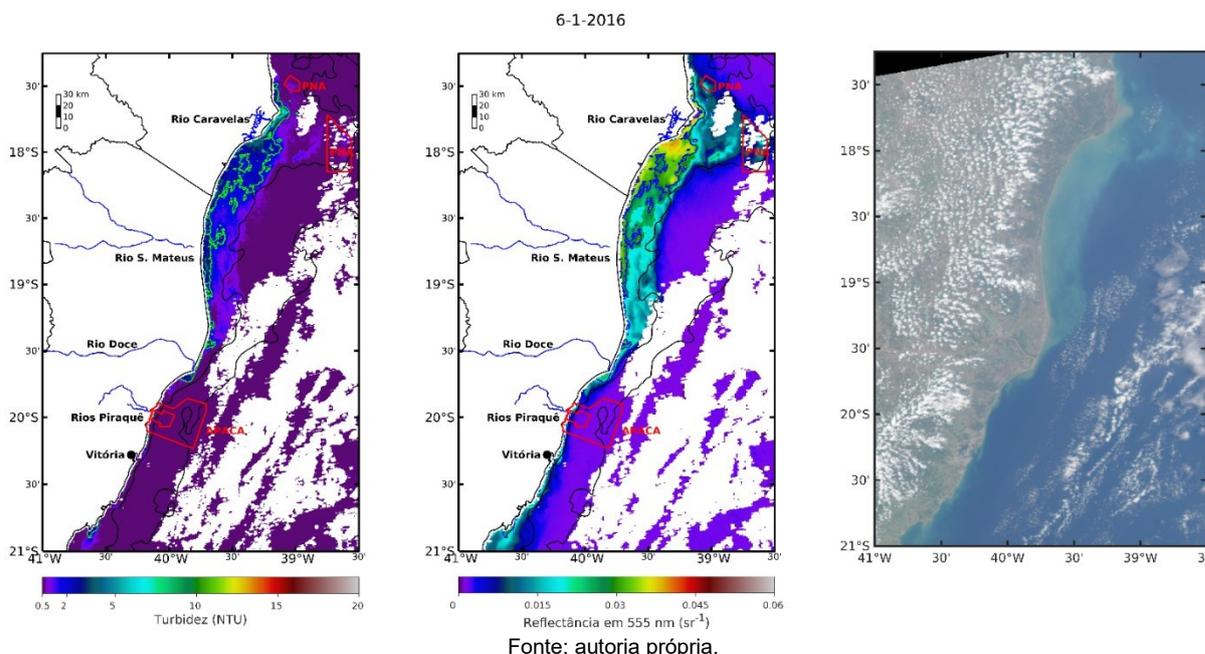
Figura 24: Imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) do dia 2 de agosto de 2013 obtidas pelo sensor MODIS como exemplificação em que o aumento da reflectância do verde não esteve associado a um aumento proporcional de turbidez. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens à direita) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.



Os primeiros dados são do dia 2 de agosto de 2013, durante o inverno. Nos dias 31 de julho e 1 e 2 daquele mês a ondulação tinha, respectivamente, 1,1m, 1,5m e 1,4m de altura significativa e era proveniente de sudeste e sul-sudeste. A vazão do Rio Doce era de 270 m³/s e o vento passou por uma inversão de sul no dia 31 de julho para nordeste no dia 2 de agosto. O resultado mostrou que há duas plumas de turbidez associadas à descarga continental do Rio Doce e do Rio Caravelas, descontinuas entre si. No entanto, nas imagens de reflectância no comprimento de onda 555 nm e de cor verdadeira (Figura 25) o padrão foi contínuo, principalmente em profundidades menores que 25 m.

O segundo conjunto de imagens é do 6 de janeiro de 2016, durante o verão (Figura 26).

Figura 25: Imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância do comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) do dia 6 de janeiro de 2016 obtidas pelo sensor MODIS como exemplificação em que o aumento da reflectância do verde não esteve associado a um aumento proporcional de turbidez. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens à direita) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.



Nos dias 4, 5 e 6 de janeiro de 2016 a ondulação tinha, respectivamente, 2,2m, 2m e 1,8 m de altura significativa e também era proveniente de sudeste e sul-sudeste. A vazão do Rio Doce era de 1045 m³/s e o vento era leste-sudeste. A pluma de turbidez superficial calculada foi menor do que 8 NTU e, embora praticamente contínua ao longo da costa ao norte da foz do Rio Doce, ficou restrita a profundidades menores que 25 metros. Não há aqui como diferenciar se a continuidade observada foi de origem única da descarga do Rio Doce, se há a contribuição da descarga de outros rios (ex., Rio Itaúnas e São Mateus) ou mesmo considerar o efeito da ressuspensão de sedimento pelas condições meteo-oceanográficas vigentes. De qualquer forma, a reflectância no comprimento de onda 555 nm mostrou que a plataforma continental rasa (com menos de 25 metros de profundidade) apresentou valores de 10 e 30 vezes maiores do que aqueles calculados para a plataforma externa (profundidades maiores que 50 metros), resultando em uma água com uma diferente tonalidade (Figura 26).

O dia 6 de janeiro de 2016 apresentou uma clara continuidade na cor da água desde a foz do Rio Doce até o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. Esse sinal, no entanto, apresentou valores consideravelmente elevados na reflectância no comprimento de onda 555 nm e baixos valores de turbidez calculados (inferiores a 2 NTU). Isso sugere que o padrão observado nas imagens de cor verdadeira está mais associado à reflectância no comprimento de onda 555 nm do que com a turbidez superficial. Isso parece acontecer independentemente da estação do ano e resultar da ação das forçantes meteo-oceanográficas na hidrodinâmica da região. É importante pontuar que os resultados

aqui apresentados não fazem juízo de valor sobre o impacto que as condições descritas possam ter na biodiversidade do ambiente marinho.

Outra feição observada nos dados pretéritos que foi recorrente nos cenários apresentados, foi a formação de filamentos direcionados para o sul e sudeste a partir da foz do Rio Doce. Esses filamentos apresentaram turbidez e reflectância no comprimento de onda de 555 nm mais intensas em momentos de maior vazão do rio, sendo consequência do aporte fluvial no mar. Conforme mencionado anteriormente, a dispersão da pluma de turbidez associada à presença de sedimento suspenso foi menor do que a dispersão da pluma da reflectância no comprimento de onda 555 nm (a Figura 27, com dados dos dias 19 de dezembro de 2008 e 11 de fevereiro de 2015 exemplifica essas observações).

Associada à reflectância no comprimento de onda 555 nm possivelmente existiu uma maior biomassa de fitoplâncton. Os nutrientes transportados pelo Rio Doce, ao seguirem com os filamentos para sul, podem ter aumentado a capacidade de suporte ao fitoplâncton, proporcionando um aumento na biomassa desses organismos. Em uma análise estatística dos dados médios mensais de clorofila-a entre 2003 e 2013 na região costeira próxima à foz do Rio Doce, as funções ortogonais empíricas (EOFs) ratificam essa hipótese ao exibirem na segunda componente principal um sinal do espalhamento do aporte fluvial do Rio Doce na costa capixaba (Figura 27).

Figura 26: Imagens de turbidez calculada em NTU (esquerda), reflectância no comprimento de onda de 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) do dia 6 de janeiro de 2016 obtidas pelo sensor MODIS como exemplificação do comportamento de filamentos de água originados na foz do Doce com deslocamento para sul e sudeste entrando no Embaiamento de Tubarão. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA) e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNA). As isolinhas verdes (nas imagens à esquerda) e azuis (nas imagens à direita) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros. As isolinhas verdes e azuis delimitam o valor de turbidez 2 NTU. As linhas pretas cheias marcam as isóbatas de 25 e 50 metros.

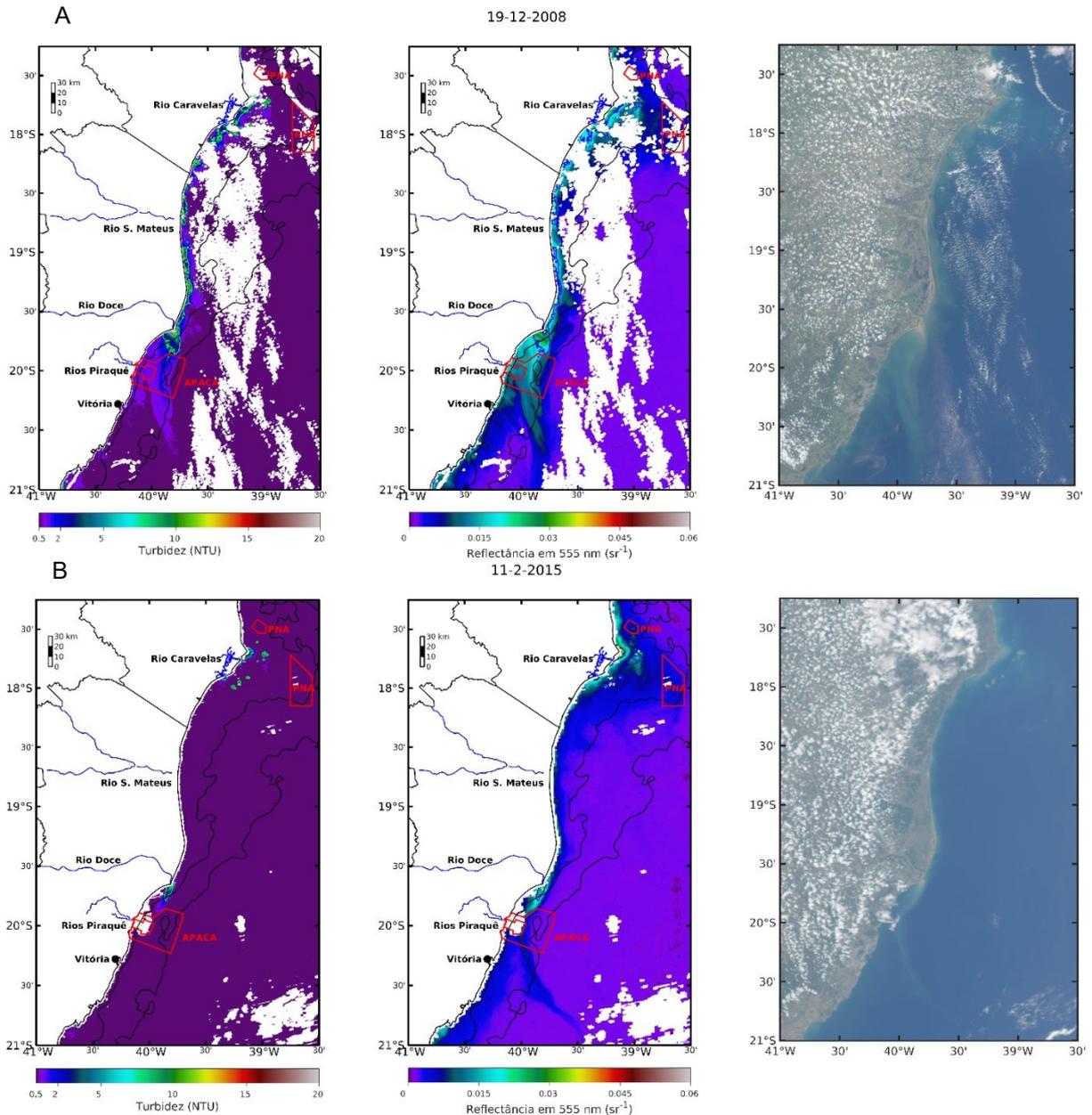
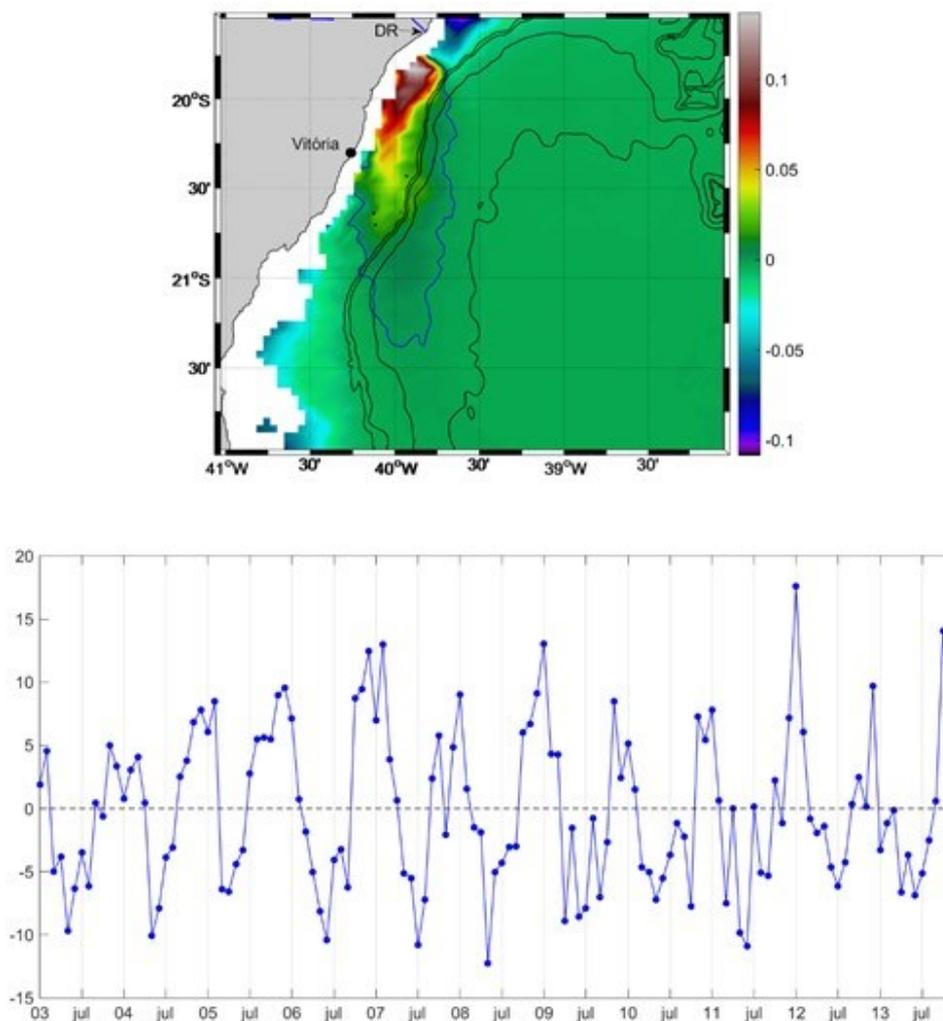


Figura 27: Segunda componente principal obtida por análise de funções ortogonais empíricas, responsável por 13,8% da variabilidade dos dados. Painel superior: Distribuição espacial da segunda componente principal. A isolinha azul representa o valor zero no campo espacial, as isóbatas são de 80, 200, 1000 e 2000 m e DR é a localização da foz do Rio Doce. Painel inferior: Distribuição temporal da segunda componente principal entre os anos de 2003 a 2013. Fonte: Fernandes (2015).



Fonte: autoria própria.

Pode-se avaliar a variabilidade associada à concentração de clorofila-a estimando-se os modos da EOFs. A significância dos modos identificados foi testada segundo a metodologia descrita por North et al. (1982), que indicou que apenas as componentes 1 e 2 da EOF foram bem discernidas, não havendo uma mistura relevante de informações entre elas. De acordo com Fernandes (2015), a feição mais significativa na distribuição espacial do modo 2 foi a presença de uma estrutura do tipo “gangorra” centrada, principalmente, na porção norte da plataforma continental e central do talude continental capixaba. Responsável por 13,8% da variabilidade total, o segundo modo estatístico mostra um núcleo na concentração de clorofila-a na região de espalhamento dos filamentos provenientes do aporte continental do Rio Doce, entre os meses de outubro e fevereiro de cada ano, isto é, no período chuvoso da região de interesse. Em relação ao primeiro modo estatístico regional, tem-se que este está associado ao próprio ciclo sazonal (estações do ano), tornando o aporte do Rio Doce o segundo processo físico mais importante na variabilidade regional de clorofila-a (Figura 27).

1.4 PERFILAGEM

Os dados de temperatura potencial, salinidade prática, turbidez, fluorescência e oxigênio dissolvido medidos por perfilagens de CTD durante as campanhas realizadas entre outubro de 2018 a fevereiro de 2019 serão apresentados divididos por campanhas (semestral, trimestral e mensais) e por subdivisões, quando se aplicar.

1.4.1 CAMPANHA SEMESTRAL

A Campanha Semestral teve duração de aproximadamente dois meses, com coletas feitas no período entre 22 de outubro a 16 de dezembro de 2018. Os resultados serão mostrados por regiões de coleta de acordo com a ordem de realização dos cruzeiros: APA Costa das Algas, Foz do Rio Doce, Região Norte (Itaúnas, Barra Nova e Degredo), Parque Nacional Marinho dos Abrolhos e Região Sul (Vitória e Guarapari).

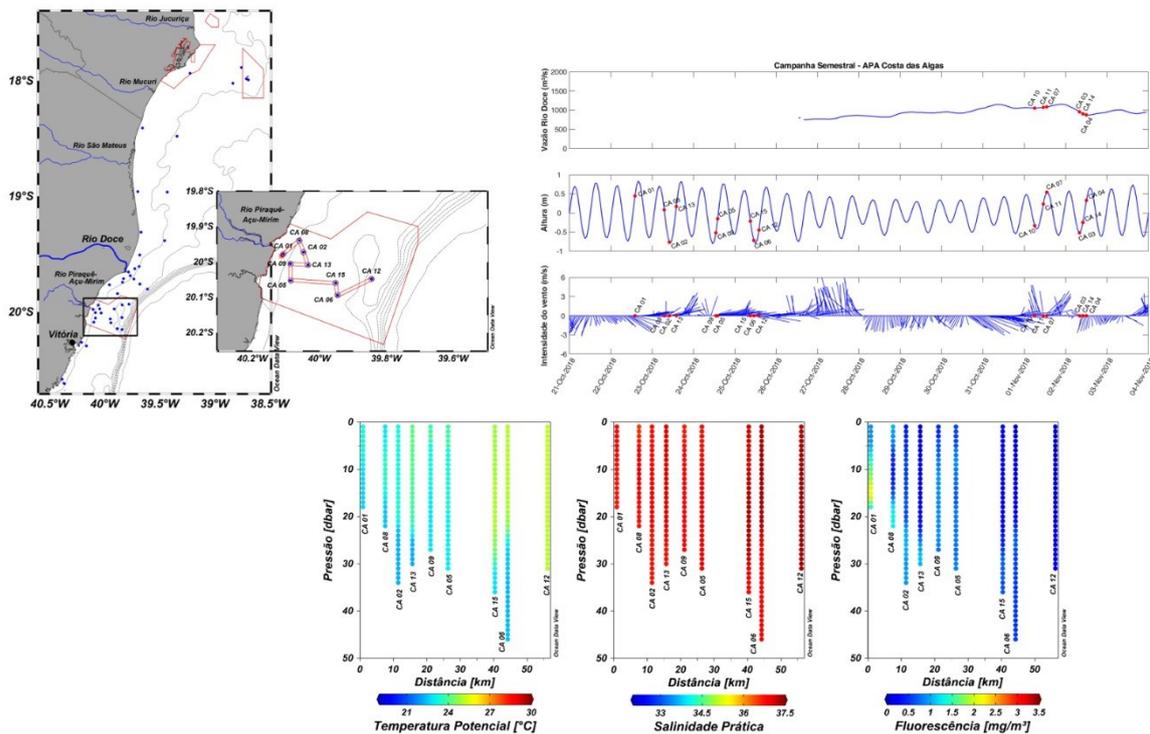
1.4.1.1 APA Costa das Algas

As coletas realizadas na Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APA Costa das Algas) foram realizadas entre os dias 22 de outubro e 02 novembro de 2018 e foram subdivididas em dois cruzeiros. A Figura 28 e a Figura 29 mostram os perfis verticais de Temperatura Potencial, Salinidade Prática, Fluorescência e Turbidez ao longo das estações amostrais no primeiro e no segundo cruzeiro da campanha semestral, respectivamente.

O primeiro cruzeiro (entre 22 e 25 de outubro de 2018) foi realizado sob a ação de ventos predominantes de leste e nordeste, exceto a primeira estação coletada (CA 01) que estava sob atuação de ventos sul. Nos pontos próximos à costa a coluna d'água se mostrou praticamente homogênea com temperatura superficial relativamente fria (em torno de 23°C) com variação máxima de 2°C entre a superfície e o fundo (CA 13). Seguindo para os pontos mais afastado da costa, houve o aumento da temperatura superficial (25°C) e a estratificação da coluna d'água ficou mais evidente (diferença de até 3°C entre a superfície e fundo no CA 06). A salinidade prática se apresentou com altos valores (acima de 37) e distribuídos de forma homogênea ao longo da coluna d'água e em todos os pontos coletados.

Basicamente, associadas às menores/maiores temperaturas observadas no ponto CA 01/CA 12 foram verificados os maiores/menores valores de fluorescência. O primeiro ponto (CA 01) está localizado próximo à costa e o segundo ponto (CA 12) mais afastado da costa.

Figura 28: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o primeiro cruzeiro da campanha semestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 21 de outubro e 03 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m^3) dos pontos amostrados durante o primeiro cruzeiro da campanha semestral.

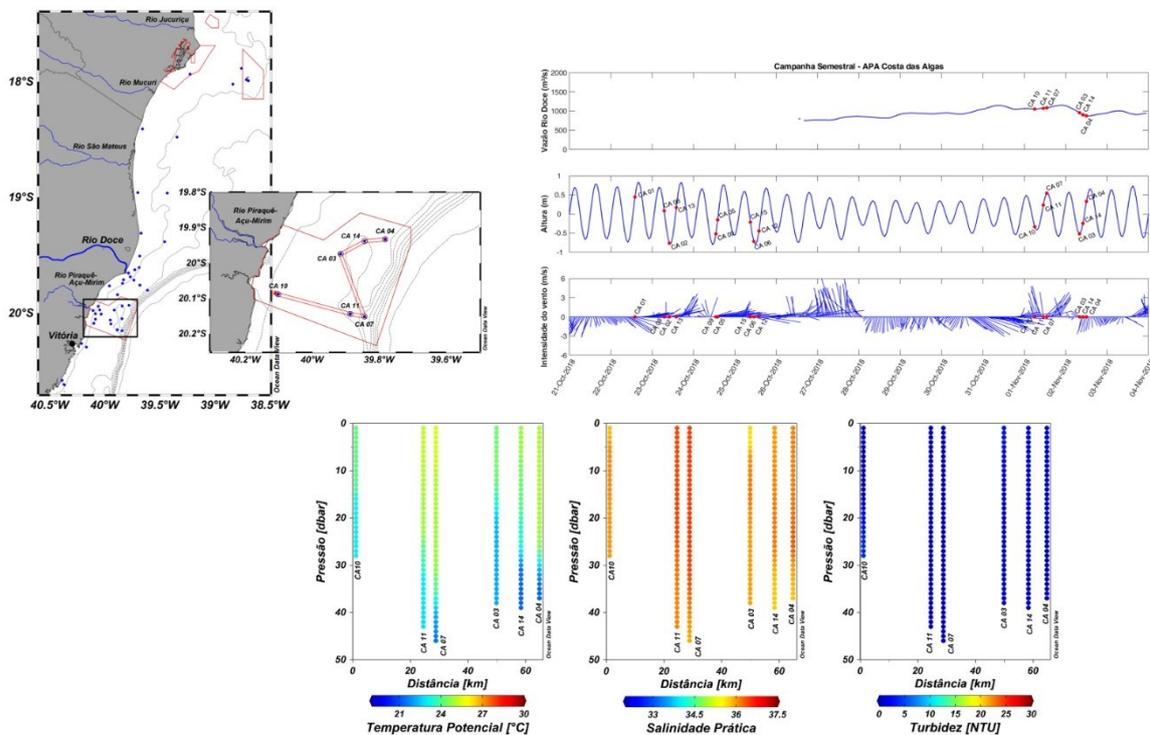


Fonte: autoria própria.

No segundo cruzeiro realizado nos dias 01 e 02 de novembro de 2018, os pontos coletados apresentaram o mesmo padrão térmico descrito nas estações amostradas durante o primeiro cruzeiro na APA Costa das Algas. Nesse caso, os pontos apresentaram uma estratificação da coluna d'água com uma variação de até $4^{\circ}C$ entre a superfície e fundo (CA 07). Nesse período, diferentemente do que foi observado no cruzeiro anterior, a salinidade apresentou menores valores (entre 35,7 e 36,5). Nas estações localizadas no sul da APA (CA 11 e CA 07) que foram amostradas sob condições de ventos do quadrante norte, apresentaram variações ao longo da coluna de água com a diminuição da salinidade com a profundidade. No entanto, as três estações localizadas no norte da APA Costa das Algas (CA 03, CA 14 e CA 04), amostradas sob condições de vento sul, e no ponto mais próximo à costa (CA 10), sob influência do vento do quadrante norte, a coluna d'água permaneceu homogênea e menos salina.

Os dados de fluorescência coletados no primeiro cruzeiro não puderam ser feitos no segundo cruzeiro. No entanto, nesse cruzeiro foram coletados dados de turbidez que apresentaram valores próximos a zero ao longo da coluna d'água em todas as estações amostradas.

Figura 29: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o segundo cruzeiro da campanha semestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 21 de outubro e 03 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m^3) dos pontos amostrados durante o segundo cruzeiro da campanha semestral.



Fonte: autoria própria.

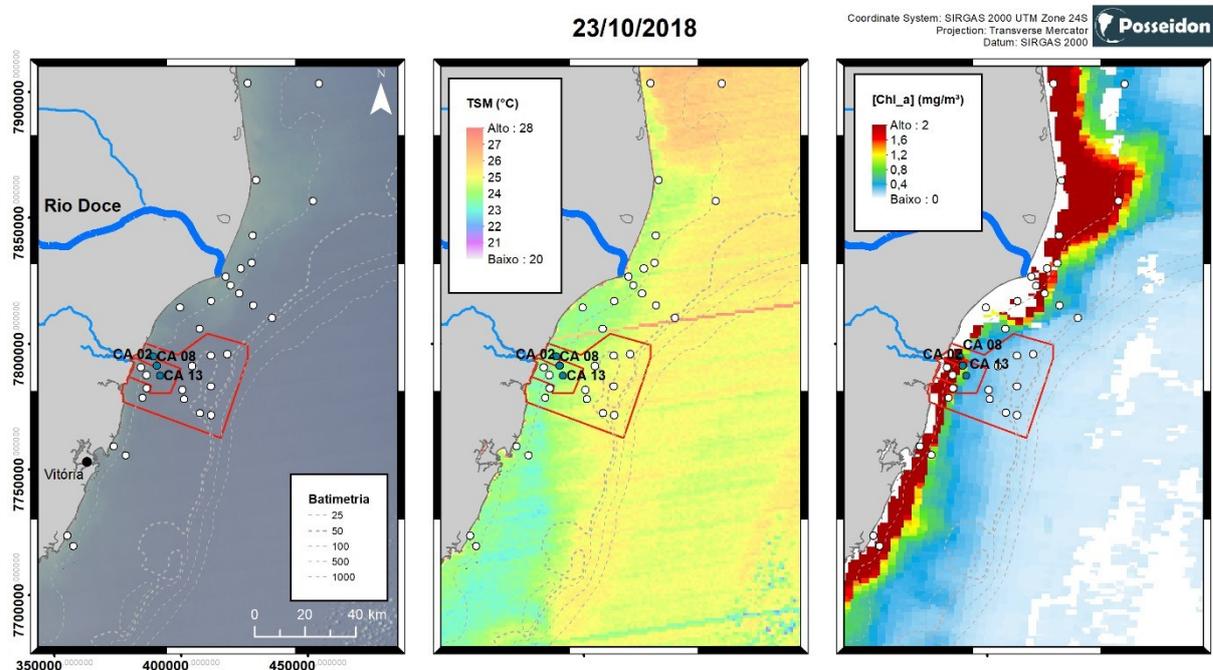
A Figura 30-A mostra a imagem de cor verdadeira do dia 23 de outubro de 2018 referente ao primeiro cruzeiro realizado na APA. Como foi observado nos dados de salinidade e turbidez obtidos *in situ*, não houve evidência da chegada do aporte fluvial do Rio Doce na APA Costa das Algas durante este período.

A imagem da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (Figura 30 B) mostrou a abrangência espacial da água mais fria ($> 24^{\circ}C$) associada ao processo de ressurgência que também foi registrado pelos dados *in situ*. Ambos os conjuntos de dados sugeriram que a isóbata de 30 m foi o limite batimétrico na região da APA, em que a coluna de água passou de homogênea e mais fria próxima à costa para estratificada nos pontos mais offshore. A imagem de concentração da Clorofila-a (Figura 30 C) mostrou

que os maiores valores estiveram associados à plataforma continental interna, onde as águas mais profundas ricas em nutrientes ressurgem, corroborando os dados de fluorescência *in situ*.

Durante o segundo cruzeiro não foi possível obter os dados de sensoriamento remoto devido à alta cobertura de nuvens associada à entrada de frente fria. Durante esse evento, atuaram ventos sul, chuvas e ondas que podem ter promovido uma mistura vertical. Juntamente com o processo de ressurgência, podem justificar a mudança ocorrida no padrão de salinidade.

Figura 30: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a (C) obtidas no dia 23 de outubro de 2018 pelo sensor Aqua/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco nas figuras são referentes à presença de nuvens.

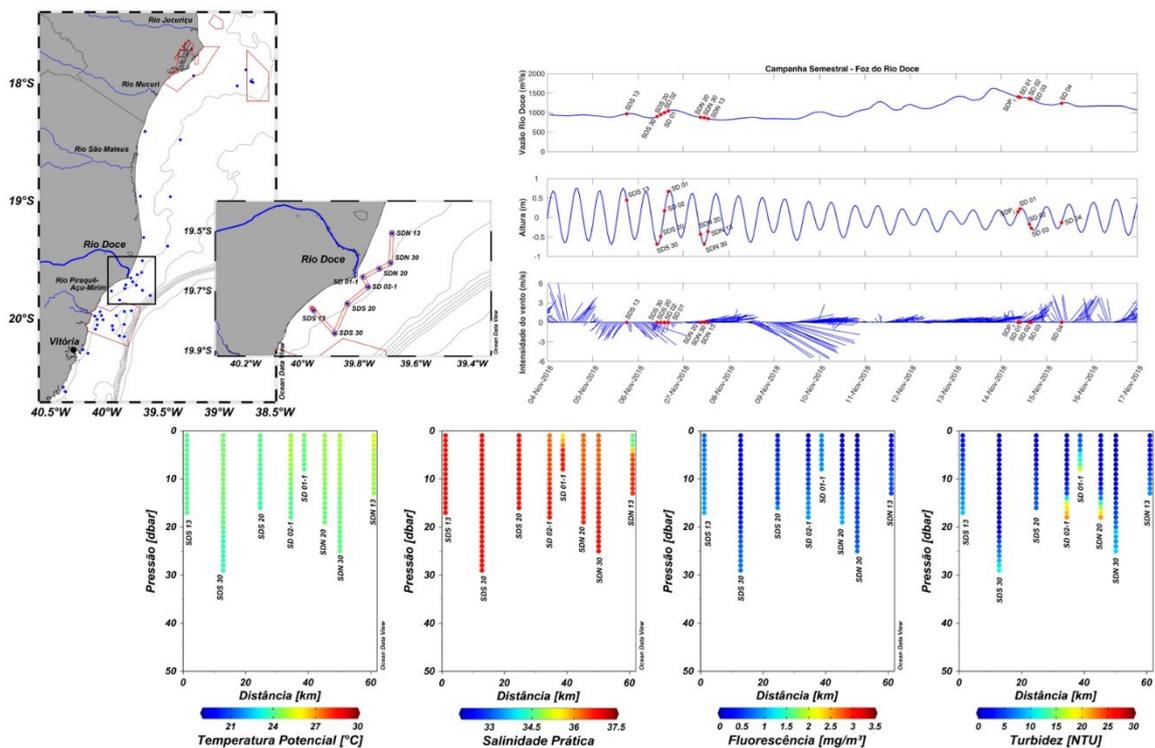


Fonte: autoria própria.

1.4.1.2 Foz do Rio Doce (pontos SDS, SD e SDN)

As coletas na Foz do Rio Doce aconteceram entre os dias 05 e 15 de novembro de 2018, com exceção do ponto SD 05 que foi coletado no dia 05 de dezembro de 2018. Assim como na APA Costa das Algas, essas coletas foram subdivididas em dois cruzeiros. As Figura 31 e Figura 33 mostram os perfis verticais de Temperatura Potencial, Salinidade Prática, Fluorescência e Turbidez amostrados no terceiro e no quarto cruzeiro da campanha semestral, respectivamente.

Figura 31: : Pannel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o terceiro cruzeiro da campanha semestral (Foz do Rio Doce). Pannel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m³/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 04 e 16 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Pannel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m³) dos pontos amostrados durante o terceiro cruzeiro da campanha semestral



Fonte: autoria própria.

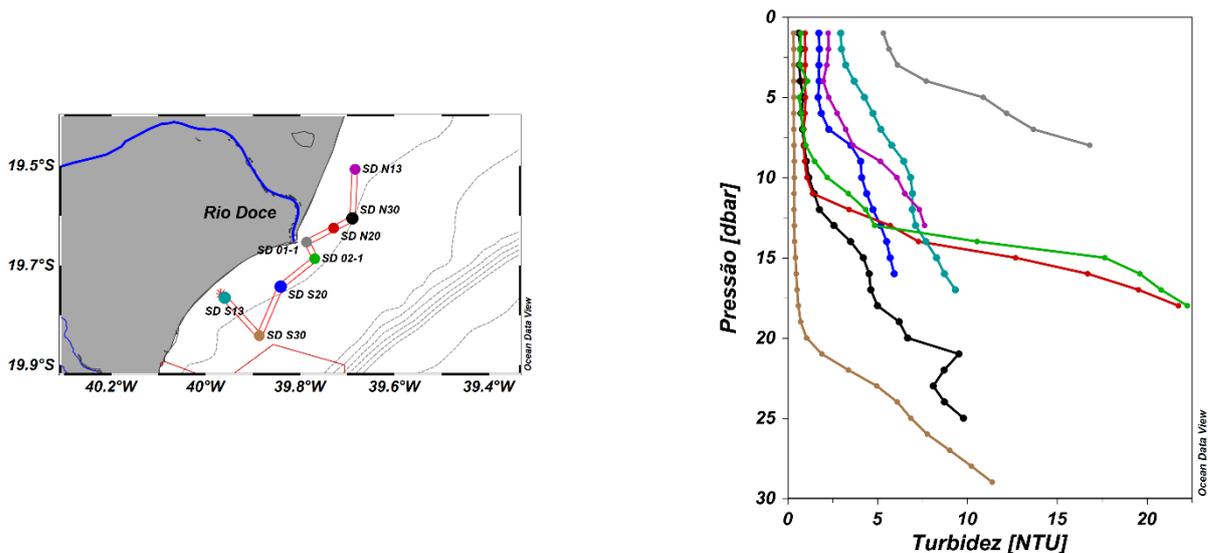
No primeiro cruzeiro na Foz do Rio Doce (05 a 07 de novembro) foram coletados os pontos paralelos à costa, que incluem os pontos ao sul (SDS), ao norte (SDN) e os dois pontos mais próximos à desembocadura do Rio Doce do transecto perpendicular à costa (SD 01-1 e SD 02-1).

Sob a influência de ventos do quadrante sudeste e leste e maré de sizígia, o padrão vertical de temperatura apresentou valores praticamente homogêneos ao longo da coluna d'água com variação de no máximo 1°C (SDS 30 e SDN 13) entre a superfície e o fundo. Essa variação de 1°C também ocorreu no padrão horizontal da temperatura superficial, ou seja, entre o ponto mais ao norte (SDN 13) e o ponto mais ao sul (SDS 30) ao longo da costa na região da foz do Rio Doce.

Os menores valores de salinidade foram observados nos pontos SD 01-1 e SDN 13, chegando a 35,6 e 34,6, respectivamente. Isso foi um indício de que a água menos salina proveniente da foz do Rio Doce estava sendo transportada para norte no momento da amostragem.

O ponto SD 01-1 apresentou o maior valor de turbidez na superfície (5,3 NTU) seguido pelos pontos SDS 13 (2,9 NTU), SDN 13 (2,2 NTU) e SDS 20 (1,7 NTU), os demais pontos apresentaram valores inferiores a 1 NTU. Contudo, os valores de turbidez aumentaram com a profundidade atingindo os valores máximos junto ao fundo, sobretudo nos pontos SD 02-1, SDN 20 e SD 01-1(Figura 32).

Figura 32: Painel esquerdo: mapa com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o terceiro cruzeiro da campanha semestral (Foz do Rio Doce). Painel direito: distribuição vertical da Turbidez (NTU) nas estações amostrais realizadas na região da Foz do Rio Doce.



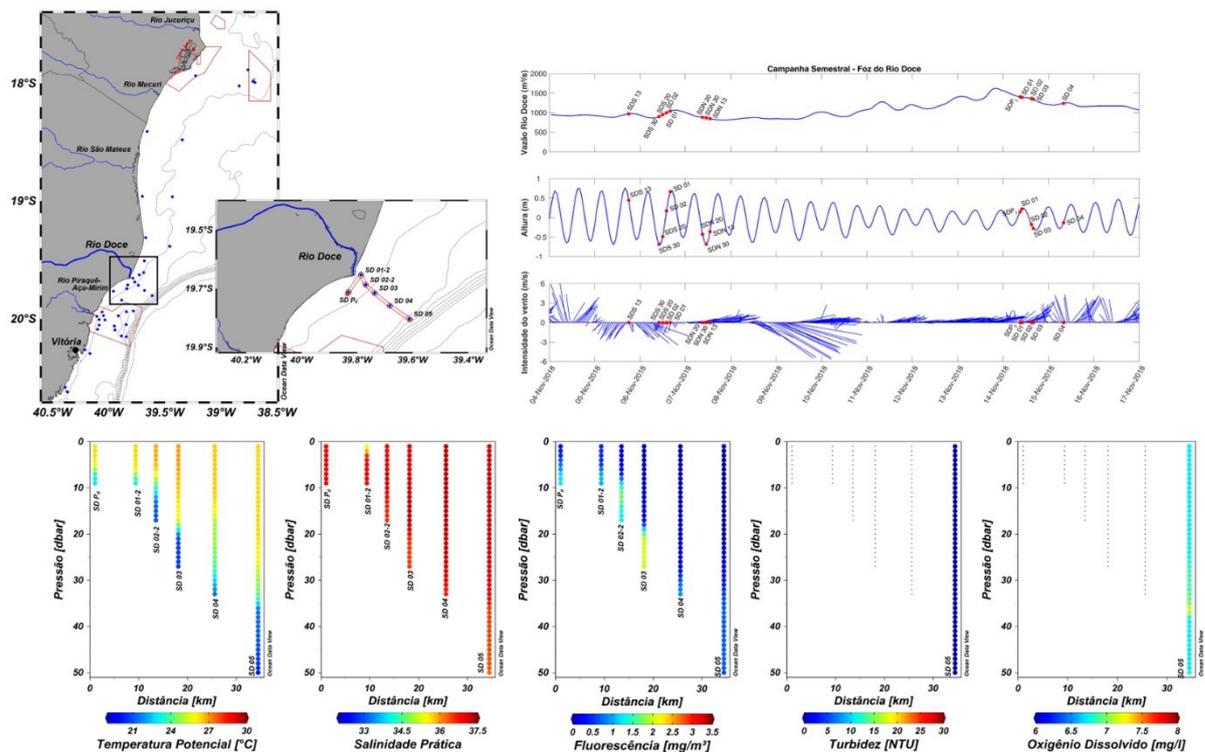
Fonte: autoria própria.

A fluorescência apresentou maiores concentrações (valores em torno de 1 mg/m^3) ao longo de toda a coluna d'água em frente à desembocadura (SD 01-1). Nos demais pontos, esses valores foram encontrados somente junto ao fundo, exceto nos pontos mais ao norte (SDN 30 e SDN 13) onde toda a coluna d'água permaneceu com valores nulos.

Apesar das imagens de satélite não estarem disponíveis neste período devido à cobertura de nuvens, a entrada de frente fria acompanhada com a atuação de ventos predominantemente do quadrante sul (Figura 31) sugeriu que a pluma de água menos salina estava sendo advectada para o norte, como registrado nos dados obtidos por CTD.

No segundo cruzeiro na Foz do Rio Doce realizado nos dias 14 e 15 de novembro de 2018 sob a ação de ventos nordeste após uma permanência de ventos de leste, uma forte estratificação da coluna d'água ficou evidente ao longo do transecto perpendicular à foz do Rio Doce (Figura 33). Nesse período ocorreu uma variação de temperatura entre a superfície e o fundo de até aproximadamente 7°C nos três pontos mais distantes da costa. A distribuição da temperatura ao longo da seção evidenciou um processo de ressurgência imaturo nessa região, ou seja, a água mais fria entrou na plataforma continental interna, mas não aflorou à superfície, ao contrário do que foi registrado na pernada anterior.

Figura 33: Pannel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o quarto cruzeiro da campanha semestral (Foz do Rio Doce). Pannel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 04 e 16 de novembro de 2018. Os círculos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento da coleta de dados do cruzeiro descrito. Pannel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática e Fluorescência (mg/m^3) dos pontos amostrados durante o quarto cruzeiro da campanha semestral.



Fonte: autoria própria.

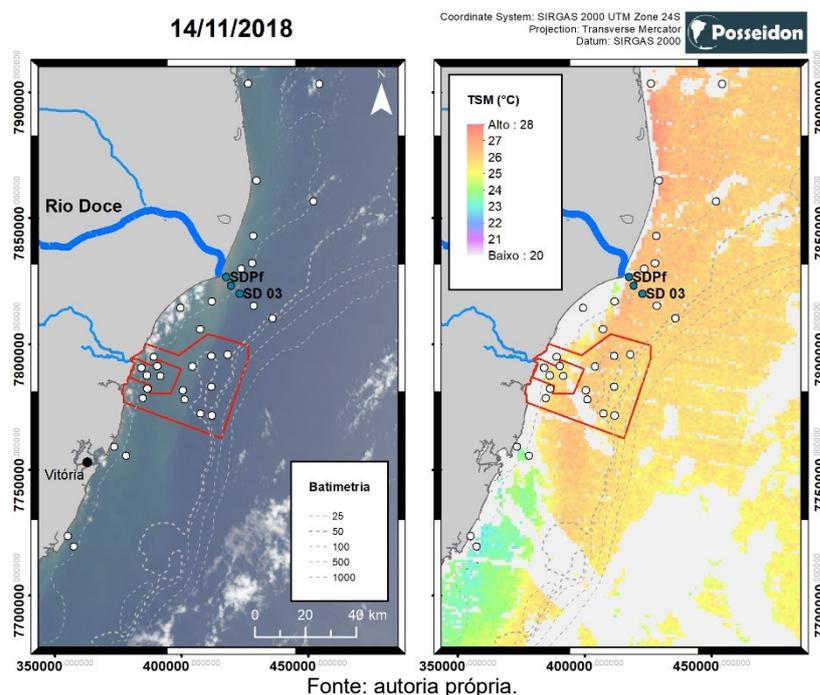
Uma água menos salina (35,5) foi amostrada na porção superficial do ponto em frente à desembocadura do Rio Doce (SD 01-2). Durante esse período, a vazão apresentou valores mais altos (média diária: $1378,40 m^3/s$) em relação à pernada anterior (média diária: $1198,32 m^3/s$) e os ventos atuantes foram predominantemente de nordeste. Mesmo assim, a água menos salina associada ao aporte fluvial do Rio Doce não teve uma maior abrangência sobre a plataforma continental como poderia ser esperado nessas condições.

Os maiores valores de fluorescência (entre 1 e $2 mg/m^3$) estiveram diretamente associados às temperaturas menores do que $25^{\circ}C$. Nessa pernada não foram coletados dados de turbidez, com exceção do SD 05, que apresentou valores iguais a zero ao longo de toda a coluna de água. Contudo, nesse ponto foi realizada a coleta de oxigênio dissolvido, onde foi possível identificar um aumento do oxigênio dissolvido no meio da coluna de água com valores máximos de $7 mg/L$ em 37 dbar.

O sensoriamento remoto mostrou, através da imagem da cor verdadeira (Figura 34 A), o deslocamento no sentido sudoeste da pluma de sedimentos do Rio Doce, passando pelo ponto SD 01-2 onde foi

registrado a mínima salinidade nos dados de CTD. A imagem de TSM (Figura 34 B) mostrou que não houve a presença de águas mais frias na superfície ao longo do transecto perpendicular ao rio, corroborando os dados *in situ* que amostraram essas águas junto ao fundo sobre a plataforma continental interna sem aflorar à superfície.

Figura 34: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) obtidas no dia 14 de novembro de 2018 pelo sensor Terra/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco nas figuras são referentes à presença de nuvens.



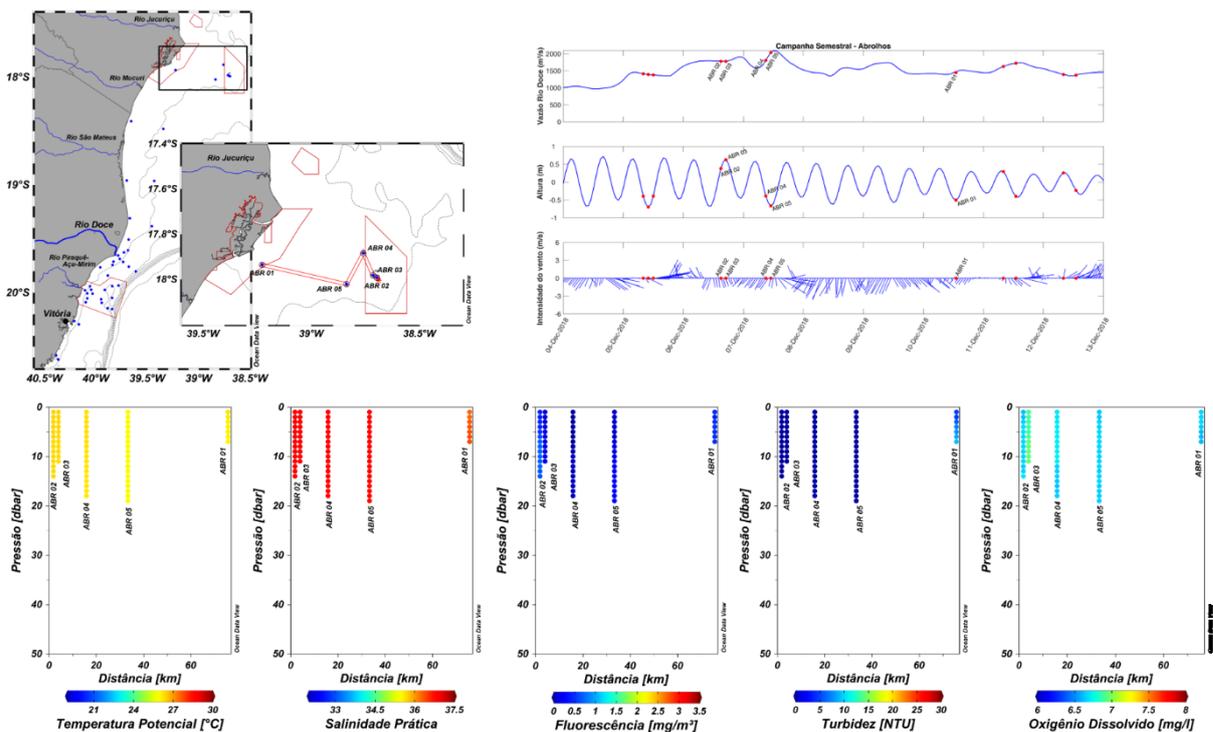
Fonte: autoria própria.

Na campanha semestral foram coletados 3 pontos extras na região da Foz do Rio Doce. A coleta do primeiro ponto extra (SDPf - 14 de novembro de 2018) se mostrou necessária devido à detecção visual da pluma de sedimentos oriunda do Rio Doce. Nesse ponto foi identificada uma estratificação térmica da coluna d'água de 3°C (23°C no fundo e 26°C na superfície), distribuição de salinidade verticalmente homogênea e aumento de fluorescência na porção inferior ocupada pela água mais fria no fundo. Os pontos SD 01-2 e o SD 02-2 amostrados novamente foram considerados extras. Essas observações foram realizadas em função do aumento da vazão observado no período de coleta. Nesses dois pontos foi observada uma estratificação térmica vertical de até 6°C, o dobro do observado na pernada anterior com, novamente, as maiores concentrações de fluorescência associados à ocorrência da água mais fria. Somente no ponto SD 01-2 foi observada água menos salina na superfície, possivelmente porque as observações foram realizadas sob a influência de maré de quadratura, apesar de ser em condição de vazante (Figura 34). Devido a problemas operacionais, nesta campanha não foram coletados dados de turbidez e oxigênio dissolvido para que pudesse ser feita uma comparação com as coletas anteriores.

1.4.1.3 Parque Nacional Marinho dos Abrolhos

As atividades de coleta na região do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PARNAMAR dos Abrolhos) foram iniciadas no dia 06 de dezembro de 2018 e finalizadas no dia 10 de dezembro de 2018 com a coleta no ponto mais próximo à costa. As distribuições verticais dos parâmetros coletados estão mostradas na Figura 35.

Figura 35: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o quinto cruzeiro da campanha semestral (PARNAMAR dos Abrolhos). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 04 e 12 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o quinto cruzeiro da campanha semestral.

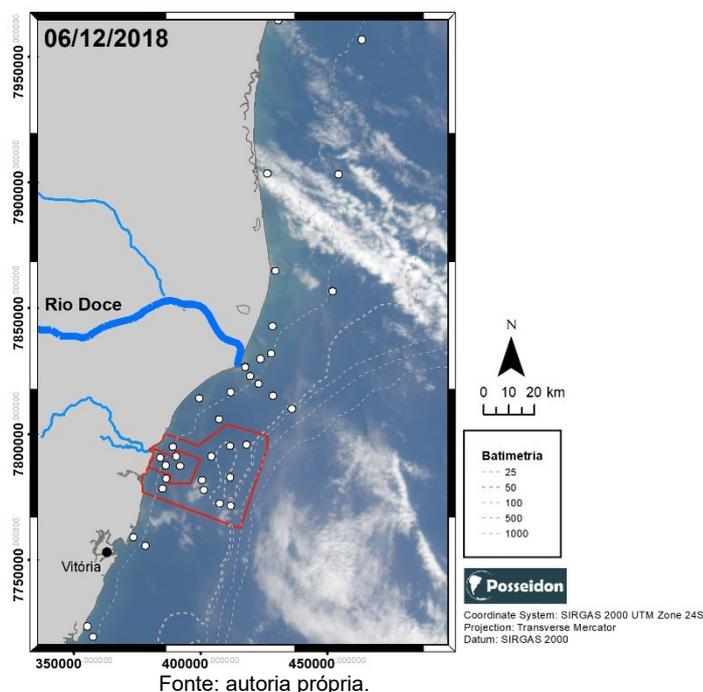


Fonte: autoria própria.

Em todos os pontos amostrados a coluna d'água estava homogênea, com altas temperaturas (em torno de $26^{\circ}C$) e altos valores de salinidade (superiores a 36,2). A turbidez e a fluorescência apresentaram valores significativamente pequenos, próximos a zero, com exceção do ponto ABR 02 (com concentração de fluorescência de $0,6mg/m^3$) e no ponto ABR 01 onde a turbidez apresentou valor de 9 NTU junto ao fundo. Este ponto é o mais costeiro (profundidade de até 10 m) e está localizado entre as fozes do Rio Mucuri e do Rio Caravelas. Nesse cruzeiro foram coletados dados de oxigênio dissolvido que não apresentaram variações ao longo da coluna d'água, com valores em torno de $6,6 mg/l$, exceto no ponto ABR 03 onde alcançou $6,9 mg/l$.

Ao longo da realização desse cruzeiro, a vazão do Rio Doce estava significativamente alta (até 2100 m³/s), com permanência de ventos sul, uma condição característica de atuação de frente fria, normalmente associados a maiores alturas de ondas. Na imagem da cor verdadeira do dia 06 de dezembro de 2018 se observou um padrão em tom de verde associado às menores profundidades na porção ao norte da foz do Rio Doce (Figura 36). Uma associação direta e simples deste padrão como resultado do input de sedimentos oriundos da descarga do Rio Doce é questionável, até porque os dados observacionais não sustentam essa relação. Essa questão foi discutida mais amplamente no Seção 1.3 relacionado ao sensoriamento remoto.

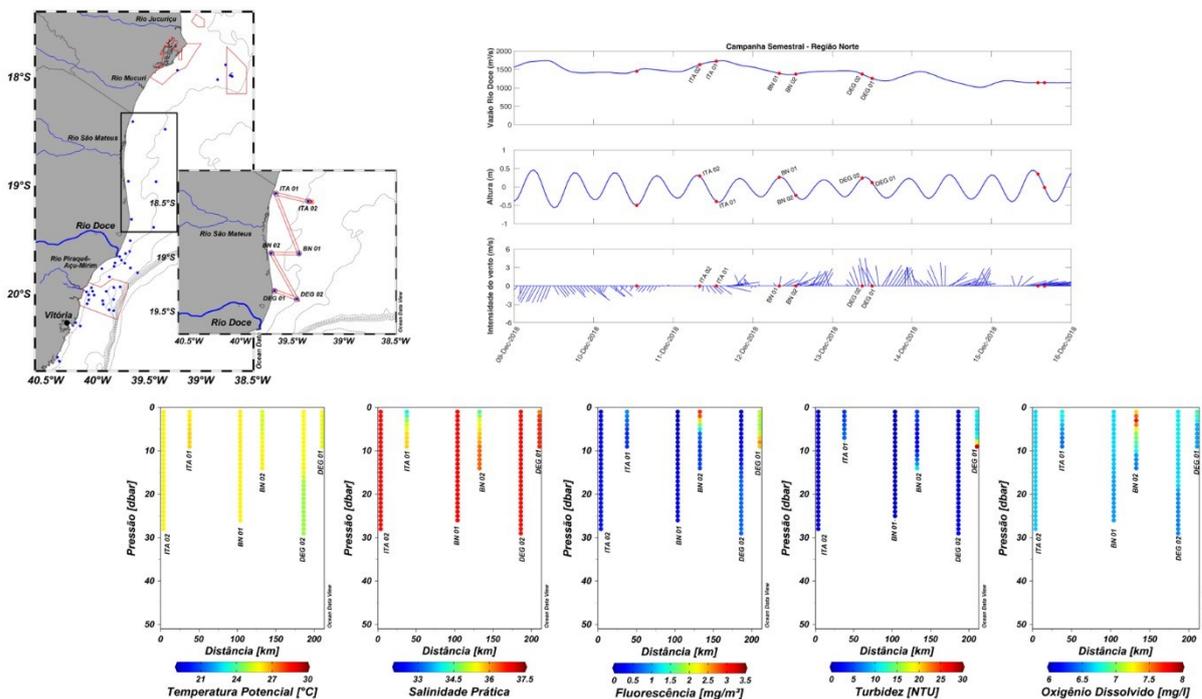
Figura 36: Imagem da cor verdadeira obtida no dia 06 de dezembro pelo sensor Aqua/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco nas figuras são referentes à presença de nuvens.



1.4.1.4 Região Norte (Itaúnas, Barra Nova e Degredo)

As coletas realizadas ao norte da Foz do Rio Doce (estações amostrais ao longo de Itaúnas, Barra Nova e Degredo) foram realizadas entre os dias 11 e 13 de dezembro de 2018. As observações foram realizadas de norte para sul e o resultado dessas perfilagens é mostrado na Figura 37.

Figura 37: Pannel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o sexto cruzeiro da campanha semestral (Região Norte). Pannel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 09 e 16 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Pannel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o sexto cruzeiro da campanha semestral.



Fonte: autoria própria.

Distintamente das coletas realizadas na região do PARNAMAR dos Abrolhos, neste período a vazão do Rio Doce estava abaixando e houve a inversão na direção dos ventos de sul nas estações ITA 01 e ITA 02 para nordeste em BN 01 e BN 02 e para norte em DEG 01 e DEG 02. Nas estações amostradas, observou-se uma coluna d'água relativamente homogênea com diferenças de até $1^{\circ}C$ entre a superfície e o fundo (DEG 02). Nas estações mais rasas, a salinidade superficial apresentou um sinal característico de influência de água menos salina com valores mínimos de até 34 (ITA 01). A associação direta da presença dessa água menos salina à influência da descarga do Rio Doce foi prejudicada pelo esquema de coleta realizado no sentido do deslocamento da corrente, isto é, de norte para sul. Finalmente, deve-se especular a potencial contribuição da descarga dos Rios São Mateus, Mucuri e Caravelas durante o período de coleta devido às fortes chuvas nessa região que podem ter aumentado vazão. Porém, não foram encontradas informações disponíveis sobre a descarga continental desses rios.

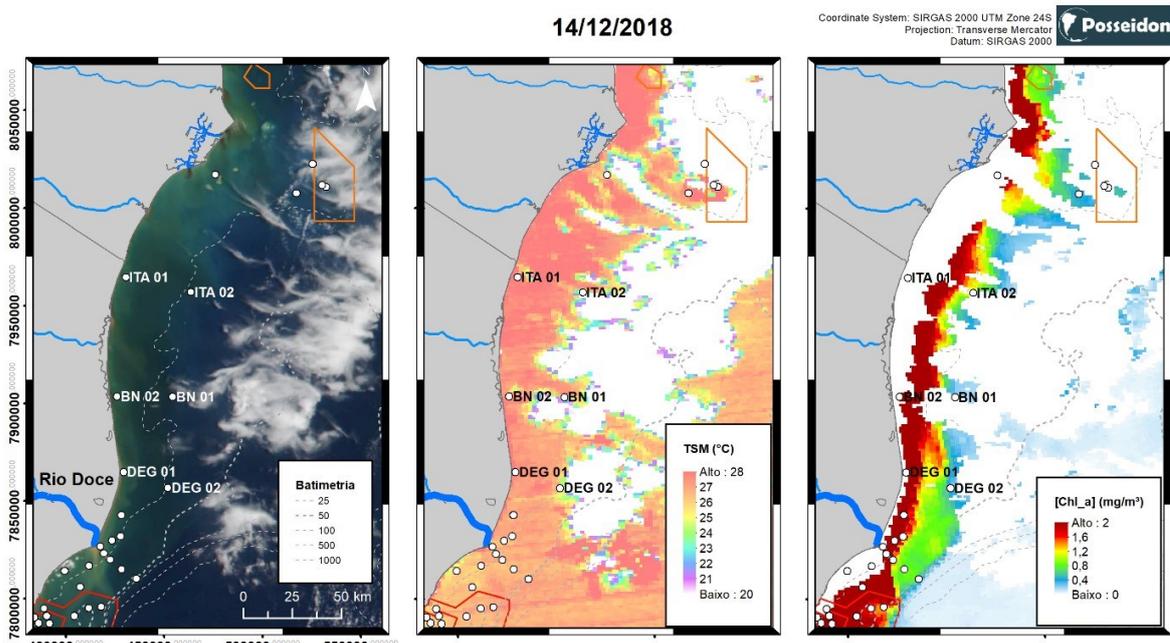
Neste cruzeiro, os valores mais altos de fluorescência estiveram associados aos pontos mais próximos à costa, principalmente na porção superficial da coluna de água do ponto mais costeiro de Barra Nova ($2,9 mg/m^3$), onde ocorreu também a máxima concentração de oxigênio dissolvido ($7,7 mg/l$). O ponto

costeiro de Degredo apresentou altos valores de fluorescência ($1,9 \text{ mg/m}^3$) em toda a coluna d'água atingindo o maior valor no fundo ($2,6 \text{ mg/m}^3$), onde também foi registrado o maior valor de turbidez (28 NTU).

A primeira imagem disponível após a passagem da frente fria foi a do dia 14 de dezembro de 2018 (Figura 38). A imagem da cor verdadeira (Figura 38 A) foi bastante ilustrativa e salienta alguns aspectos importantes. Foi nítido o padrão de coloração distinto claramente restrito às profundidades menores que 25 m. As cores amarronzadas ficaram restritas às porções muito próximas à desembocadura dos rios, passando para tons mais esverdeados em maiores profundidades. A ressuspensão de sedimentos nos pontos costeiros da região ao norte do Rio Doce devido à tensão de cisalhamento do vento e a atuação de ondas de maior amplitude (dado registrado no fundeios e discutido no Seção 1.5) associada à passagem da frente fria pode explicar uma forte correlação com o padrão observado. Destaca-se aqui, ainda, que sob a influência de ventos N/NE (Figura 37) no dia 14 de dezembro de 2018, a cor amarronzada oriunda da descarga do Rio Doce se dirige para sul (Figura 38).

A imagem da TSM (Figura 38 B) mostrou a área de estudo sem o desenvolvimento da ressurgência costeira, com a diminuição de 1°C entre as estações de Itaúnas e de Degredo. A imagem da concentração da Clorofila-a (Figura 38 C) mostrou uma maior produtividade biológica nos pontos mais próximos a costa, assim como reportado pelos dados de CTD. Essas imagens foram obtidas após as coletas terem sido finalizadas, mas, se considerarmos que os processos oceânicos se mantiveram constantes nestes dois ou três dias, os dados observacionais indicaram um aumento da fluorescência na superfície do oceano ao invés da turbidez que aumentou junto ao fundo.

Figura 38: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a (C) obtidas no dia 14 de dezembro de 2018 pelo sensor Terra/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.



Fonte: autoria própria.

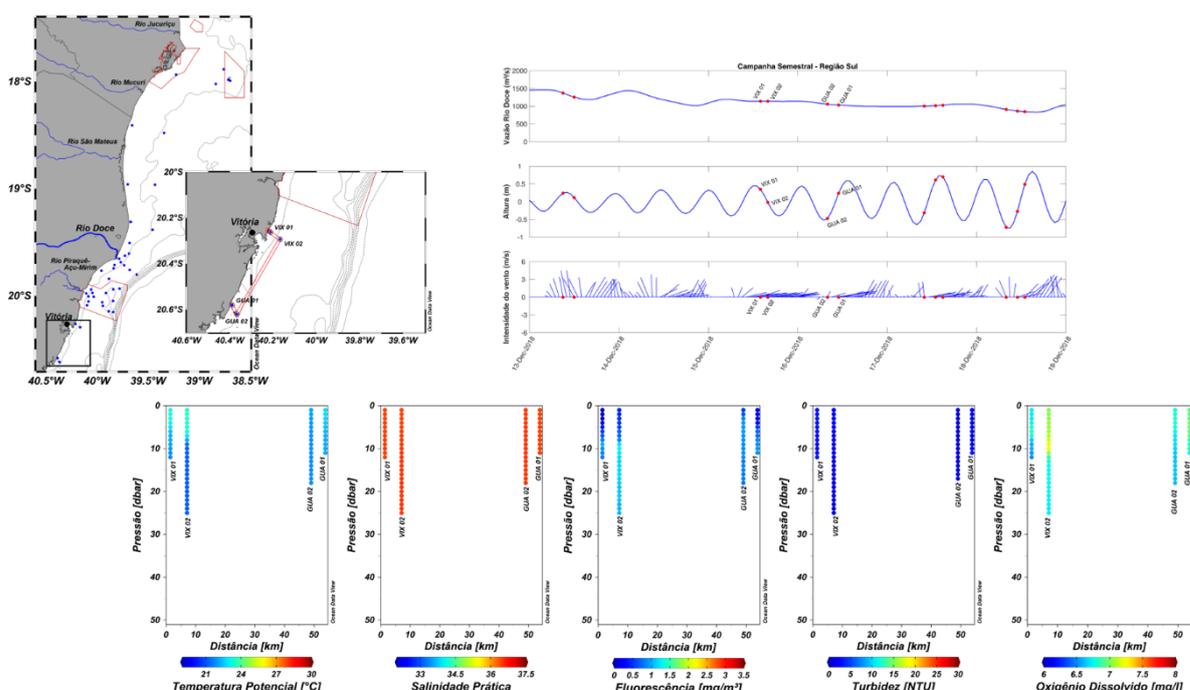
1.4.1.5 Região Sul (Vitória e Guarapari)

O último cruzeiro da campanha semestral foi realizado nos pontos mais ao sul da área de estudo (Vitória e Guarapari) nos dias 15 e 16 de dezembro de 2018. A distribuição vertical dos parâmetros amostrados está ilustrada na Figura 39.

De forma geral, esses quatro pontos se apresentaram mais frios ($T < 23,5^{\circ}\text{C}$) do que o restante dos pontos amostrados. Nos dois pontos localizados em Vitória foi observado uma variação de $1,5^{\circ}\text{C}$ entre a superfície ($23,5^{\circ}\text{C}$) e o fundo (21°C). Nos pontos de Guarapari, a temperatura permaneceu homogênea em torno de 22°C .

Associado às águas mais frias ($T > 22^{\circ}\text{C}$), foi verificado um aumento nas concentrações de fluorescência e diminuição na concentração de oxigênio dissolvido (valores menores do que $6,7\text{ mg/l}$). O padrão de salinidade ficou verticalmente homogêneo em $36,4$ e os valores de turbidez variaram entre 1 e 3 NTU , exceto para o ponto GUA 02 que apresentou valores mais baixos entre $0,6$ e $0,8\text{ NTU}$.

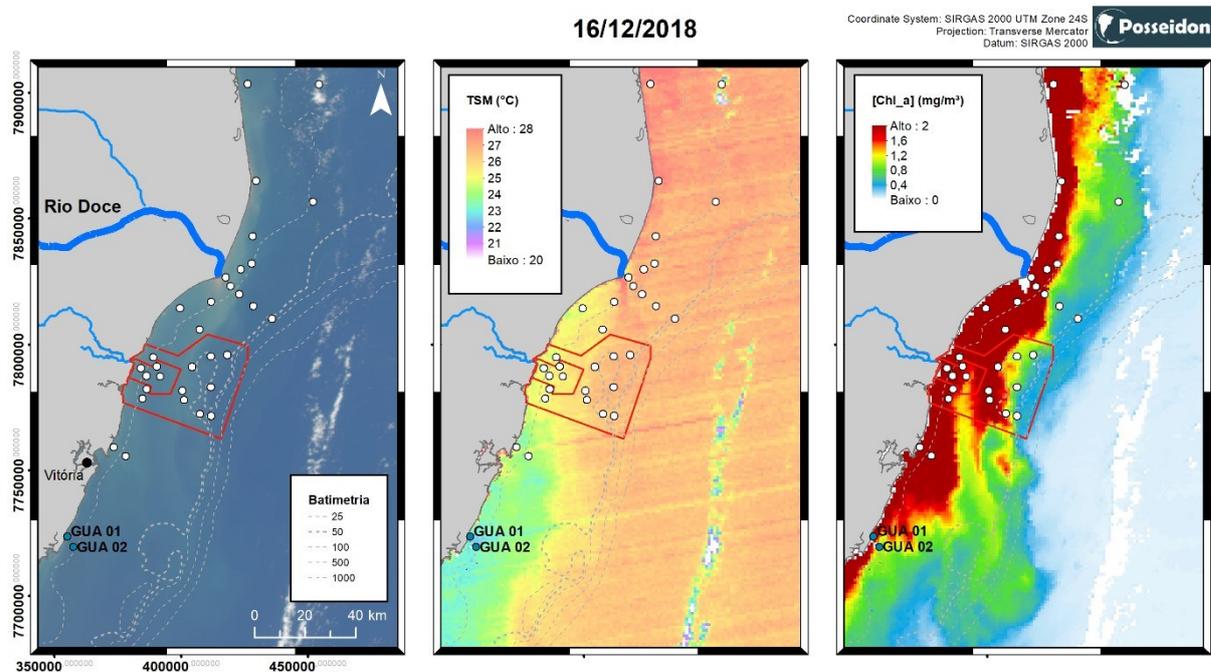
Figura 39: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o sétimo cruzeiro da campanha semestral (Região Sul). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 13 e 18 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o sétimo cruzeiro da campanha semestral.



Fonte: autoria própria.

A imagem da cor verdadeira do dia 16 de dezembro de 2018 (Figura 40 A) mostrou um padrão diferenciado na cor verdadeira na região ao sul da foz do Rio Doce, com a aproximação do sinal do aporte fluvial à costa. Esse padrão foi ratificado tanto pela distribuição de TSM quanto pela concentração de clorofila-a. Os dados coletados nas estações de GUA 01 e GUA 02 revelaram baixos valores de turbidez e temperatura por estarem localizados claramente na área sob a influência de um processo de ressurgência costeira madura (Figura 40 B), isto é, a entrada de uma água mais fria sobre a plataforma continental com afloramento na sua parte mais interna. Esse processo foi favorecido pela constante atuação dos ventos do quadrante norte seguida por uma inversão para leste.

Figura 40: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a (C) obtidas no dia 16 de dezembro de 2018 pelo sensor Aqua/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.



Fonte: autoria própria.

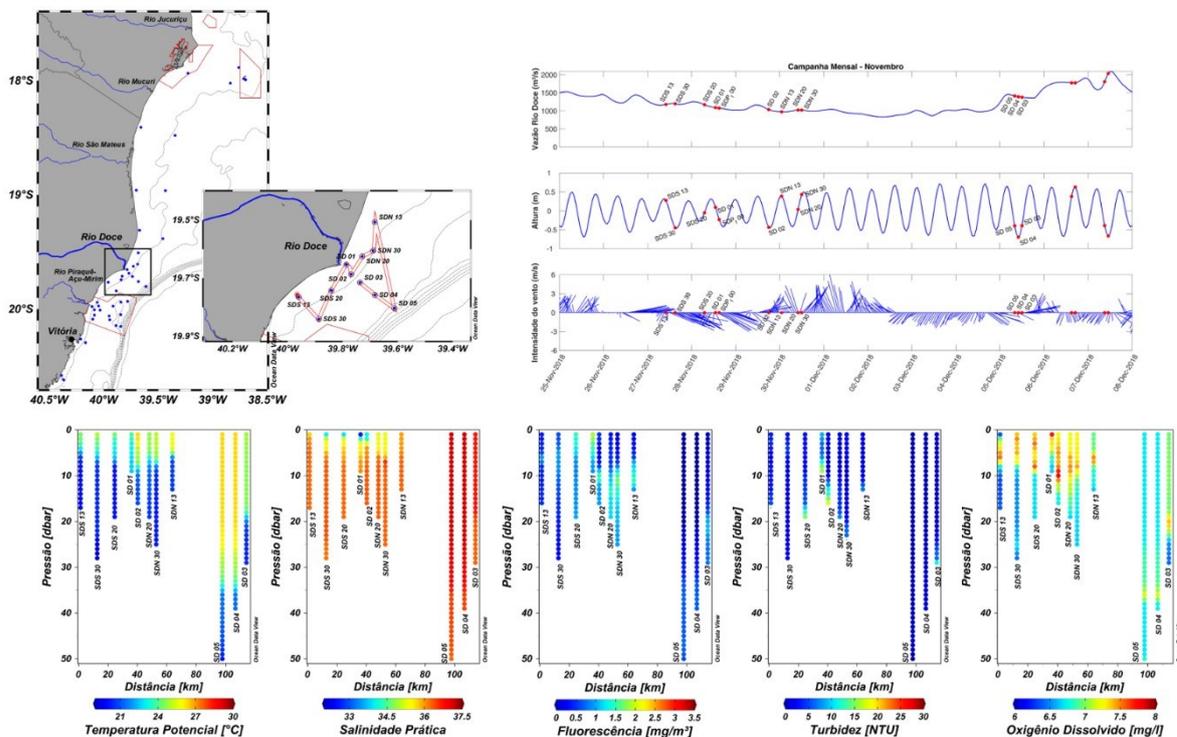
1.4.2 CAMPANHA MENSAL NOVEMBRO

A Campanha Mensal de Novembro foi realizada entre os dias 27 de novembro e 05 de dezembro de 2018 e abrangeu as estações localizadas no entorno da foz do Rio Doce, isto é, tanto ao norte, perpendicular e ao sul dela (pontos SDN, SD e SDS). A Figura 41 mostra a distribuição vertical dos parâmetros coletados.

Os pontos de amostragem localizados ao sul da foz apresentaram temperaturas superficiais mais frias ($T \sim 24^{\circ}\text{C}$) aumentando a temperatura em direção ao norte ($T \sim 25^{\circ}\text{C}$). O mesmo padrão foi observado para os pontos localizados mais próximos à costa (T mínima de $23,9^{\circ}\text{C}$) em relação as estações mais offshore (T máxima de $26,4^{\circ}\text{C}$). Em todas as estações amostradas foi observada uma coluna d'água

estratificada térmicamente, com a presença de uma água mais fria junto ao fundo ao longo de toda a plataforma continental. A máxima diferença vertical de temperatura entre a superfície e o fundo chegou a 6°C na estação SDS 30.

Figura 41: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de novembro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias entre os dias 25 de novembro e 07 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de novembro.



Fonte: autoria própria.

Nesse período de coleta, a presença de uma água menos salina foi observada superficialmente em todos os pontos próximos a costa, tanto para norte quanto para sul da foz do rio, com valores entre 32,6 (SD 01, localizado em frente a desembocadura) e 35,9 (SDN 13). A inversão do padrão de ventos ao longo do cruzeiro pode ter colaborado para isso, pois a atuação de ventos de leste com inversão para ventos do quadrante sul foi verificada enquanto estavam sendo coletados os pontos ao sul da foz. Já os pontos ao norte da foz foram coletados sob condição de ventos do quadrante norte. A presença dessa água menos salina na superfície não foi observada nos pontos mais afastados da costa (SD 03, SD 04 e SD 05), onde a salinidade esteve praticamente homogênea ao longo da coluna d'água refletindo a presença de Águas Tropicais com uma pequena diminuição da salinidade em direção ao fundo em função do processo de ressurgência (valores abaixo de 36,6).

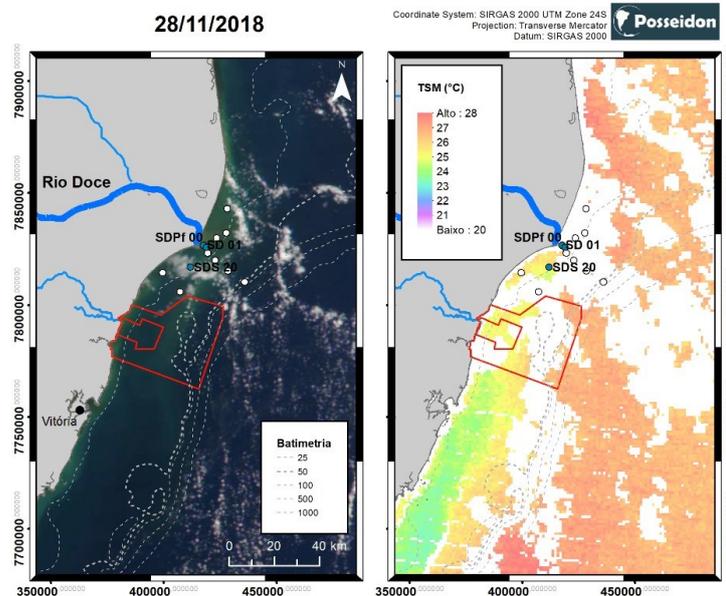
A distribuição da fluorescência tendeu a ser maior na porção superficial da coluna d'água nas estações ao sul da foz do rio e no SD 01 e no estrato inferior da coluna d'água nos demais pontos. Distintamente, a distribuição de turbidez é diretamente proporcional a profundidade, apesar de na estação SD 01 ter havido uma certa homogeneidade vertical. O maior valor superficial registrado foi de 8,6 NTU no ponto SD 01, enquanto que junto ao fundo o máximo foi medido no ponto SD 02 (17,6 NTU). Nos demais pontos (SDS 13, SDS 20, SD 01, SDN 20, SDN 13, SDN 30 e SD 03) os valores foram superiores a 5 NTU.

A aparente desconexão entre as distribuições verticais de fluorescência e turbidez e o padrão térmico observado sugeriu que ao sul da foz do rio o desenvolvimento de uma ressurgência completa aliado a um potencial input de nutrientes do rio favoreceu o aumento da fluorescência nesta área. Nos demais pontos, esse aumento está condicionado à presença da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) ou mesmo de uma mistura dela junto ao fundo.

Com exceção das estações SD 03, SD 04 e SD 05, as maiores concentrações de oxigênio dissolvido ocorreram na camada de mistura (porção superficial acima da termoclina) favorecidas, principalmente, pela troca gasosa via processos turbulentos com a atmosfera na interface entre os dois fluidos.

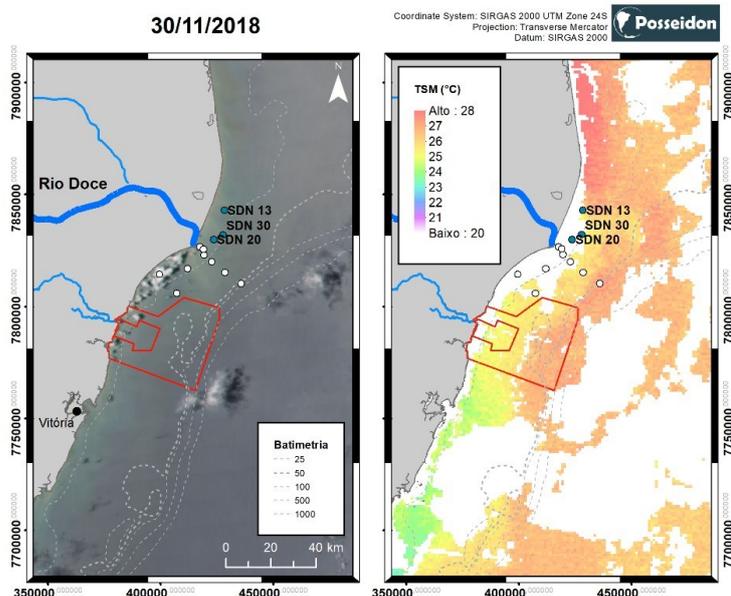
A Figura 42 mostra a imagem referente a data de 28 de novembro de 2018 característica de um período de alta vazão do rio, ventos leste e sudeste e maré de quadratura. Para efeito comparativo, a Figura 43 mostra as mesmas imagens referentes ao dia 30 de novembro de 2018 sob condições de vento nordeste, diminuição de vazão e aumento da amplitude de maré. Apesar da cobertura de nuvens, não ficou claro na Figura 42 a presença do sinal do aporte continental do Rio Doce pela cor amarronzada, enquanto que na Figura 43 houve indício de sua presença seguindo para sul como resultado das condições meteo-oceanográficas regentes.

Figura 42: Imagem da cor verdadeira (A) e da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) obtidas no dia 28 de novembro de 2018 pelos sensores VIIRS/SUOMI NPP e Terra/MODIS, respectivamente. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de novembro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. A região em branco das figuras é referente a presença de nuvens. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.



Fonte: autoria própria.

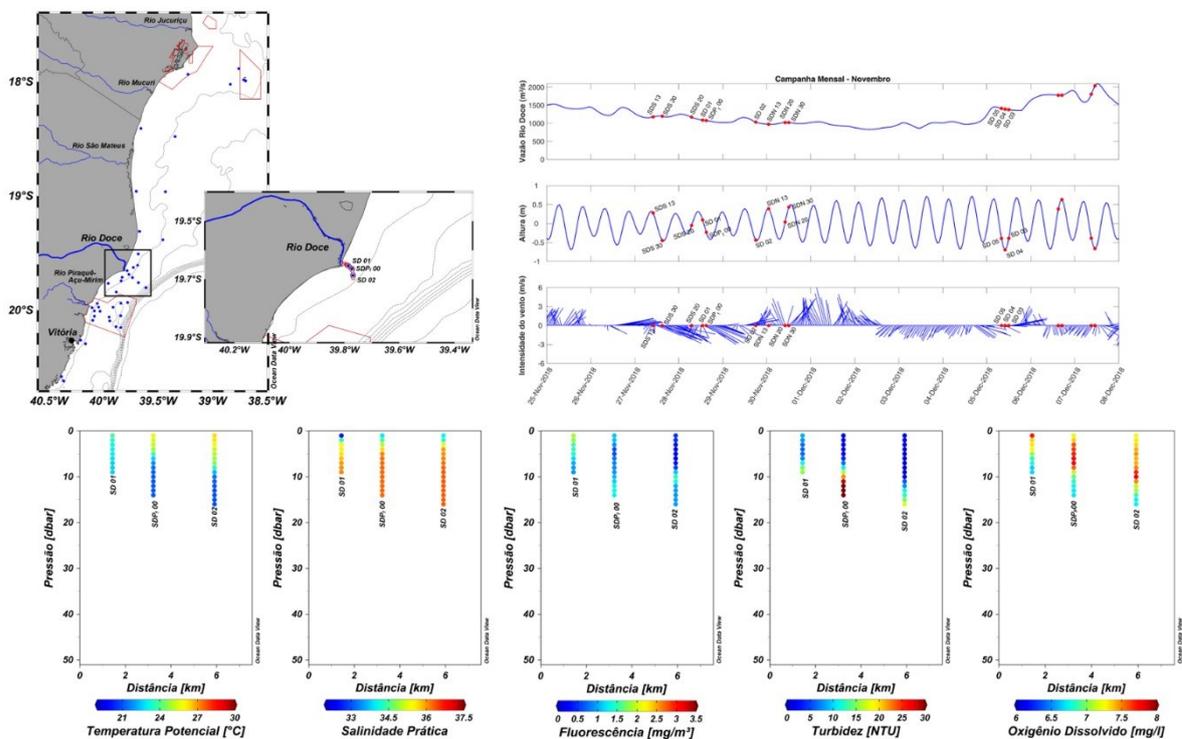
Figura 43: Imagem da cor verdadeira (A) e da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) obtidas no dia 30 de novembro de 2018 pelos sensores Terra/MODIS e Aqua/MODIS, respectivamente. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de novembro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.



Fonte: autoria própria.

Na campanha mensal de novembro um ponto extra de coleta foi amostrado em função da presença de uma água mais turva (Figura 44).

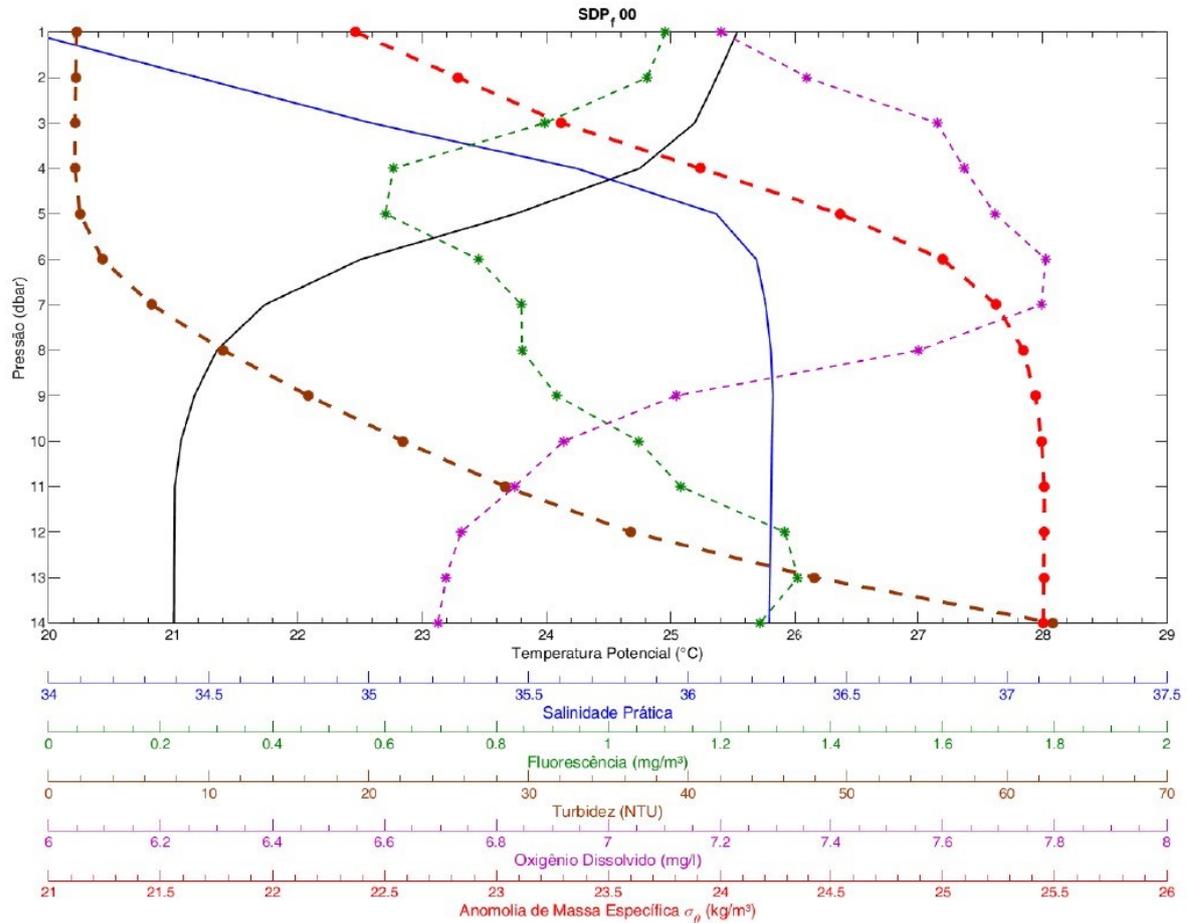
Figura 44: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização da estação onde foi realizado o levantamento de dados com o CTD no ponto extra durante a campanha mensal de novembro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 25 de novembro e 07 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de novembro.



Fonte: autoria própria.

Uma melhor visualização do padrão de distribuição das propriedades oceanográficas neste ponto em especial pode ser encontrada na Figura 45.

Figura 45: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m³) do Ponto Extra (SDPf 00) da campanha mensal de novembro.



Fonte: autoria própria.

O padrão de distribuição de temperatura e salinidade determinaram uma forte picnoclina (diferença de 2,7 kg/m³) entre 1 e 6 dbar. Abaixo da picnoclina, a turbidez aumentou quase que linearmente 16 vezes passando de 4 NTU para 63 NTU. Dados *in situ* medidos no fundoio 3 (Seção 1.5) mostraram que a altura de onda passou de 1,5 m para 1,0 m em um intervalo de 11 horas anterior a hora da amostragem, indicando que o sistema estava num processo de subsidência (diminuição de turbulência). Desta forma, a partir das observações não foi possível afirmar se a turbidez não foi alta em superfície em função da picnoclina e/ou se a redução da turbulência em função da redução na intensidade das forçantes meteo-oceanográficas salientou somente o aumento da turbidez nos últimos 4 dar. Além disso, considerando-se que o ponto em questão foi o SD 01, deve-se destacar o input de sedimentos oriundos do rio próximo ao fundo, haja vista a vazão aumentou nesta ocasião (Figura 44).

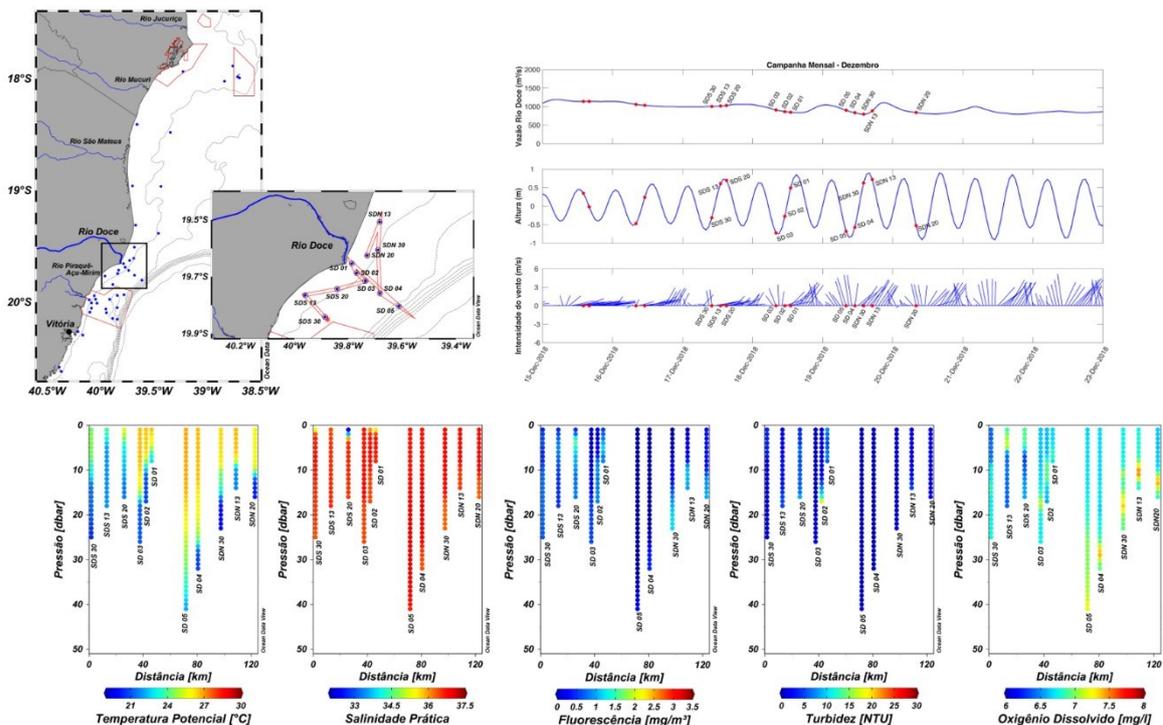
Outro aspecto que se destacou na Figura 45 foi a correlação negativa entre a distribuição vertical de fluorescência e a concentração de oxigênio dissolvido. Acima da picnoclina a fluorescência diminuiu e o oxigênio dissolvido aumentou. Isso pôde ser devido a fotoinibição. Por isso, a diminuição da fluorescência e o aumento do oxigênio dissolvido decorreu da turbulência natural da camada de

mistura. Nesta porção da coluna de água não houve correlação com a turbidez. No entanto, abaixo da pycnoclina, a fluorescência se correlacionou positivamente com a turbidez e inversamente com o oxigênio dissolvido. Sugere-se aqui que o aumento da turbidez possa induzir a um aumento na fluorescência de modo que a célula fitoplanctônica compense a diminuição de chegada de luz àquela profundidade (Alvarenga, 2019 – Comunicação oral). Por outro lado, a diminuição na concentração de oxigênio dissolvido pode ser em função da remineralização da matéria orgânica presente na coluna de água e/ou ao consumo de O₂ dissolvido pelas células fitoplanctônicas.

1.4.3 CAMPANHA MENSAL DEZEMBRO

Na campanha mensal de dezembro foram coletados dados nas estações próximas à Foz do Rio Doce (SDS, SD e SDN) com início em 17 de dezembro e finalização no dia 20 de dezembro de 2018. A Figura 46 mostra os perfis de distribuição vertical de Temperatura Potencial, Salinidade Prática, Fluorescência, Turbidez e Oxigênio Dissolvido amostrados durante essa campanha.

Figura 46: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de Dezembro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m³/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 15 e 22 de dezembro de 2018. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de dezembro.



Fonte: autoria própria.

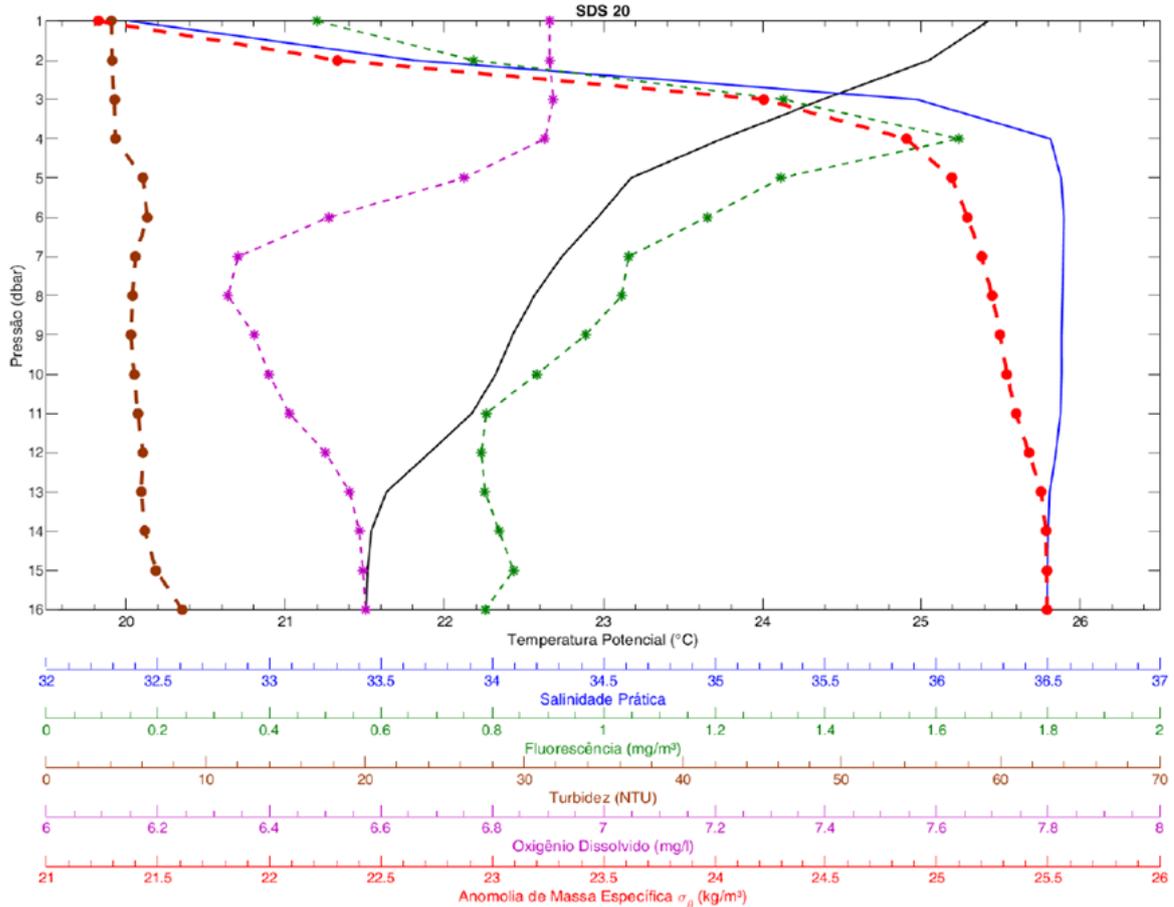
A coleta realizada em dezembro de 2018 marcou o início de um período de prevalência de ventos nordeste (Figura 15), alta insolação (Ghisolfi et al., 2015) uma diminuição significativa de precipitação na região de estudo (INMET, 2019). A predominância dos ventos favoráveis ao desenvolvimento de ressurgência costeira caracteristicamente ao sul da foz do Rio Doce foram essenciais para o desenvolvimento do padrão térmico superficial mostrado na Figura 9 e, portanto, se reproduzir nas observações *in situ* realizadas neste período.

O padrão térmico mostrado na Figura 46 separou a porção ao sul da foz do rio (SDS 13, SDS 20 e SDS 30) das demais estações de coleta. Nesses pontos, a temperatura superficial estava em torno de 24°C e a estratificação térmica vertical era fraca, enquanto que nos demais pontos a TSM estava acima de 26°C e houve uma diferença de até 7°C entre a temperatura da superfície e do fundo (SDN 30).

Valores de salinidade inferiores a 35,6 foram observados no ponto mais próximo da desembocadura do rio (SD 01) e nos pontos ao sul da foz (SDS 20 e SDS 30). Contudo, ainda se identificou uma leve diminuição dos valores de salinidade abaixo da termoclina associados à entrada de água mais fria sobre a plataforma continental.

Para efeito comparativo, as Figura 47 e Figura 48 mostraram o padrão de distribuição vertical das variáveis observadas para as estações SDS 20 e SDN 30, respectivamente. Apesar da forte haloclina e correspondente picnoclina, na estação SDS 20 os valores de turbidez não se alteraram significativamente ao longo da coluna de água (~ 6 NTU), mesmo localizado na periferia de uma água de cor mais amarronzada oriunda da descarga do Rio Doce (Figura 49 A). O máximo subsuperficial de fluorescência esteve associado à picnoclina, abaixo da qual tanto o oxigênio dissolvido quanto a fluorescência diminuíram suas concentrações.

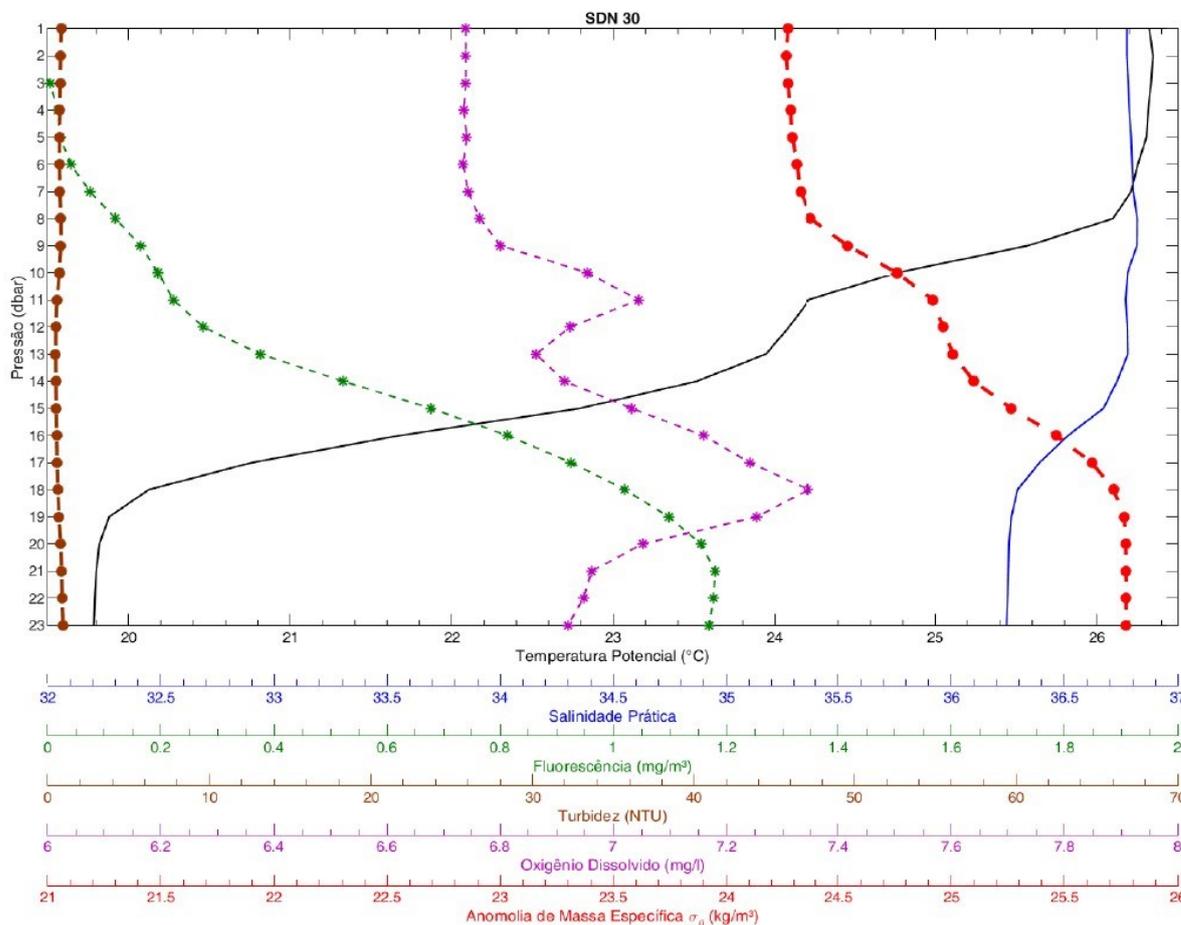
Figura 47: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m³) do ponto SDS 20 da Campanha Mensal de Dezembro.



Fonte: autoria própria.

Distintamente da estação SDS 20, no ponto SDN 30 a termoclina foi muito forte (Figura 47), mas a distribuição vertical de turbidez se mostrou verticalmente homogênea (valores < 2 NTU), sem correlação com as demais distribuições. No entanto, os incrementos em fluorescência e oxigênio dissolvido abaixo da pycnoclina refletiram a presença da ACAS (ou uma mistura dela) nesse ponto. Finalmente, vale destacar que a altura das ondas atuantes neste período era em torno de 1,0 metro (Seção 1.5).

Figura 48: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m³) do ponto SDN 30 da Campanha Mensal de Dezembro.



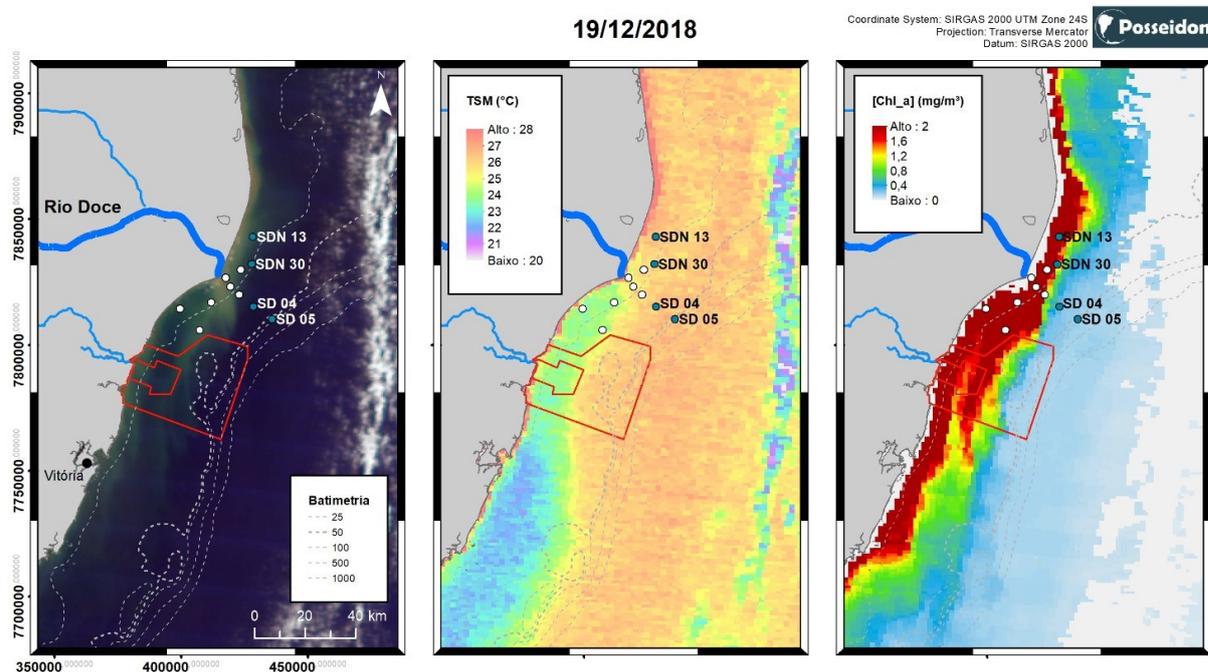
Fonte: autoria própria.

A atuação constante dos ventos do quadrante norte favoreceu o deslocamento das águas oriundas da descarga do Rio Doce em direção sul/sudeste ao longo da plataforma continental, como pôde ser visualizado na imagem de cor verdadeira do dia 19 de dezembro de 2018 (Figura 49 A) e nos dados *in situ* de salinidade e turbidez (Figura 46). A imagem de TSM desse mesmo dia (Figura 49 B) mostrou os pontos ao sul da foz sob a influência de águas mais frias (>24°C) provenientes do processo de ressurgência maduro. Porém, nos pontos ao norte (SDN) e do transecto perpendicular à costa (SD) se encontraram fora dessa influência, corroborando a estratificação registrada pelos dados de CTD.

Nesse período, os resultados da imagem de concentração da Clorofila-a (Figura 49 C) apresentaram um padrão semelhante ao da cor verdadeira, sendo possível identificar filamentos de clorofila-a oriundos da região do rio Doce atingindo a APA Costa das Algas. No entanto, o dado amostrado pelo satélite da cor do oceano pode conter informações de até algumas dezenas de metros de profundidade (Morel e Bertho, 1989), ou seja, o padrão observado pode estar relacionado tanto a descarga do rio Doce como pode ter tido interferência do material em suspensão ao longo da plataforma continental interna. Noventa por cento da irradiância total incidente na superfície do oceano (I_0) é proveniente da

primeira profundidade óptica e retorna à atmosfera e atinge a profundidade até onde a irradiância (I_z) é reduzida a 37% do seu valor na superfície, isto é, $I_z = 0,37I_0$ (Gordon e McCluney, 1975). Assim, a determinação da concentração de pigmentos através do sensoriamento remoto orbital é restrita a essa camada (Souza, 2005)

Figura 49: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a obtidas no dia 19 de dezembro de 2018 pelo sensor Terra/MODIS. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de dezembro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.



Fonte: autoria própria.

1.4.4 CAMPANHA TRIMESTRAL

A campanha trimestral ocorreu entre os dias 12 de janeiro e 24 de fevereiro de 2019 e foi realizada em quatro cruzeiros, assim distribuídos: Foz do Rio Doce (pontos SDS, SD e SDN) entre os dias 12 e 17 de janeiro, Região Norte (Itaúnas, Barra Nova e Degredo) nos dias 22 a 25 de janeiro, APA Costa das Algas que foi subdividida em dois cruzeiros (de 11 a 19 de fevereiro) e, por fim, Região Sul (Vitória) realizado no dia 24 de fevereiro de 2019.

1.4.4.1 Foz do Rio Doce

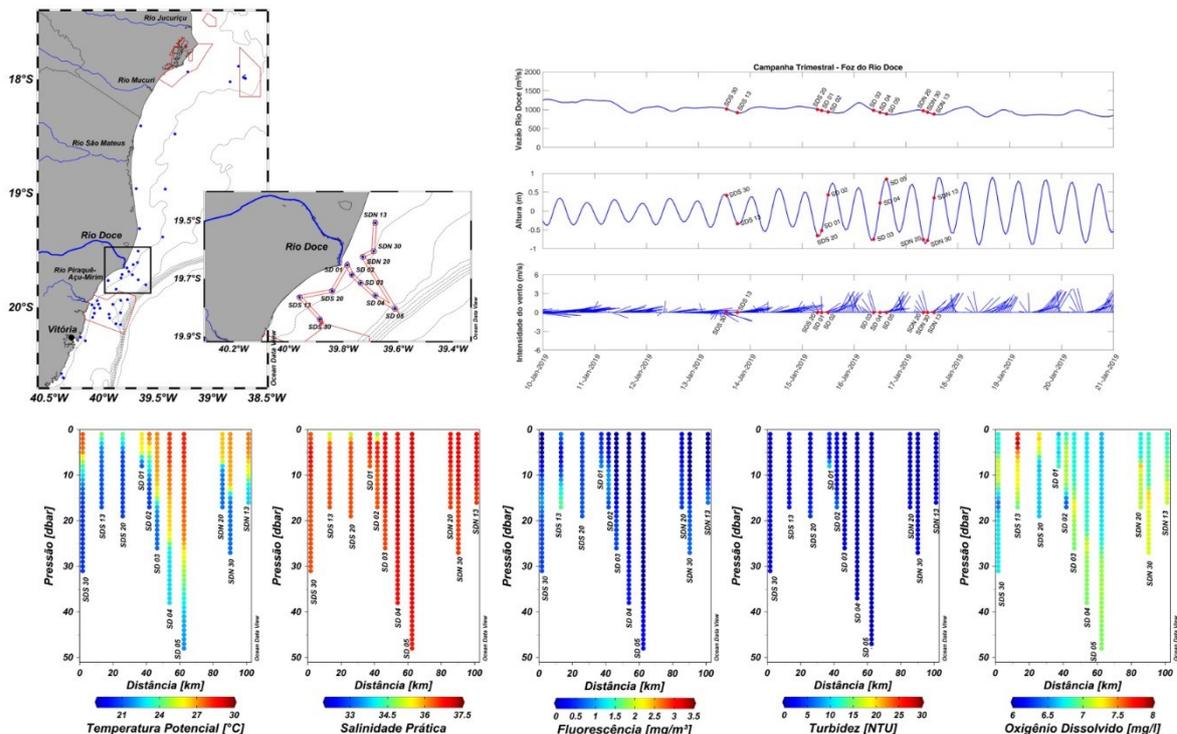
A Figura 50 mostra a distribuição vertical dos parâmetros coletados nesse cruzeiro. De uma forma geral, nesse período houve uma variação superior a 7°C entre a temperatura na superfície e aquela próxima ao fundo, sendo esse o principal fator condicionante da pycnoclina observada. Embora os valores de turbidez na coluna d'água estivessem baixos, houve um leve aumento desses valores associado ao final da pycnoclina observado e, ainda, um aumento na concentração de fluorescência e diminuição na concentração de oxigênio dissolvido.

Nos pontos SDS 13 e SDS 20 a coluna d'água se mostrou termicamente mais homogênea sendo a temperatura superficial mais fria (24,4°C e 24,1°C, respectivamente) do que as demais que foram entre 26,2°C (SD 01) e 28,2°C (SD 05).

O valor mínimo de salinidade encontrado nessa pernada foi 34,8 no ponto SD 02, os pontos SDS 13 e SDS 20 também mostraram uma influência do aporte continental ao registrarem 35,2 e 35,1 em superfície, respectivamente, enquanto que o ponto mais próximo a foz (SD 01) não mostrou o sinal dessa água.

Valores de fluorescência acima de 0,7 mg/m³ apareceram associados às águas mais frias nos pontos ao sul e nos pontos do transecto mais próximos da costa, com o máximo de 1,6 mg/m³ junto ao fundo no ponto SDS 13. Nesse mesmo ponto, o valor de 0,8 mg/m³ foi registrado na superfície associado à água menos salina. No ponto SDS 30 o valor máximo de 1 mg/m³ foi encontrado no meio da coluna d'água (16 dbar).

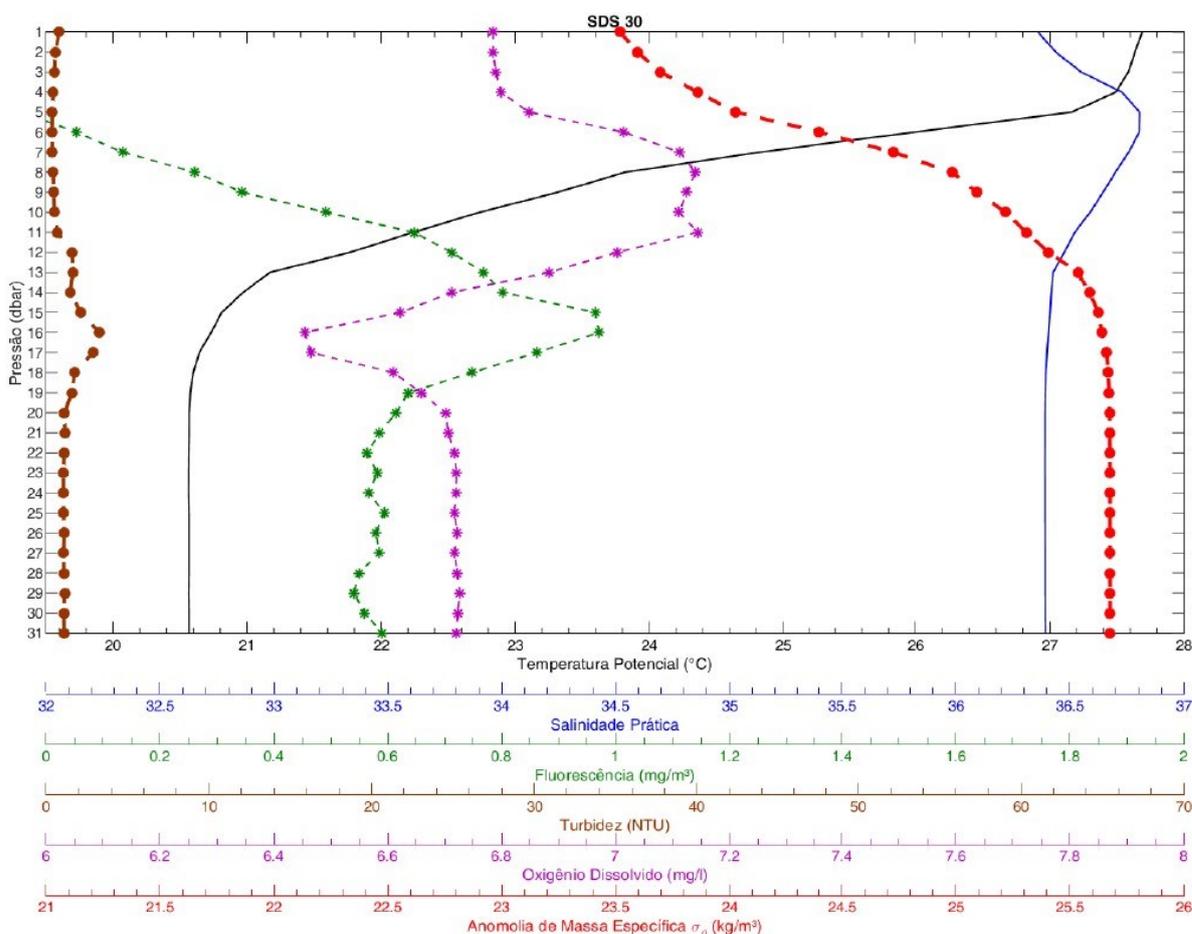
Figura 50: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral (Foz do Rio Doce). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m³/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 10 e 20 de janeiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral.



Fonte: autoria própria.

De uma forma geral, as estações ao sul da foz do Rio Doce e os dois primeiros pontos do transecto perpendicular foram amostradas sob o efeito de ventos leste. Estes ventos tendem a advectar água quente offshore para áreas mais costeiras, reduzindo a área de ascensão de água mais frias decorrente do processo de ressurgência costeira tal qual identificado na Figura 50. Esse padrão fica visível na Figura 51 que mostra os resultados obtidos para a estação SDS 30.

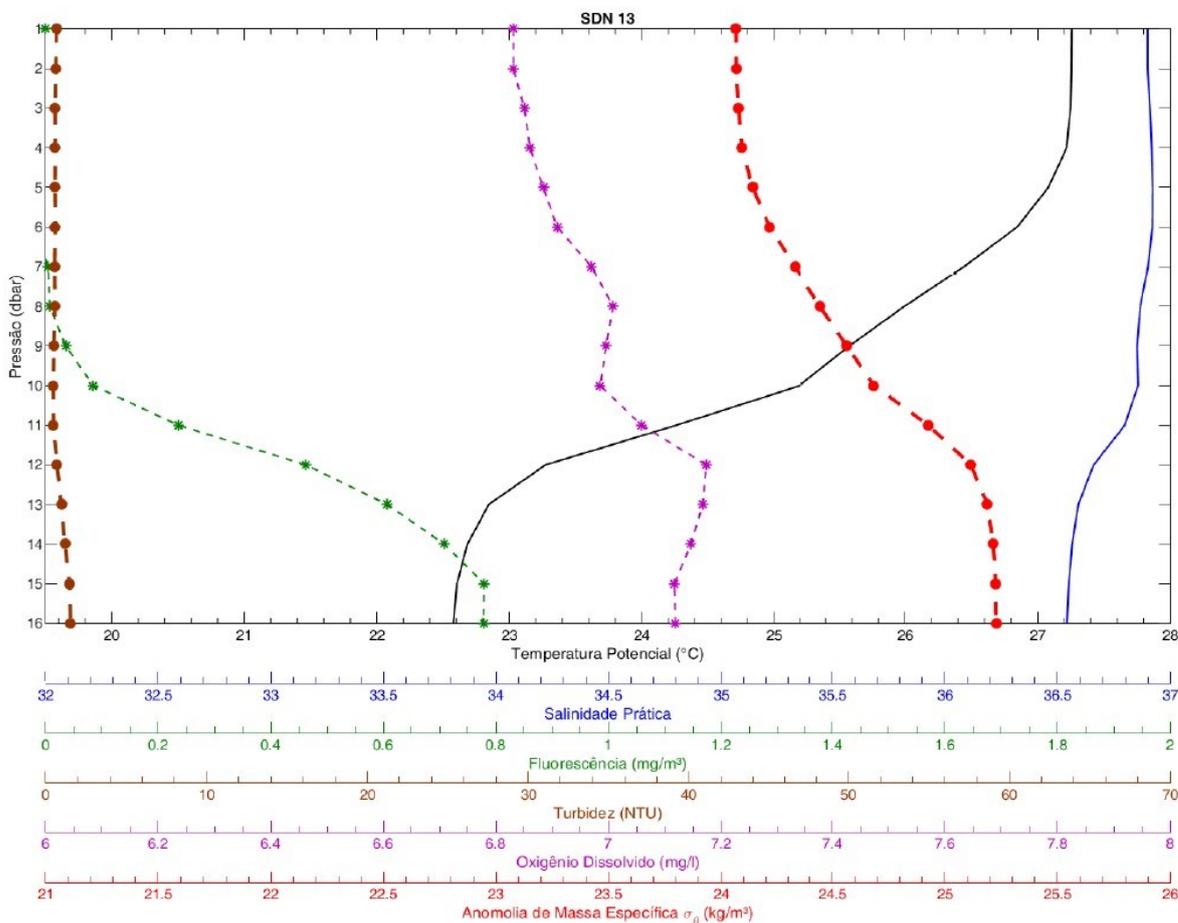
Figura 51: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m^3) do ponto SDS 30 do primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral.



Fonte: autoria própria.

Já na estação amostrada ao norte da foz do Rio Doce (SDN 13) o vento era de nordeste semelhante ao observado na Figura 47. A pycnoclina foi mais fraca, houve uma relativa homogeneidade vertical em termos de turbidez e a entrada de água mais fria ao fundo foi acompanhada pelo aumento da fluorescência e turbidez abaixo da termoclina (Figura 52).

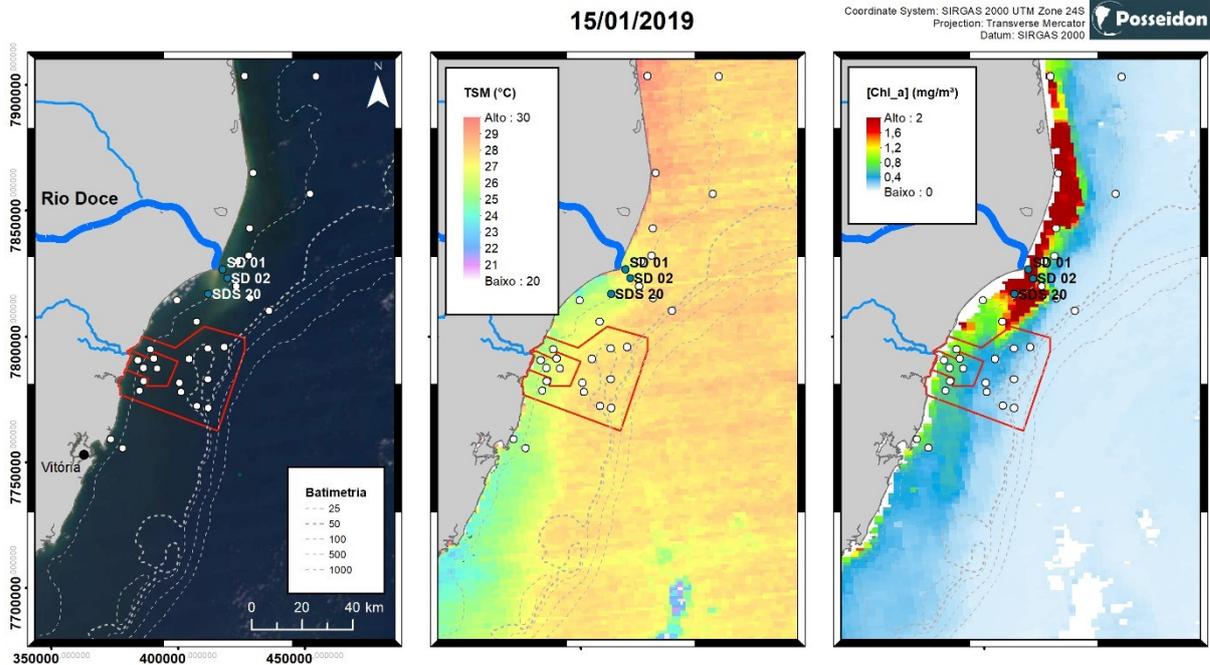
Figura 52: Distribuição dos parâmetros de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m³) do ponto SDN 13 do primeiro cruzeiro da Campanha Trimestral.



Fonte: autoria própria.

A imagem da cor verdadeira do dia 15 de janeiro de 2019 (Figura 53 A) mostrou o deslocamento preferencial do material oriundo da descarga do Rio Doce na direção sul/sudeste. Tanto nesta figura quanto no padrão de TSM (Figura 53 B) e de concentração de clorofila-a (Figura 53 C) as feições características estiveram concentradas próximo à costa. No caso da TSM identificou-se a presença de uma água menos fria (>25°C) abrangendo os pontos ao sul mais costeiros (SDS 20 e SDS 13). Os demais pontos amostrados ficaram fora dessa área de influência superficial. Porém, nos dados *in situ* foi possível verificar que a água mais fria estava sobre a plataforma continental, embora não aflorando à superfície.

Figura 53: Imagem da cor verdadeira obtida pelo sensor VIIRS/Suomi NPP (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 15 de janeiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha trimestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.

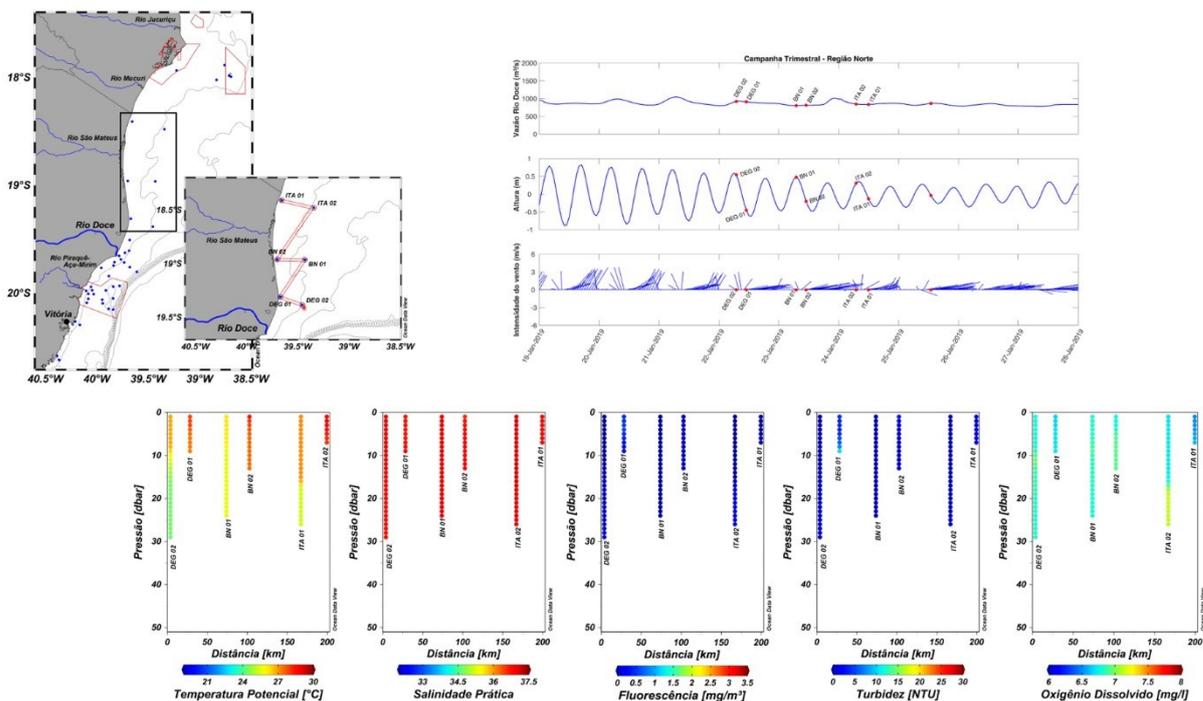


Fonte: autoria própria.

1.4.4.2 Região Norte (Itaúnas, Barra Nova e Degredo)

A característica principal na maior parte das perfilagens mostradas na Figura 54 foi a homogeneidade vertical e o aumento da TSM. Os valores observados foram mais elevados em relação às medidas realizadas na região da foz do Rio Doce (acima de 26,2°C), enquanto que a estratificação térmica vertical foi menor, sendo a variação máxima em torno de 2,5°C no ponto DEG 02.

Figura 54: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o segundo cruzeiro da Campanha Trimestral (Região Norte). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 19 e 27 de janeiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o segundo cruzeiro da campanha trimestral.



Fonte: autoria própria.

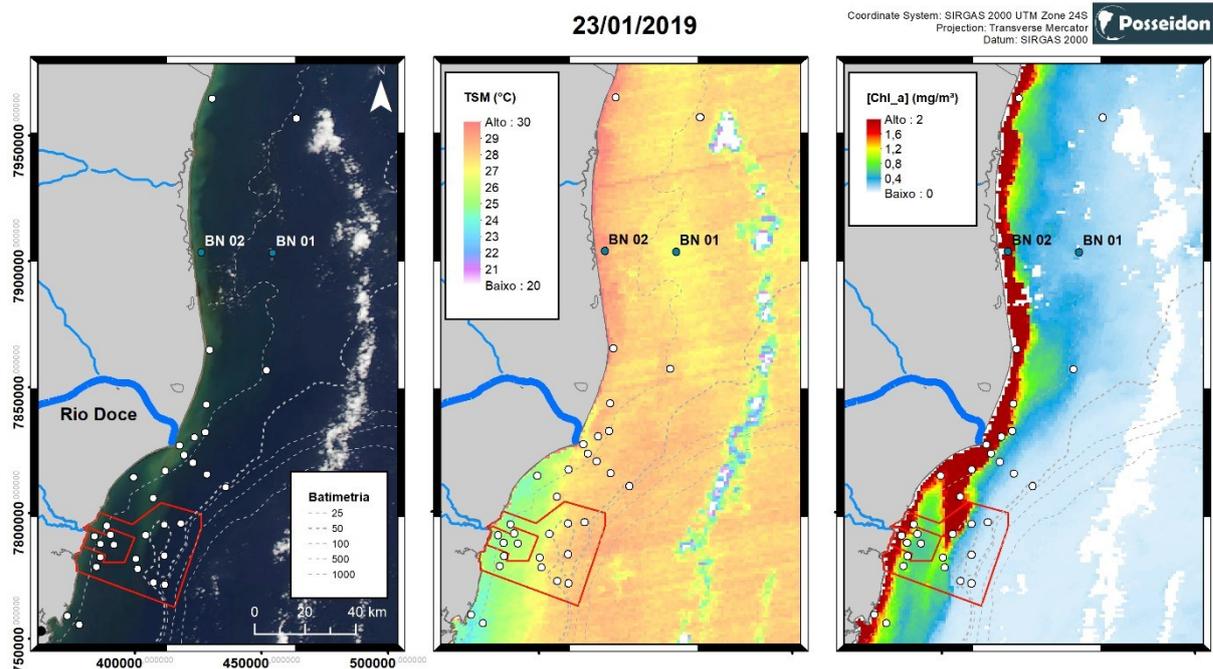
Nesse período de coleta, a salinidade esteve alta e praticamente homogênea em todos os pontos amostrais, variando entre 36,6 e 37, diferentemente do que foi observado na campanha semestral nessa mesma região. Assim como na distribuição de salinidade, na de fluorescência e oxigênio dissolvido não houve variações verticais significativas e entre os pontos. A maioria das medidas de fluorescência estiveram abaixo do limite de detecção do sensor, enquanto as outras não foram maiores a $0,2 mg/m^3$. Exceção é feita ao ponto DEG 01 que apresentou o valor de $0,6 mg/m^3$ a 4 dbar.

Nas estações mais profundas, os valores de turbidez variaram entre abaixo do limite de detecção do sensor e 0,8 NTU junto ao fundo no ponto DEG 02. Nos pontos próximos à costa, o maior valor (10,2 NTU) foi registrado ao fundo no ponto DEG 01. No ponto BN 02 os valores variaram entre 0,5 NTU no fundo e 3,3 NTU em superfície. O ponto ITA 01 apresentou valores entre 1,1 e 1,3 NTU.

Na imagem da cor verdadeira do dia 23 de janeiro de 2019 (Figura 55 A) se identificou um padrão em tom esverdeado bem restrito à costa ao norte da foz do Rio Doce e dirigido para sudoeste-sul ao sul do rio. Nesta situação não se identificou claramente uma feição de cor amarronzada associada à descarga do rio. Vale ressaltar a permanência dos ventos leste e a relativa diminuição da vazão. O

aumento da TSM é visível em toda a área (Figura 55 B), exceção feita a área ao sul da foz do Rio Doce associada à ressurgência costeira. Os altos valores de concentração de Clorofila-a (Figura 55 C) foram identificados na mesma porção costeira de cor diferenciada observados na Figura 55 A.

Figura 55: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração da Clorofila-a (C) obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 23 de janeiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha trimestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.

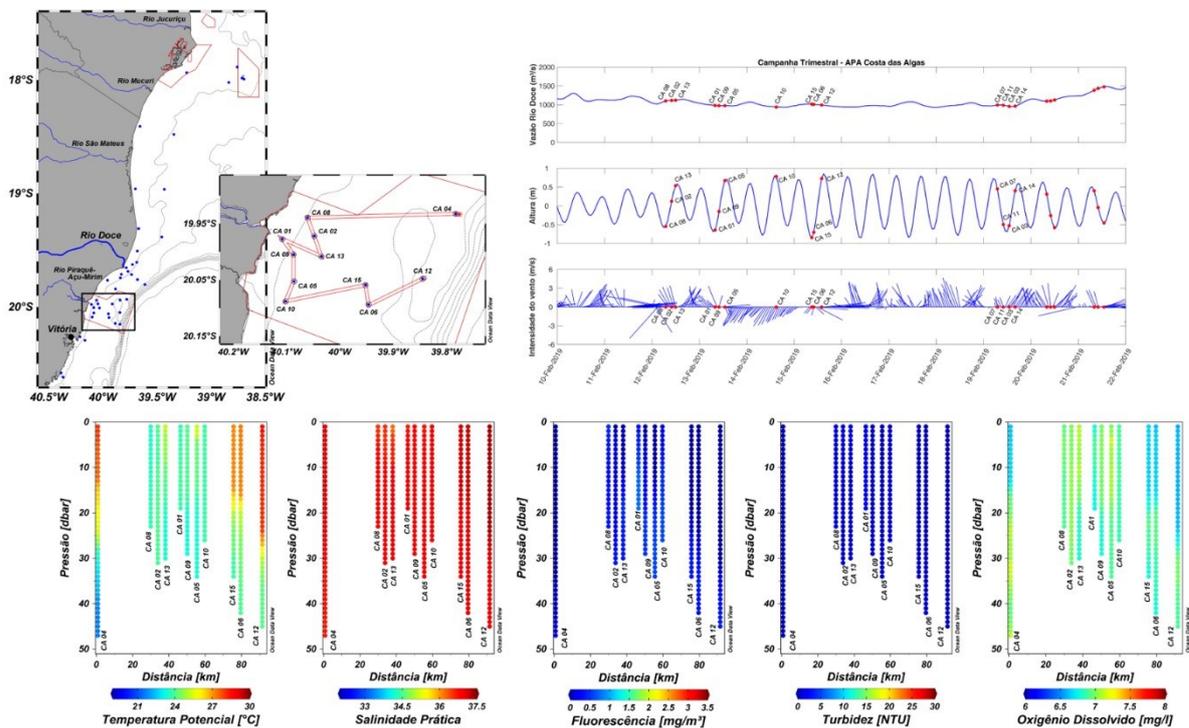


Fonte: autoria própria.

1.4.4.3 APA Costa das Algas

A coleta na APA Costa das Algas foi subdivida em duas pernas. A primeira delas foi realizada entre os dias 11 e 15 de fevereiro de 2019. O ponto amostral CA 04. foi amostrado no dia 25 de janeiro de 2019 juntamente com os pontos da Região Norte. A Figura 56 mostra a distribuição vertical desses parâmetros.

Figura 56: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o terceiro cruzeiro da Campanha Trimestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 10 e 21 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o terceiro cruzeiro da campanha trimestral.



Fonte: autoria própria.

Nos pontos mais próximos à costa (CA 08, CA 02, CA 13, CA 01, CA 09, CA 5 e CA 10) uma água relativamente fria ocupou toda a coluna d'água com temperaturas superficiais entre $23,6^{\circ}C$ e $25^{\circ}C$ e com diferença máxima em relação ao fundo de $1,8^{\circ}C$ (CA 08). Da mesma forma, a salinidade também se mostrou praticamente homogênea ao longo da coluna d'água com valores entre 36,2 e 36,9 em superfície e 36,9 e 37 no fundo.

Já nos pontos mais offshore (CA 04, CA 15, CA 06 e CA 12), a coluna d'água estava estratificada, com temperaturas superficiais mais altas, de até $28,5^{\circ}C$, e com variações de até $4^{\circ}C$ entre a superfície e o fundo (CA 12). Associada a essa água quente, a salinidade passou de 37, mas diminuiu levemente à medida que a temperatura da água diminuía com a entrada de águas mais frias próximas ao fundo.

Os valores de fluorescência apresentaram-se baixos, variando entre abaixo do limite de detecção do sensor até $0,8 mg/m^3$. Esses valores correlacionaram-se negativamente com os valores de temperatura e salinidade, ou seja, houve um aumento da fluorescência ao longo de toda a coluna d'água dos pontos costeiros e em direção ao fundo nos pontos fora da costa. As concentrações de oxigênio dissolvido

também acompanharam essa relação com valores mais altos entre 6,7 mg/l e 7,1 mg/l, e os mais baixos (em torno de 6,6 mg/l) associados à superfície das estações offshore.

A distribuição espacial (horizontal e vertical) de turbidez também se manteve praticamente homogênea com os valores não ultrapassando a 2,1 NTU. Nos pontos mais distantes da costa (CA 04, CA 15, CA 06 e CA 12), os valores registrados não ultrapassaram a 0,7 NTU.

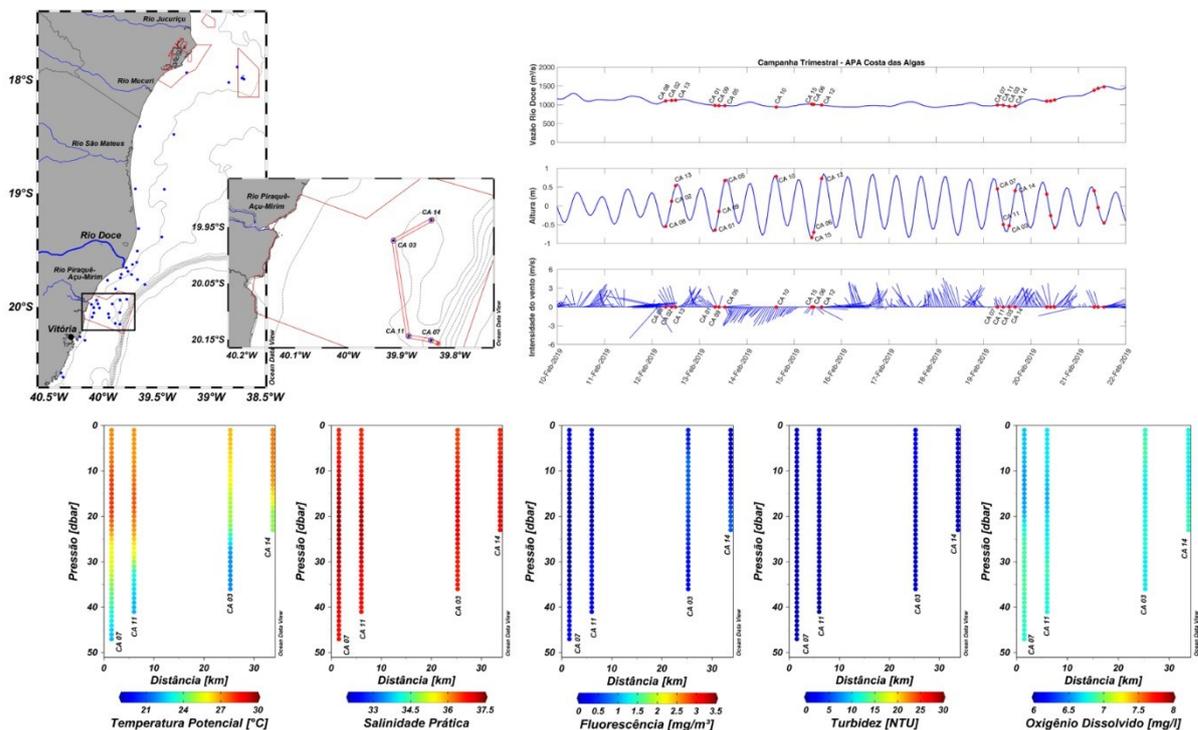
A segunda pernada na região da APA Costa das Algas foi realizada nos dias 18 e 19 de fevereiro de 2019, quando foram coletados os demais pontos afastados da costa CA 03, CA 07, CA 11 e CA 14 (Figura 57).

Seguindo o padrão observado anteriormente, as águas superficiais continuaram quente, embora com valores máximos 1°C menores. Em direção oposta, a estratificação térmica aumentou com variação de até 5°C ao longo da coluna d'água. Novamente, os valores de salinidade foram elevados sendo o maior registrado (37,4) encontrado no meio da coluna d'água da estação CA 07.

Em termos de fluorescência, oxigênio dissolvido e turbidez, o padrão descrito anteriormente se manteve. A concentração máxima observada de fluorescência foi de 0,7 mg/m³, enquanto que os menores valores de oxigênio dissolvido estiveram associados à superfície dos pontos mais ao sul e os maiores associados ao fundo dos pontos mais ao sul e ao longo da coluna d'água dos pontos mais ao norte. A homogeneidade e os baixos valores também foi a regra para a distribuição vertical de turbidez com valor máximo de 1,9 NTU.

A alta cobertura de nuvens durante esse período impossibilitou a análise das imagens obtidas por sensoriamento remoto.

Figura 57: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o quarto cruzeiro da Campanha Trimestral (APA Costa das Algas). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 10 e 21 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o quarto cruzeiro da campanha trimestral.



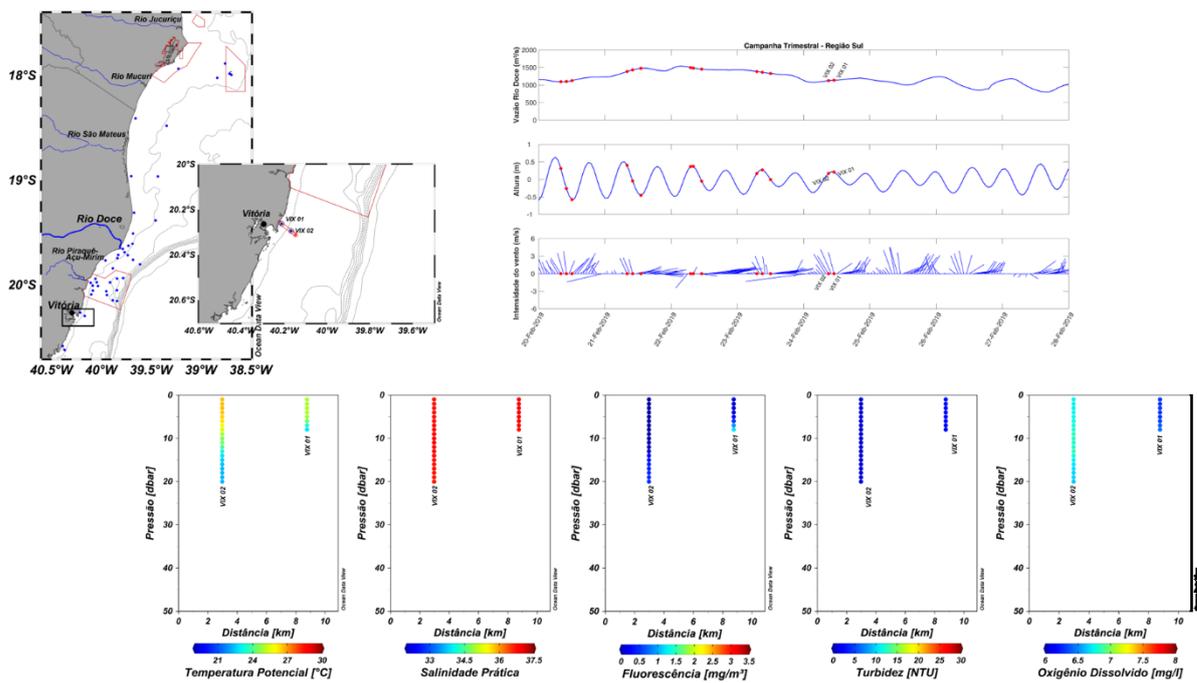
Fonte: autoria própria.

1.4.4.4 Região Sul (Vitória)

Na última perna da campanha trimestral foram amostrados os pontos de Vitória (prefixo VIX) no dia 24 de fevereiro de 2019. As distribuições verticais dos parâmetros coletados estão mostradas Figura 4 30.

Comparativamente aos valores máximos observados na APA Costa das Algas, a temperatura superficial foi relativamente baixa ($24,9^{\circ}C$ – VIX 01 e $26,6^{\circ}C$ – VIX 02). Em ambos foi visível uma estratificação térmica, sendo de até $4^{\circ}C$ na estação VIX 02, enquanto que no ponto VIX 01 ela foi de $2,1^{\circ}C$. No entanto, a salinidade se manteve praticamente homogênea verticalmente (valores entre 36,7 e 36,9).

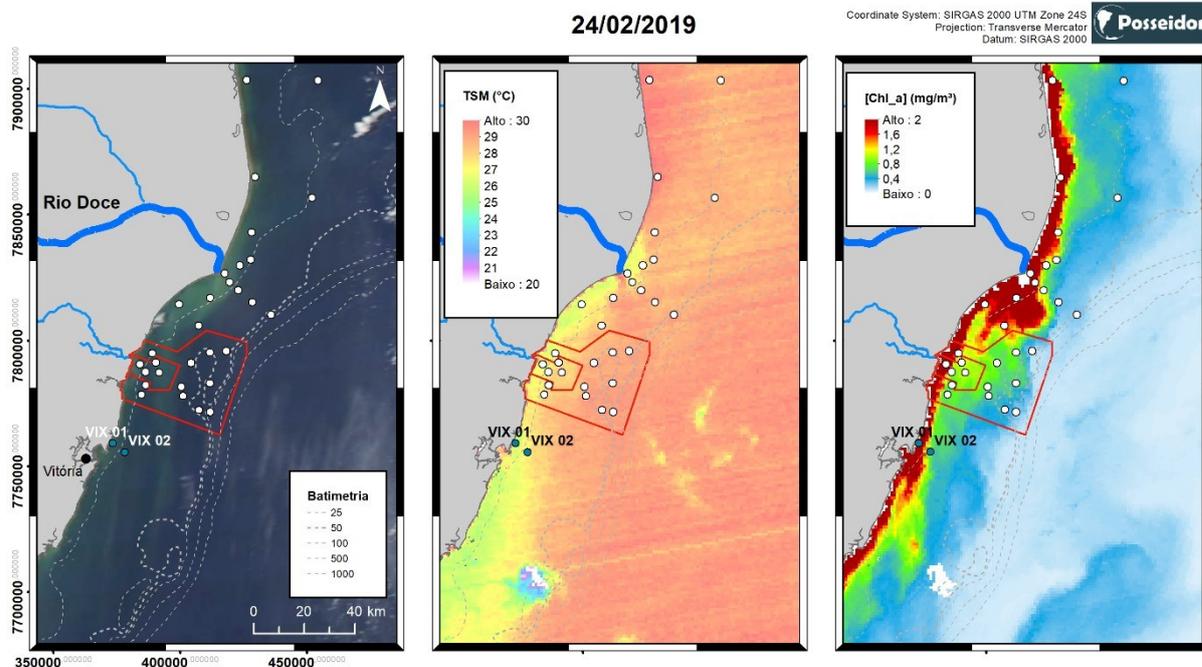
Figura 58: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante o quinto cruzeiro da Campanha Trimestral (Região Sul). Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 20 e 27 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com os nomes das estações amostrais são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante o quinto cruzeiro da campanha trimestral.



Fonte: autoria própria.

A imagem da cor verdadeira (Figura 59 A) mostrou que a dispersão da pluma de sedimentos do Rio Doce estava no sentido sul em decorrência da constante atuação dos ventos nordeste, mas não atingiu os pontos de Vitória. Foi possível também visualizar que toda região próxima à costa estava sob a influência de um processo de ressuspensão. O processo de ressurgência se mostrou relativamente fraco na região ao sul da foz do Rio Doce, mas os pontos de Vitória se encontraram na área de influência desse processo (Figura 59 B). A Figura 59 C mostrou que a área de alta concentração de Clorofila-a esteve associada com a área de maior concentração de sedimento em suspensão.

Figura 59: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 24 de fevereiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha trimestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.



Fonte: autoria própria.

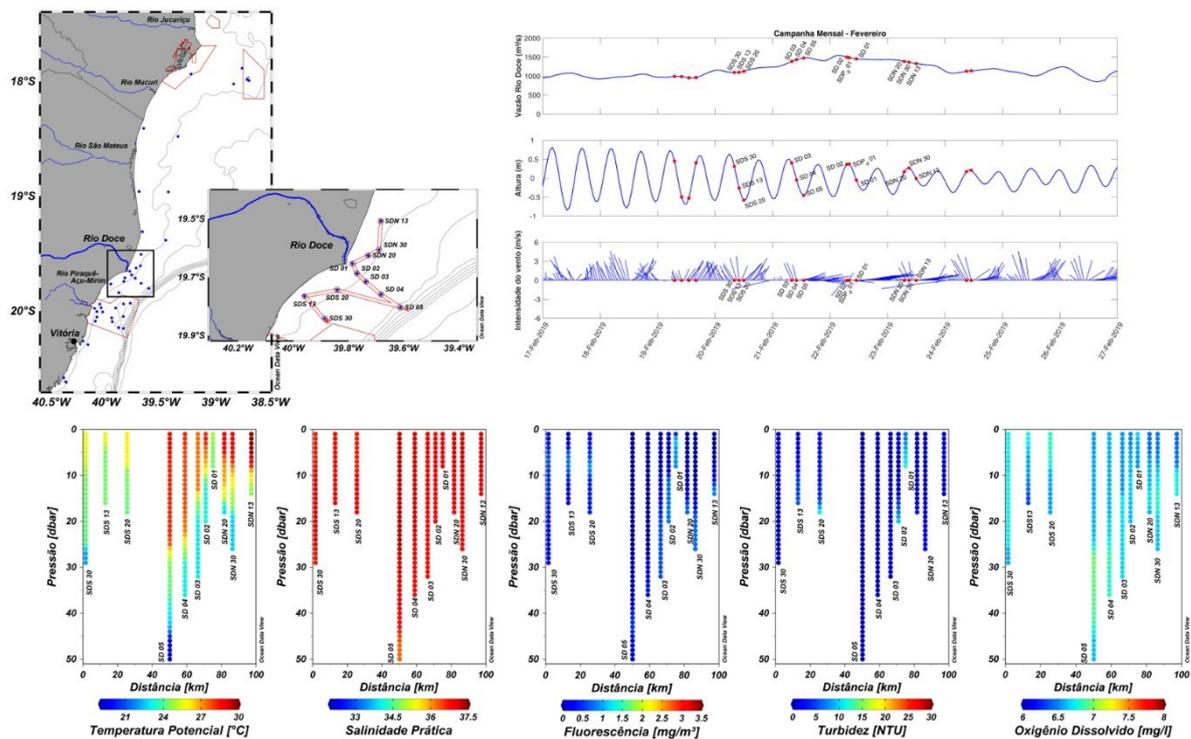
1.4.5 CAMPANHA MENSAL FEVEREIRO

A campanha mensal de fevereiro aconteceu entre os dias 20 e 23 de fevereiro de 2019 e, assim como as outras campanhas mensais, as coletas se restringiram à perfilagem dos pontos próximos à Foz do Rio Doce (SDS, SD e SDN - Figura 60).

Nessa campanha observou-se a presença de uma água mais fria no fundo ao longo de toda plataforma continental amostrada. Essa água fria aflorou à superfície nos pontos ao sul da desembocadura do Rio (prefixo SDS) e no primeiro ponto do transecto perpendicular à costa (SD 01) com temperaturas superficiais entre 24,9°C e 26,1°C. Nos demais pontos, as temperaturas superficiais ficaram entre 27,4°C e 29,8°C, com o máximo no ponto mais ao norte (SDN 13). Já a maior variação térmica vertical ocorreu no ponto SD 05 e foi de 8°C. É importante pontuar que foram observados gradientes térmicos da ordem de 0,5 °C/dbar.

Durante esse período, a salinidade superficial apresentou pouquíssima variação espacial ao longo dos pontos amostrais e também ao longo da coluna d'água, com valores variando entre 36,6 e 37,2, ou seja, não foi possível detectar um sinal do aporte continental do Rio Doce.

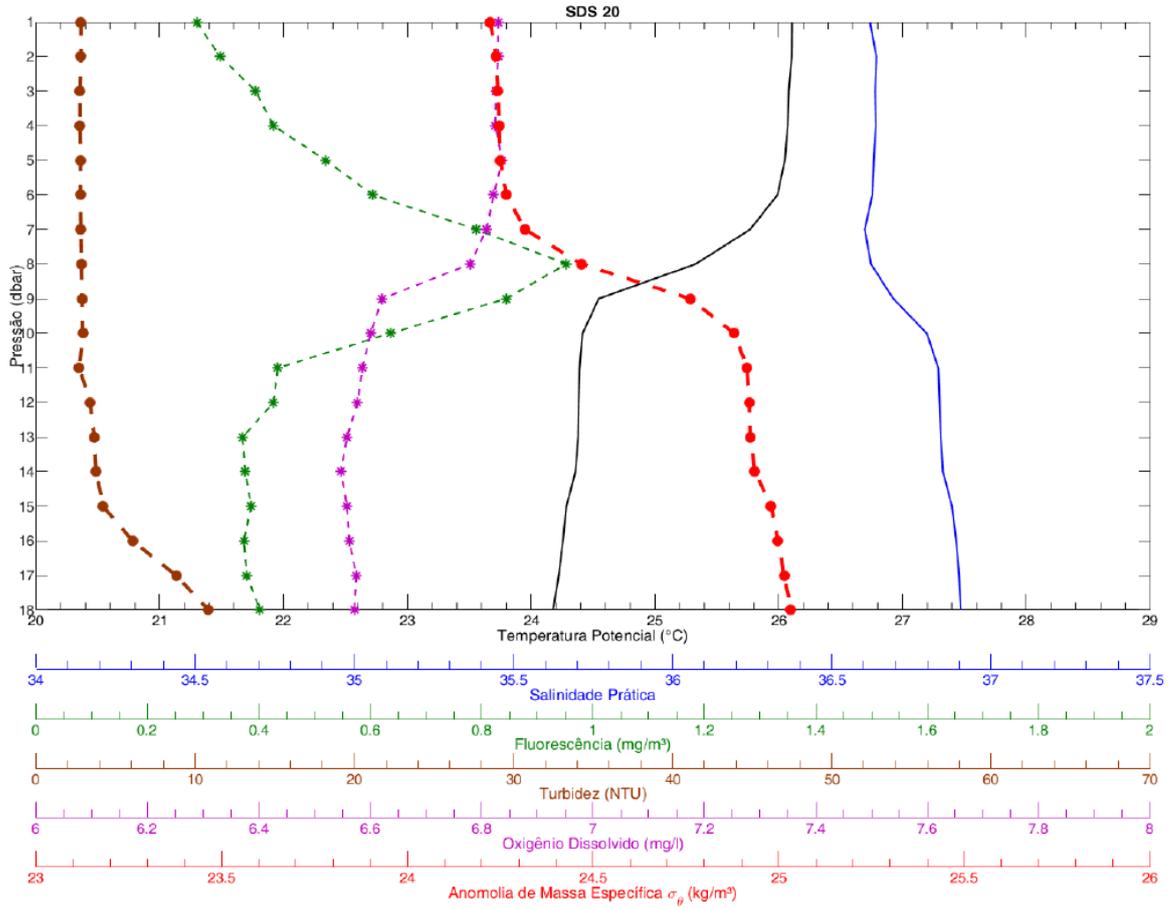
Figura 60: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de fevereiro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 17 e 26 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com o nome da estação amostral são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) dos pontos amostrados durante a campanha mensal de fevereiro.



Fonte: autoria própria.

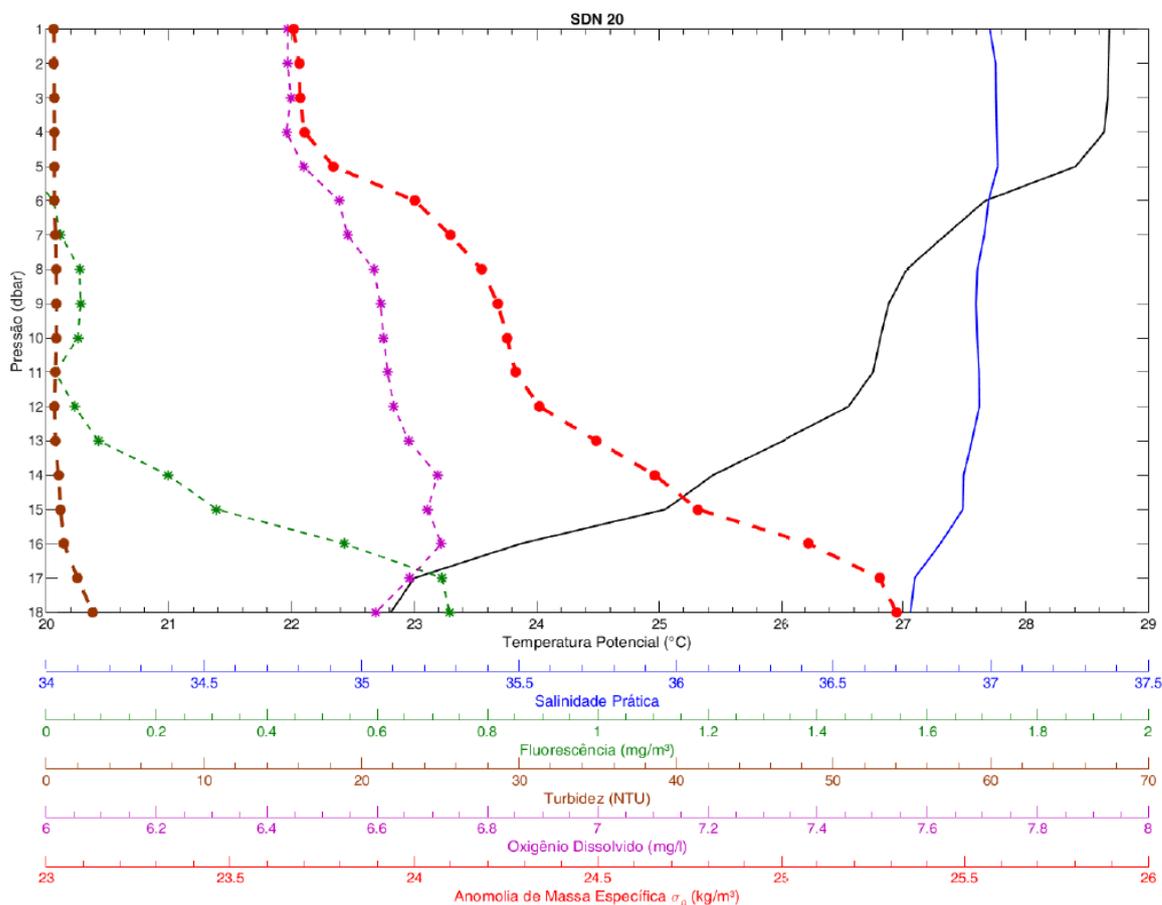
Em termos de turbidez houve um claro aumento no fundo nas estações SDS 20 (vento nordeste, estufa de vazante de sizígia e vazão aumentando), SD 01 e SD 02 (pico de vazão do período, maré de quadratura e vento leste). Para efeito comparativo, as Figura 62 e 63 mostram a distribuição vertical das variáveis amostradas e estimada para os pontos SDS 20 e SDN 20, respectivamente.

Figura 61: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m³) dos pontos SDS20 da campanha mensal de fevereiro.



Fonte: autoria própria.

Figura 62: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m³) do ponto SDN20 da campanha mensal de fevereiro.

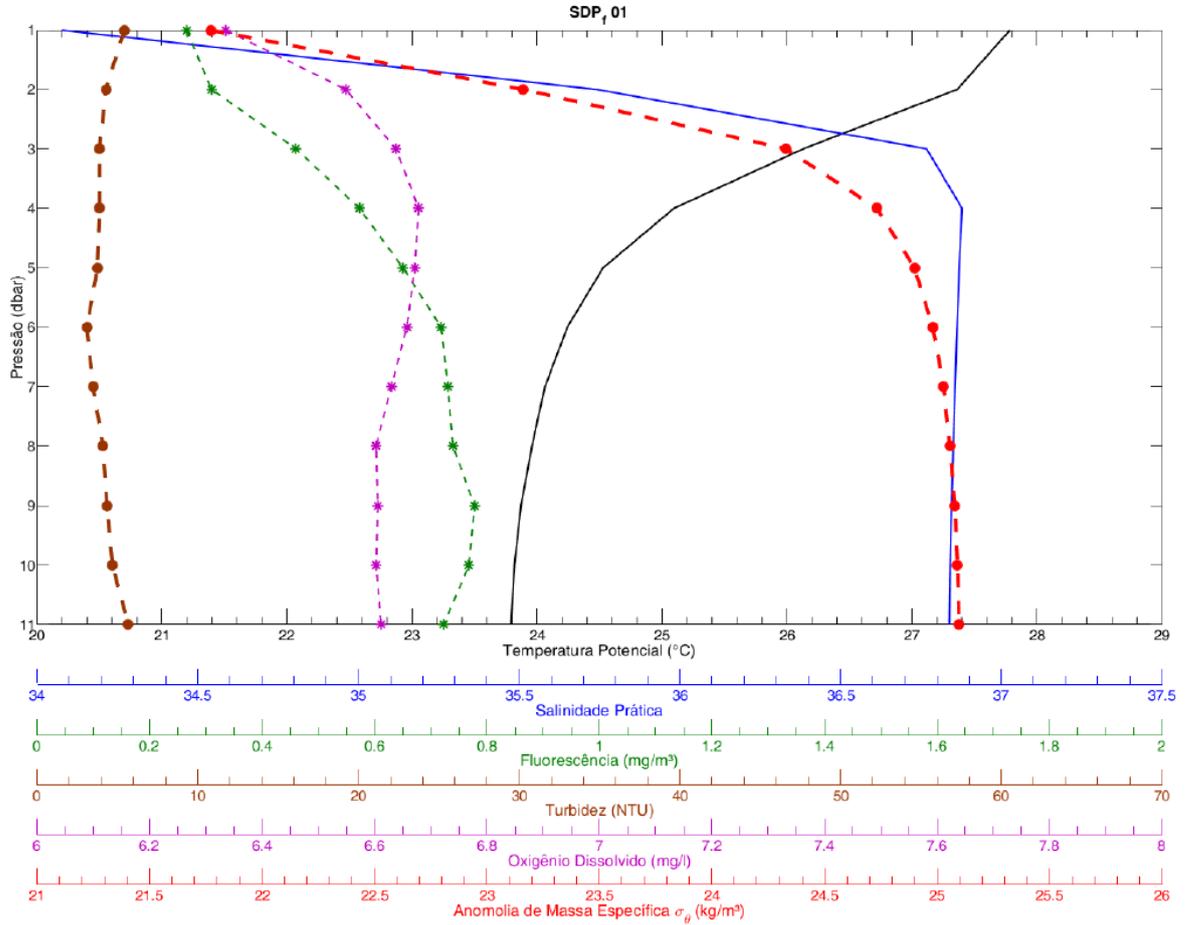


Fonte: autoria própria.

Em ambas as estações houve um incremento na turbidez mais pronunciado próximo ao fundo. O padrão de fluorescência se diferenciou ao norte e a sul da foz do rio. Na porção norte, o máximo de fluorescência ocorreu próximo ao fundo associado com a entrada de água fria normalmente, também, associado com o aumento do concentração de oxigênio dissolvido (Figura 62). Ao sul, se desenvolveu um máximo local de fluorescência associado à pycnoclina (Figura 62). Abaixo dessa camada, a concentração de oxigênio dissolvido diminuiu. Embora nos dois pontos houve o desenvolvimento de uma estratificação vertical que dividiu, aproximadamente, o oceano em duas camadas, atribui-se essa distinção ao desenvolvimento de uma ressurgência completa ao sul e incompleta ao norte da foz do Rio Doce.

Apesar de não ter sido observado uma água menos salina nos dois primeiros pontos próximos à foz, um ponto extra (SDPd 01) foi coletado (Figura 63) devido à presença de uma água aparentemente com uma concentração maior de sedimento e também a presença de uma espuma na interface entre a água mais turva e a mais limpa (Figura 64).

Figura 63: Distribuição vertical dos parâmetros de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m³), Turbidez (NTU), Oxigênio Dissolvido (mg/l) e Anomalia de massa específica (kg/m³) do Ponto Extra (SDPf 01) da campanha mensal de fevereiro.



Fonte: autoria própria.

Figura 64: Fotografia tirada pela coordenadora de embarque próximo ao Ponto Extra (SDPd 01) da campanha mensal de fevereiro no momento de coleta de dados para ilustrar a frente e a espuma na interface entre a água mais turva e a mais limpa.



Fonte: autoria própria.

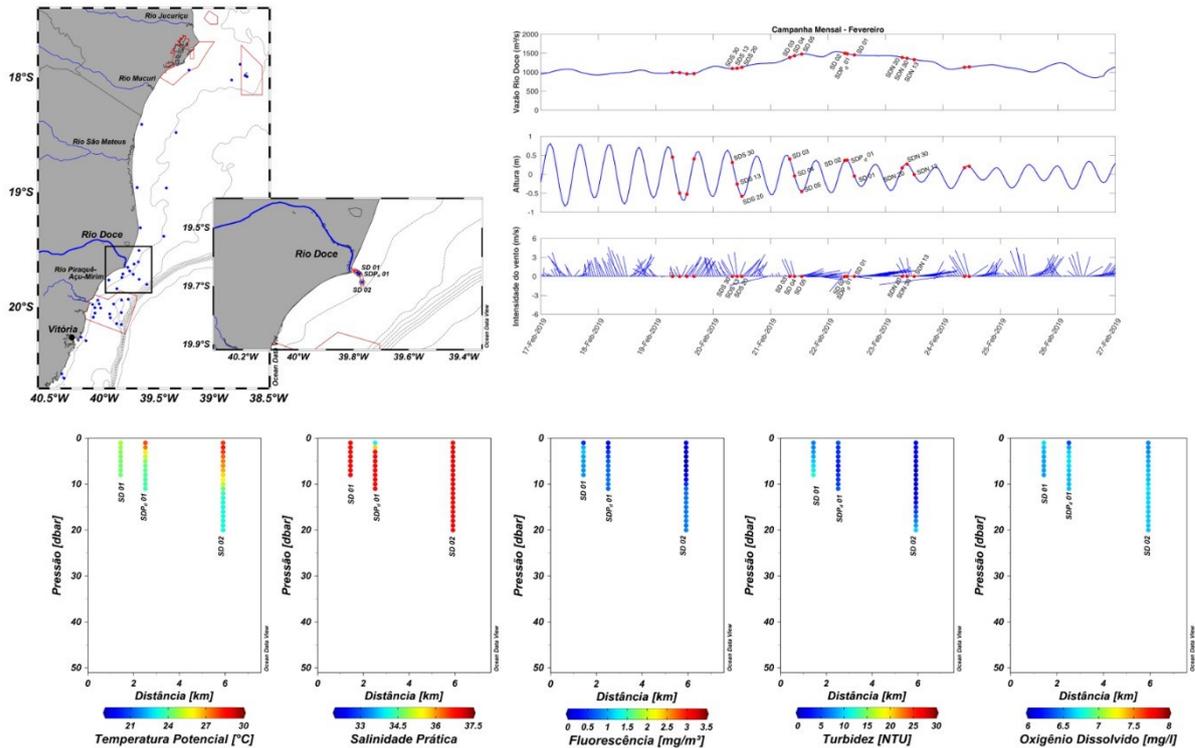
A sequência de coleta foi SD 02, SDPd 01 e SD 01, ou seja, em direção à costa. Analisando-se os resultados mostrados na Figura 65, nesta sequência verificou-se que a água fria que estava abaixo dos 10 dbar no SD 02, ficou em 4 dbar no ponto extra e aflorou à superfície no SD 01. Com pequenas alterações, esse mesmo padrão foi observado na distribuição de fluorescência, turbidez e oxigênio dissolvido.

Distintamente, houve a presença de uma água menos salina (Salinidade < 34) em superfície no ponto SDPd 01, mas não nos outros dois. Talvez, essa característica fique mais clara ao analisar-se a distribuição de TSM na Figura 66 B. É visível que a água oriunda da descarga do rio esteve mais quente e, possivelmente, menos salina. A partir dos resultados obtidos verificou-se que somente no ponto SDPd 01 foi que ela foi efetivamente amostrada.

De qualquer forma, a atuação dos ventos de direção leste neste momento de coleta devem ter contribuído efetivamente para os padrões visíveis na Figura 66 que deixou o material oriundo do Rio Doce restrito à porção mais interna da plataforma continental, assim como os maiores valores da concentração de clorofila-a, e não houve a presença do processo de ressurgência costeira.

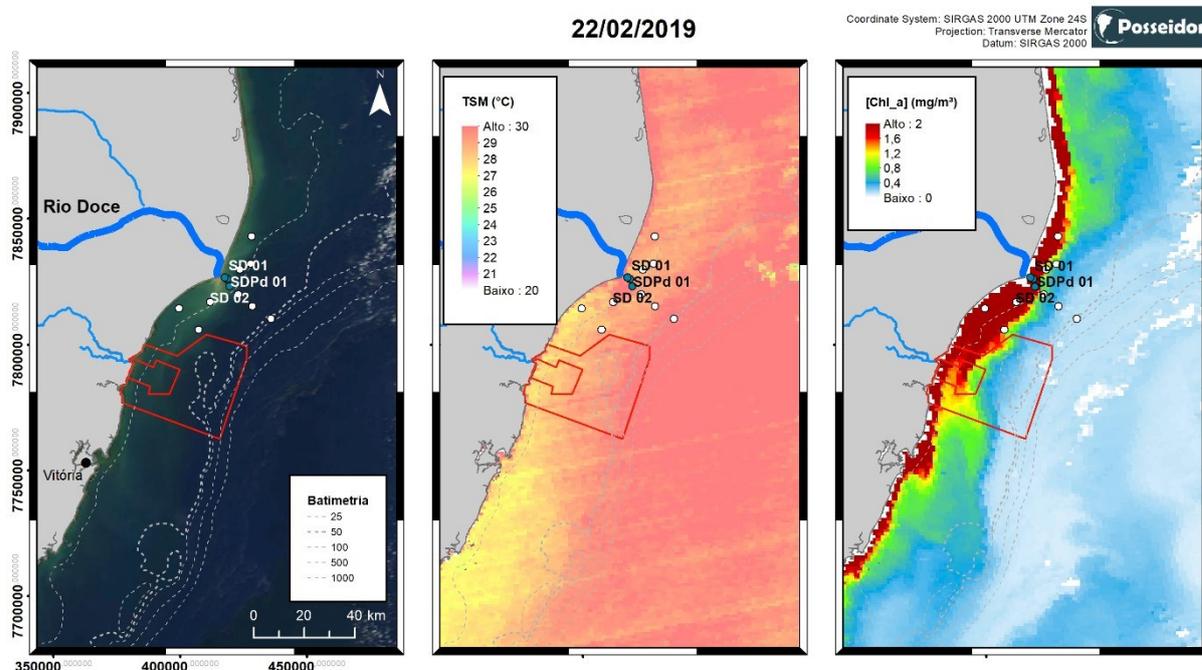
A relação entre as três distribuições superficiais mostradas na Figura 66 ficou bem caracterizada na área da APA Costa das Algas. Observou-se que a presença de uma água mais quente bem próximo à costa, se refletiu na distribuição de clorofila-a e de cor verdadeira, ou seja, a concentração de clorofila-a foi menor e a coloração associada ao material proveniente do Rio Doce foi menos evidente do que nos cenários descritos anteriormente.

Figura 65: Painel superior esquerdo: mapa maior com a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha semestral e mapa menor com a localização das estações onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD no ponto extra durante a campanha mensal de fevereiro. Painel superior direito: Séries temporais horárias da Vazão do Rio Doce (m^3/s) estimada para a foz a partir de medições em Colatina - ES, Altura do nível do mar (m) estimada a partir da pressão medida no Fundeio 3 (Seção 1.5) e Intensidade do vento (m/s) medido na estação automática RDO-16 em Linhares – ES entre os dias 17 e 26 de fevereiro de 2019. Os pontos em vermelho com o nome da estação amostral são referentes ao momento de coleta de dados do cruzeiro descrito. Painel inferior: Distribuição vertical da Temperatura Potencial ($^{\circ}C$), Salinidade Prática, Fluorescência (mg/m^3), Turbidez (NTU) e Oxigênio Dissolvido (mg/l) do ponto extra amostrado durante a campanha mensal de fevereiro.



Fonte: autoria própria.

Figura 66: Imagem da cor verdadeira (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração da Clorofila-a obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 22 de fevereiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha mensal de fevereiro e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.



Fonte: autoria própria.

1.5 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). Foram realizadas 3 campanhas de medições, com manutenção aproximadamente mensal compreendendo o período entre novembro de 2018 e início de fevereiro de 2019. Na primeira campanha de manutenção não foi possível a recuperação do equipamento instalado no Fundeio 2. Uma campanha 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.

Apesar dos esforços, o equipamento não foi encontrado, sendo imediatamente substituído por outro perfilador, com frequência de 600kHz, que foi fundeado cerca de 4km, 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.

Junto aos perfiladores de correntes, foram instalados, nos 4 pontos, 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, pH, 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 analisados. Os demais parâmetros não foram medidos corretamente pelos CTDs instalados. No momento, os equipamentos que apresentaram avarias foram retornados ao fabricante para averiguação de possíveis problemas de fabricação.

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 (Quadro 3) 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.

Quadro 3: Orientação da costa em relação ao sistema cartesiano em cada fundeio

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

Fonte: autoria própria.

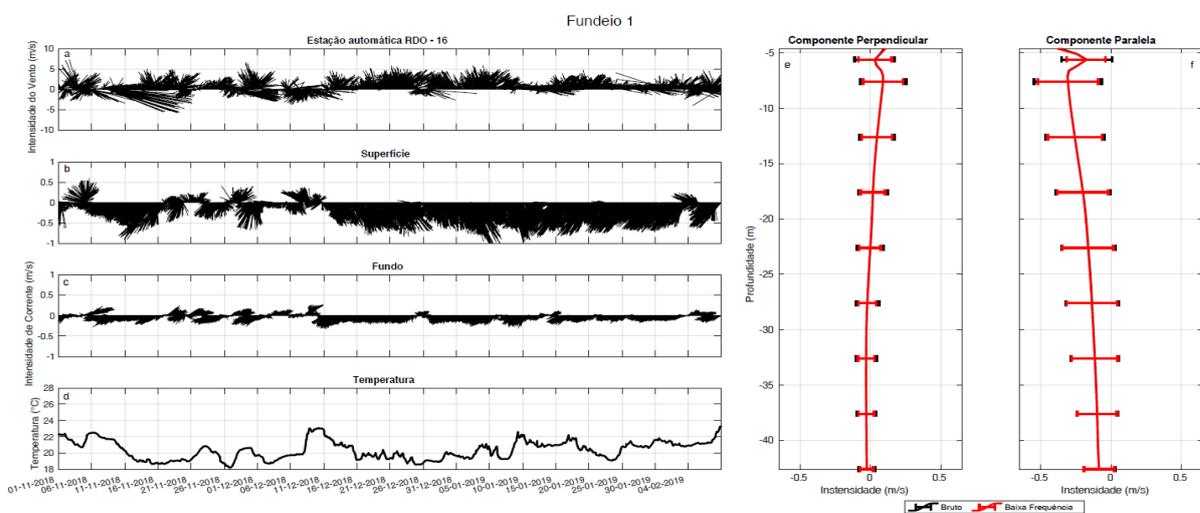
As análises dos parâmetros aferidos nos fundeios foram realizadas abrangendo toda a coluna d'água, chamando a atenção para padrões observados na superfície e no fundo. A superfície quando mencionada refere-se a aproximadamente 3 m de profundidade e o fundo representa o último bin correspondente às profundidades locais.

1.5.1 FUNDEIO 1

A região da Costa das Algas, onde foi instalado o F1, mostrou diferenças entre as correntes superficiais e as de fundo (Figura 67). As correntes superficiais apresentaram maior intensidade quando comparadas às correntes no fundo, com picos de até 1 m/s. Aproximadamente a partir de 11 de dezembro de 2018, ficou evidente um período longo de relativa estabilidade do vento (Figura 67 A), com ventos do quadrante norte-nordeste dominando e poucas inversões até fevereiro de 2019. Isso se refletiu nas correntes superficiais locais, mostrando correntes para sul-sudoeste (Figura 67 B) com uma orientação paralela às isobatimétricas locais. Nesse mesmo período as correntes de fundo mostraram uma tendência semelhante, embora com velocidades menores e com uma componente perpendicular à costa negativa (Figura 67 C), acompanhada de uma diminuição da temperatura junto ao fundo, com aumentos episódicos (Figura 67 D). A temperatura permaneceu abaixo de 22°C durante boa parte do período, com temperaturas inferiores a 19°C em diversos momentos.

Do início das observações até o início do mês de dezembro, ocorreram diversas inversões na direção e intensidade das correntes com duração entre 2 e 4 dias (Figura 67 B) e do vento (Figura 67 A). Essas inversões se refletiram em um aumento temporário de temperatura junto ao fundo de até 3°C (Figura 67D), com um atraso variável entre a inversão das correntes e as mudanças de temperatura junto ao fundo.

Figura 67: Fundeio 1 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. A barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência



Fonte: autoria própria.

Em média, no período de observação das correntes entre novembro e início de fevereiro, a componente perpendicular (Figura 67 E) à costa apresentou valores positivos (isto é, em direção ao oceano aberto) da superfície até aproximadamente 17 m de profundidade. A partir desta profundidade, a componente perpendicular apresentou uma inversão, em direção à costa com intensidades menores que 0,1 m/s. Este padrão de circulação está de acordo com o processo de ressurgência costeira de Ekman forçado pela atuação de ventos (tensão de cisalhamento) do quadrante nordeste. Nele a água superficial é advectada offshore via transporte de Ekman e a água fria se desloca em direção à costa próximo ao fundo. O processo de downwelling costeiro ocorre, por exemplo, quando forçado por ventos (tensão de cisalhamento) do quadrante sul-sudeste e a circulação é revertida. A componente paralela à costa apresentou, em média, deslocamento para sul ao longo de toda a coluna d'água, com intensidades variando de 0,36 m/s na superfície a 0,08 m/s próximo ao fundo (Figura 67 F).

Retirando a influência da maré na circulação local, observam-se diferenças pequenas entre os valores dos dados brutos e as velocidades da escala subinercial locais (período inercial local aproximadamente 35h). O desvio-padrão das correntes brutas e subinercial é parecido e a diferença está na ordem de 10-2 m/s em todo o perfil de ambas as componentes (perpendicular e paralela à costa – Figura 67 E, Figura 67 F) e corresponde a menos de 0,02 m/s da velocidade das correntes no local. Esse resultado

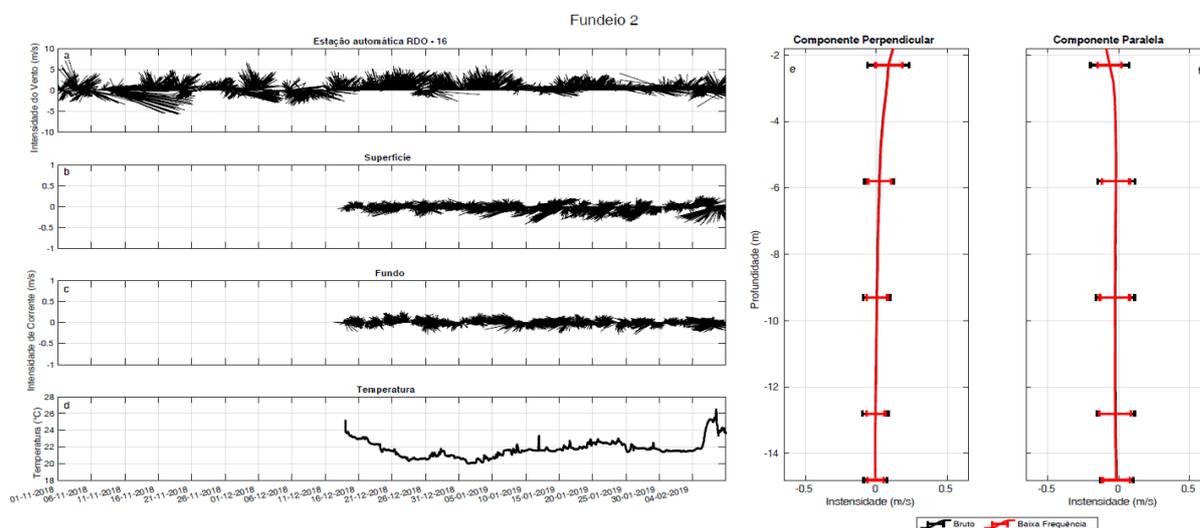
mostrou uma dominância da escala subinercial (associada essencialmente às variações de vento local e remoto) na variância de correntes na APA Costa das Algas.

1.5.2 FUNDEIO 2

O fundeio F2 está localizado na região ao sul da foz do Rio Doce em uma área denominada de depocentro (Bourguignon et al., 2018). 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°W), passando para uma posição mais próxima à costa (19,71°S /39,84°W), coletando dados entre meados de dezembro de 2018 e início de fevereiro de 2019.

De uma forma geral, as correntes medidas nesta posição apresentaram uma alta variabilidade direcional das correntes ao longo de toda a coluna d'água, variabilidade essa maior do que aquela observada na região da Costa das Algas (fundeio F1) localizado ao sul deste ponto. As intensidades das correntes foram relativamente menores que aquelas observadas no fundeio F1, com máximos inferiores a 0,5 m/s, tanto na superfície quanto no fundo (Figura 68).

Figura 68: Fundeio 2 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. As barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência.



Fonte: autoria própria.

Semelhante a Costa das Algas, as correntes próximas e ao sul da foz do Rio Doce mostraram, na média, uma diferença de direção preferencial entre a superfície e o fundo na componente perpendicular à costa, isto é, em direção offshore na superfície (primeiros 6 m, aproximadamente) e onshore no restante da coluna de água. No entanto, as intensidades médias das correntes perpendiculares à costa apresentaram valores bem próximos do zero (na escala de 10⁻³ m/s) (Figura 68 E). A componente paralela à costa na região apresentou média negativa em toda a coluna d'água, sugerindo um

direcionamento preferencial para sudoeste no período amostrado, com intensidades na escala de 10-2 m/s (Figura 68 F). A baixa magnitude média das correntes refletiu exatamente a alta variabilidade direcional descrita previamente.

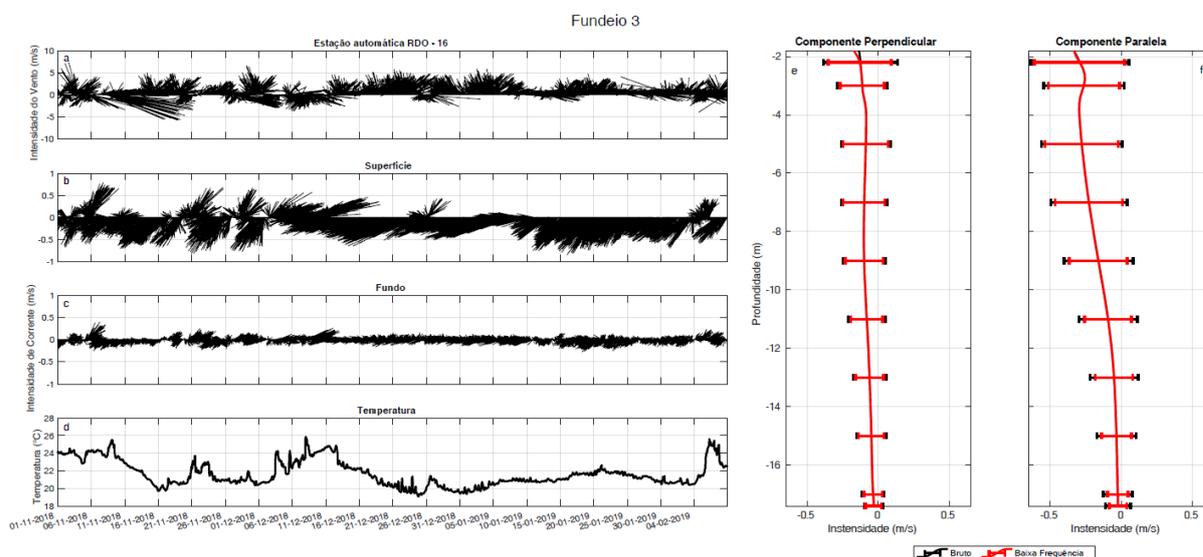
Comparando-se as médias e respectivos desvios-padrão das componentes paralela e perpendicular à costa entre os dados brutos e as correntes subinerciais - retirando a influência de processos de alta frequência como a maré - observou-se que os perfis apresentaram valores muito próximos, semelhante ao que ocorre em F1. Diferente do F1, no entanto, as correntes na foz do Rio Doce apresentaram no período de dezembro a início de fevereiro inversões constantes e muitas vezes diárias não acompanhando em muitos momentos as inversões observadas na distribuição do vento (Figura 68 A). Esse comportamento se manteve tanto na superfície quanto nas correntes próximas ao fundo (Figura 68 C) 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).

Embora a temperatura observada junto ao fundo no Fundeio F2 tenham variado entre 21°C e 23°C durante quase todo o período amostrado, ela foi maior do que a medida no fundeio F1, mas com variabilidade semelhante à observada no fundeio da APA Costa das Algas (Figura 68 D). Os menores valores encontrados chegam a 20°C, encontrados no início de janeiro e os maiores ultrapassam 26°C verificados no início de fevereiro.

1.5.3 FUNDEIO 3

A circulação costeira ao norte da Foz do Rio Doce (Povoação) apresentou semelhanças às correntes medidas na região da APA Costa das Algas (Figura 67). Contudo, as correntes nesta posição (Figura 69) foram mais intensas do que aquelas observadas ao sul da foz do Rio Doce no fundeio F2 (Figura 68).

Figura 69: Fundeio 3 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. A barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência.



Fonte: autoria própria.

Igualmente ao verificado no Fundeio 1 (Figura 67), as inversões de correntes foram mais frequentes no período inicial de amostragem, ao longo do mês de novembro até a primeira quinzena de dezembro, correlacionadas positivamente com às inversões na distribuição temporal de vento observadas no mesmo período (Figura 69 A). 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 o mesmo período de intensos ventos do quadrante norte-nordeste (Figura 69 B). As correntes no fundo, no entanto, apresentaram uma variabilidade direcional maior quando comparadas às velocidades de fundo no fundeio F1. Foi recorrente ao longo do período de ventos norte-nordeste uma componente perpendicular à costa negativa acompanhada de uma gradual diminuição de temperatura no fundo (Figura 69 D), características do processo de ressurgência costeira que ocorre na região. Durante a entrada de frentes e inversões de vento e corrente, as medições mostraram aquecimentos efêmeros da temperatura no fundo e uma componente perpendicular à costa positiva.

As correntes médias apresentaram componentes de velocidade paralela e perpendicular à costa negativas ao longo de toda a coluna d'água (Figura 69 E, F). Esse último é distinto do estimado para o fundeio F1 (Figura 67 E) que reverte o sentido da corrente na profundidade de 17 m. Ainda que a componente paralela à costa seja igualmente negativa ao apresentado na Figura 67 F, o cisalhamento vertical no perfil médio mostrado na Figura 69 F é claramente maior, principalmente quando se compara o desvio padrão das medidas entre os primeiros e os últimos 5 metros da coluna de água.

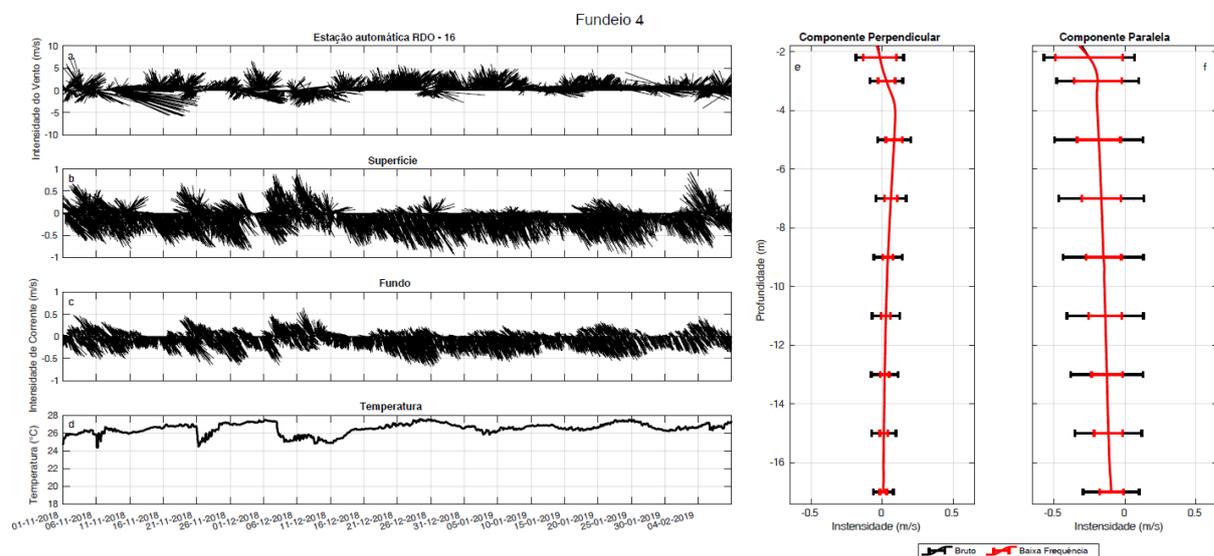
Apesar da diferença entre os valores de desvio-padrão da série bruta e da série filtrada em baixa frequência ser levemente maior para a componente paralela à costa, a magnitude da diferença está na

escala de 10-2 m/s sugerindo novamente uma dominância da escala subinercial na variância de correntes tal qual determinado para o fundeio F1.

1.5.4 FUNDEIO 4

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 70 mostra os resultados obtidos.

Figura 70: Fundeio 4 – Distribuição temporal do (a) vento 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 de 2018 a início de fevereiro de 2019. As linhas horizontais pretas e vermelhas (sobrepostas) representam o desvio padrão nas profundidades selecionadas. As barras pretas referem-se aos dados brutos e a vermelha à baixa frequência.



Fonte: autoria própria.

As correntes apresentaram homogeneidade vertical ao longo de grande parte do registro, com pequeno cisalhamento vertical de correntes entre a superfície e o fundo. Embora ainda houvesse uma forte influência do vento nas correntes e após a segunda quinzena de dezembro tenha sido visível um padrão semelhante ao observado nos fundeios F1 e F3, sobre o sinal de baixa frequência do vento nas correntes se sobrepôs um sinal semidiurno associado à oscilação da maré na região, impondo mudanças em alta frequência na intensidade das correntes locais, tanto em superfície quanto no fundo (Figura 70). As correntes na superfície e no fundo tiveram picos de magnitude superiores a 0,5 m/s.

Em média, as correntes foram dominadas pela componente paralela à costa, com a componente perpendicular em média inferior a 0,1 m/s (Figura 70 E, F). A componente paralela à costa atingiu 0,3 m/s mais próximo à superfície e valores próximos de 0,2 m/s na maior parte da coluna.

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 e próximo à foz do Rio Doce a variabilidade das correntes subinerciais era responsável pela maior parte

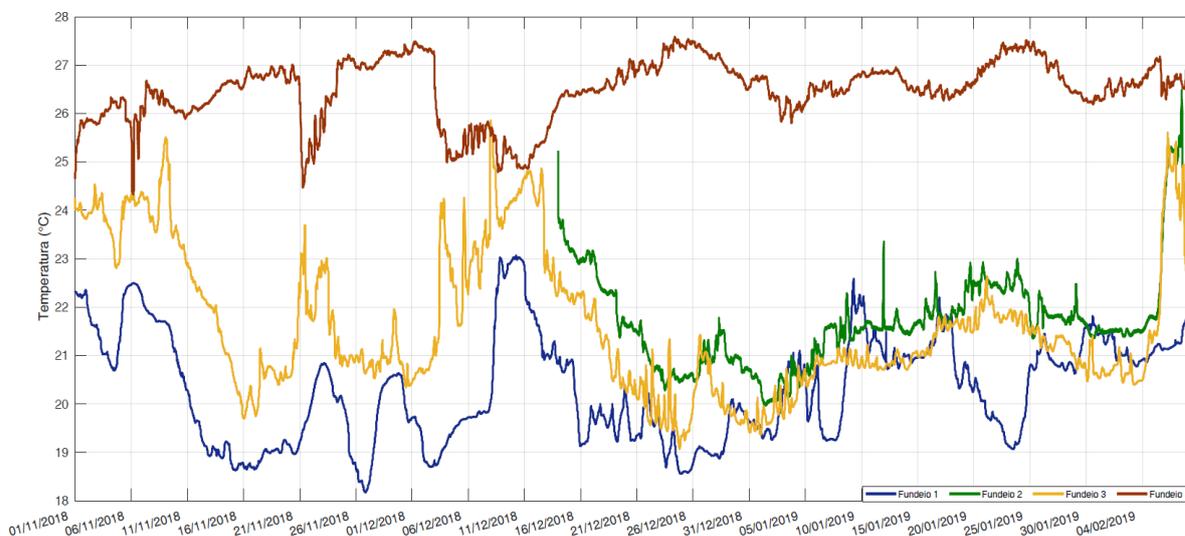
do desvio em torno das correntes médias, na região de Degredo as correntes suprainerciais exerceram um papel importante na variabilidade total das correntes locais (Figura 70 E, F). As séries de correntes suprainerciais apresentaram, na maior parte do tempo, velocidades superiores às correntes subinerciais ao longo da coluna d'água.

As temperaturas junto ao fundo na localização do fundeio F4 foram mais elevadas quando comparadas aos demais fundeios, apresentando média em torno de 26,5°C, com máxima em 27,6°C e mínima em 24,3°C (Figura 70 E). A temperatura no fundeio F4 se comportou de forma inversa e com menor variabilidade em relação aos demais fundeios. Quando aumentos de temperatura foram observados nos outros fundeios, no F4 havia decaimento, da mesma forma quando ocorreram decaimentos de temperatura nos demais fundeios, foram observados aumentos no F4.

1.5.5 COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS FUNDEIOS

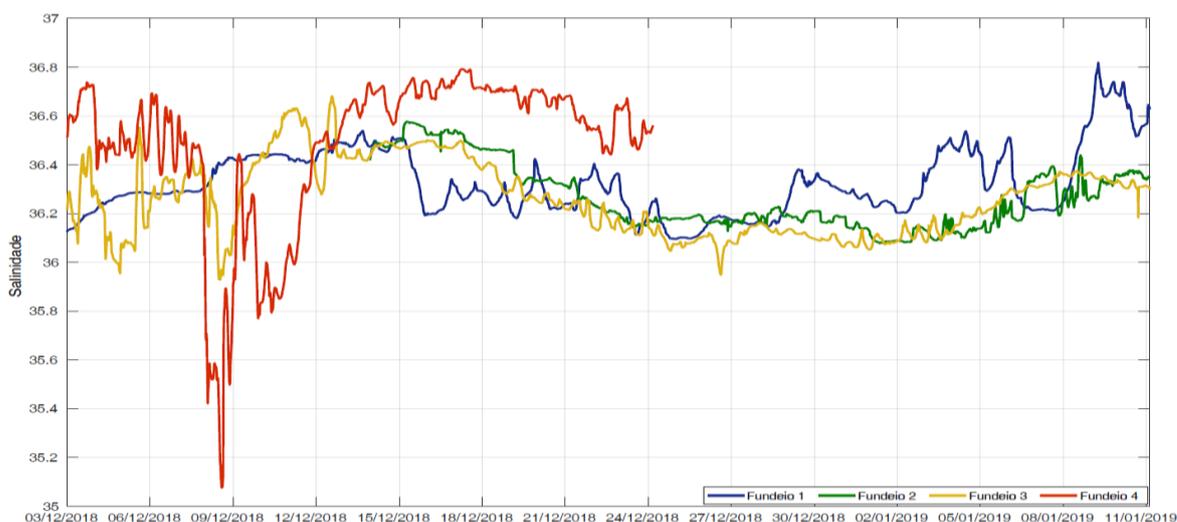
Associadas aos processos de ressurgência costeira na região, as menores temperaturas foram registradas na Costa das Algas, onde o fundeio foi instalado em maiores profundidades se comparado aos demais (Figura 71). A menor temperatura do registro foi de 18,3°C, característico de ACAS sobre a plataforma continental. Devido aos problemas com os CTDs, a salinidade está disponível apenas entre o início de dezembro de 2018 e primeira quinzena de janeiro de 2019 (Figura 72). Em Degredo, o registro foi ainda menor, indo apenas até 24 de dezembro. Assim como descrito para as correntes, a temperatura próxima ao fundo mostrou uma diferença significativa entre a região ao norte da Foz do Rio Doce e a região de Degredo. Enquanto a Costa das Algas, sul e norte da Foz do Rio Doce (F1, F2 e F3) mostraram eventos de aumento e diminuição de temperatura coerentes (na maior parte do tempo), a temperatura próxima ao fundo em Degredo mostrou um comportamento inverso aos demais. O contraste foi bastante evidente especialmente entre F3 e F4. Nos momentos de entradas de frentes e ventos de sul, as temperaturas próximas ao fundo ao norte do Rio Doce aumentaram enquanto em Degredo diminuíram. Estes foram os momentos de menor contraste térmico entre as regiões. Inversamente, quando os ventos mais frequentes na região de norte-nordeste retornaram (e.g., a partir de 11 de dezembro de 2018), a temperatura em F3 diminuiu e em F4 aumentou. As diferenças de temperatura entre F3 e F4 foram superiores, em alguns momentos, a 7°C, indicando uma região de uma forte frente térmica entre o norte da foz e Degredo. Esses resultados apresentaram semelhanças com as observações no sensoriamento remoto e perfilagem, e com os resultados de simulações numéricas, indicando que a região apresenta duas áreas com dinâmicas costeiras diferentes, com limite entre o norte da foz e Degredo durante o verão.

Figura 71: Variação da temperatura junto ao fundo nos Fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de Novembro de 2018 a Fevereiro de 2019.



Fonte: autoria própria.

Figura 72: Variação da salinidade junto ao fundo nos Fundeios F1 (azul), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de Dezembro de 2018 a Janeiro de 2019.

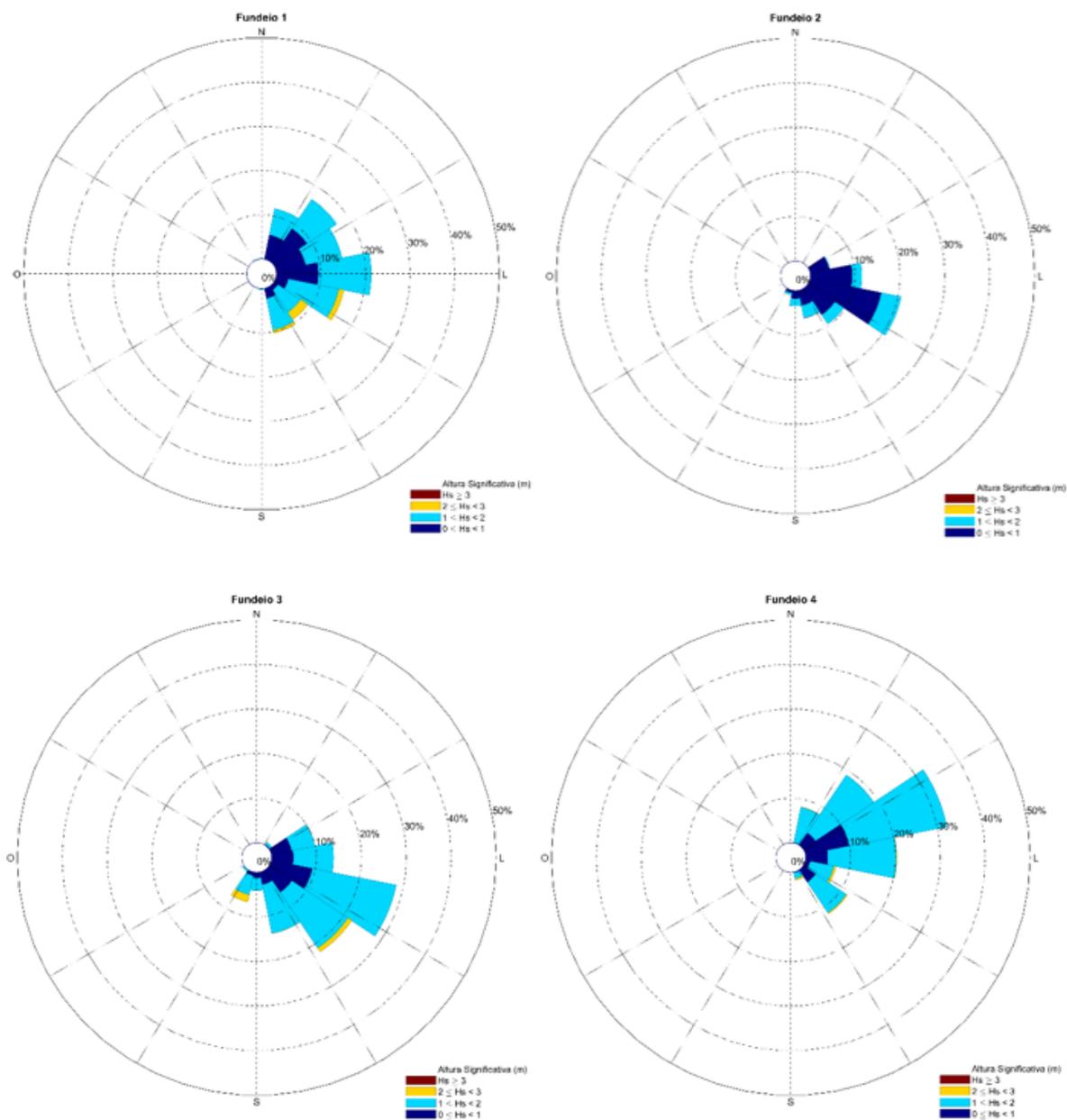


Fonte: autoria própria.

1.5.6 ONDAS

As observações de ondas de gravidade na região entre a APA Costa das Algas e Degredo apresentou resultados semelhantes, exceto para a região do fundeio F2. Na APA Costa das Algas, região norte da foz do Rio Doce e região de Degredo a altura significativa (H_s) de ondas apresentou valores entre 1 e 2 m (Figura 73) em mais de 60% do período registrado, enquanto que no Fundeio 2, por sua vez, o H_s variou entre 0 e 1 m em 75% dos casos.

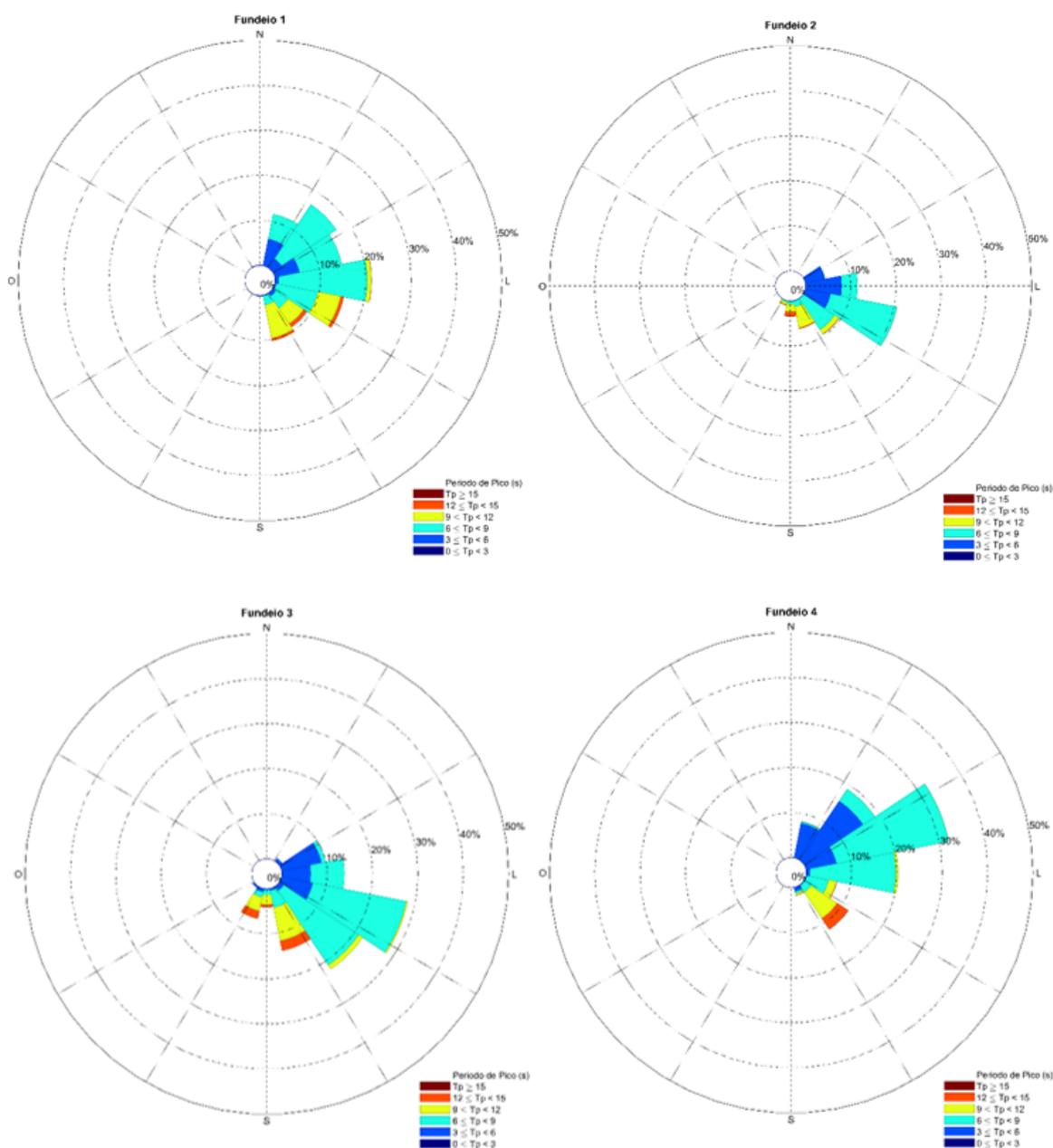
Figura 73: Distribuição das Alturas Significativas de onda em relação as Direções de Pico preferenciais nos quatro fundeios analisados.



Fonte: autoria própria.

Nos 4 fundeios analisados a moda amostral apresentou valores de T_p de 6 a 9 s representando acima de 50% dos valores em todos os fundeios, sendo mais expressivo no Fundeio 1, com 64%. Os períodos de Swell associados às ondulações de origem remota (neste relatório foram considerados os períodos acima de 9 s) corresponderam a mais de 17% nos fundeios F1, F2 e F3, sendo menos expressivo em F4 com 12% e mais expressivo no F1, com 19,9% dos dados apresentados (Figura 74).

Figura 74: Distribuição dos Períodos de Pico de onda em relação as Direções de Pico preferenciais nos quatro fundeios analisados.

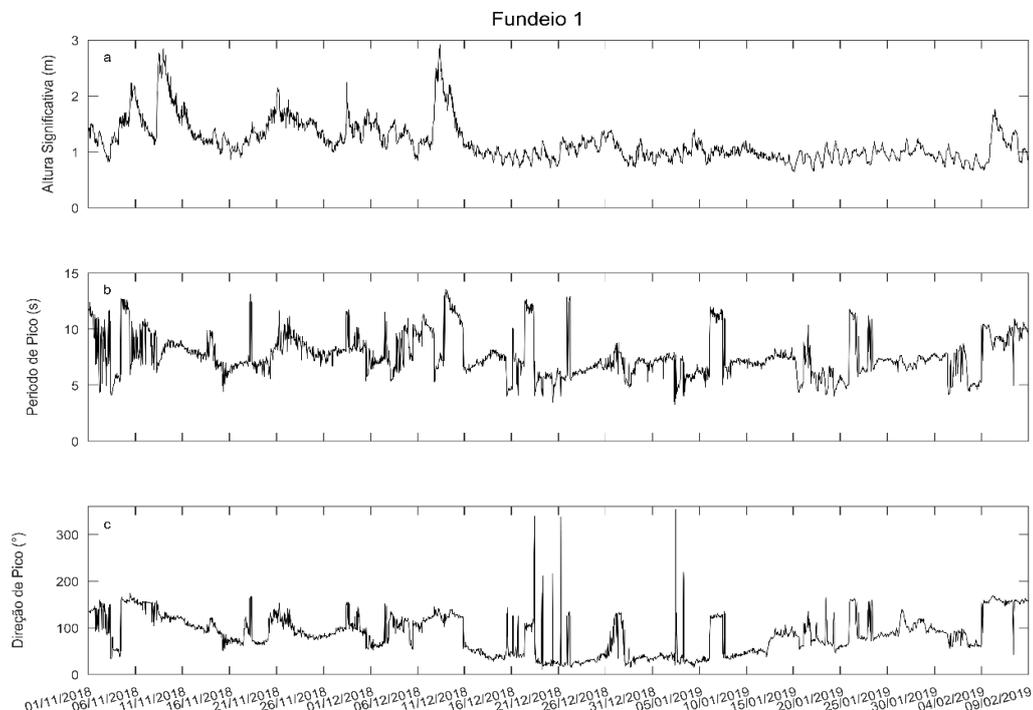


Fonte: autoria própria.

Os valores de Período de Pico (T_p) demonstraram semelhanças entre os quatro fundeios (Figura 75 B, Figura 76 B, Figura 77 B e Figura 78 B). Valores de H_s entre 2 e 3 m ocorreram nos fundeios F1, F3 e F4 chegando a 2,92 m no Fundeiro 1 (Figura 75 A, Figura 76 A, Figura 77 A e Figura 78 A). Dois eventos de aumento do H_s de ondas (nas primeiras quinzenas de novembro e dezembro) apresentaram valores de H_s de ondas superiores a 2,5 m. Nesses eventos, o aumento de H_s foi acompanhado de um aumento do T_p e mudanças na direção de pico. Os maiores valores de H_s e T_p estiveram principalmente associados a direções SE e SSE, as quais ocorreram em proporções variadas entre os Fundeios, sendo mais expressivos no fundeiro F1 (Figura 75 C, Figura 76 C, Figura 77 C e Figura 78 C). As variações de

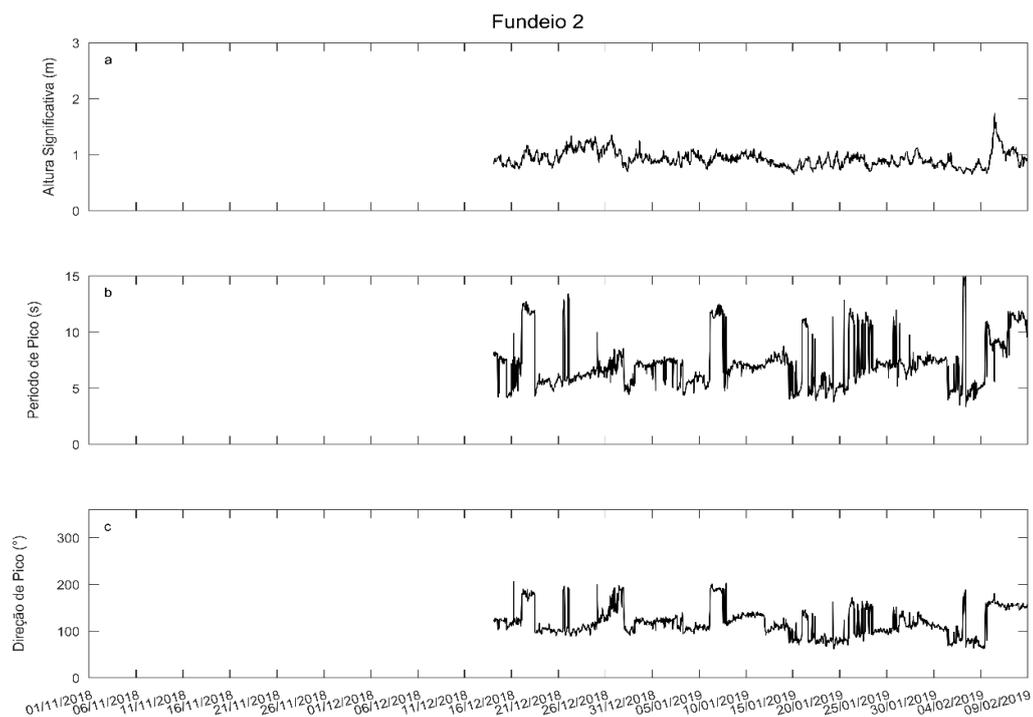
direção de onda ficaram concentradas entre as direções E e S, exceto em F4, cujas direções se concentraram entre NE e E.

Figura 75: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F1.



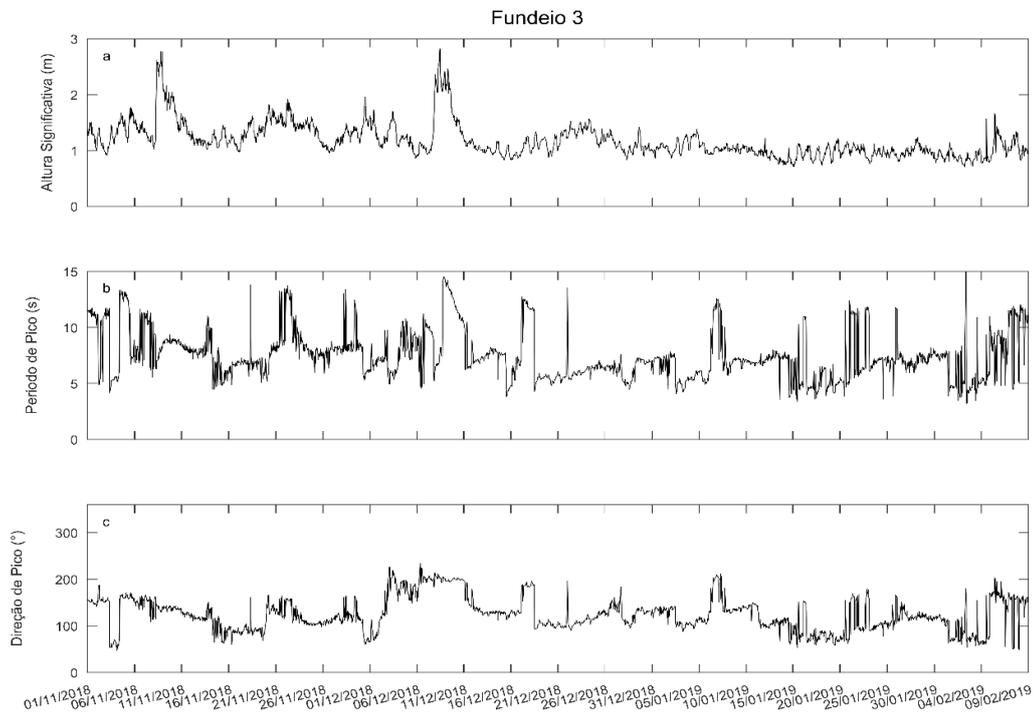
Fonte: autoria própria.

Figura 76: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F2.



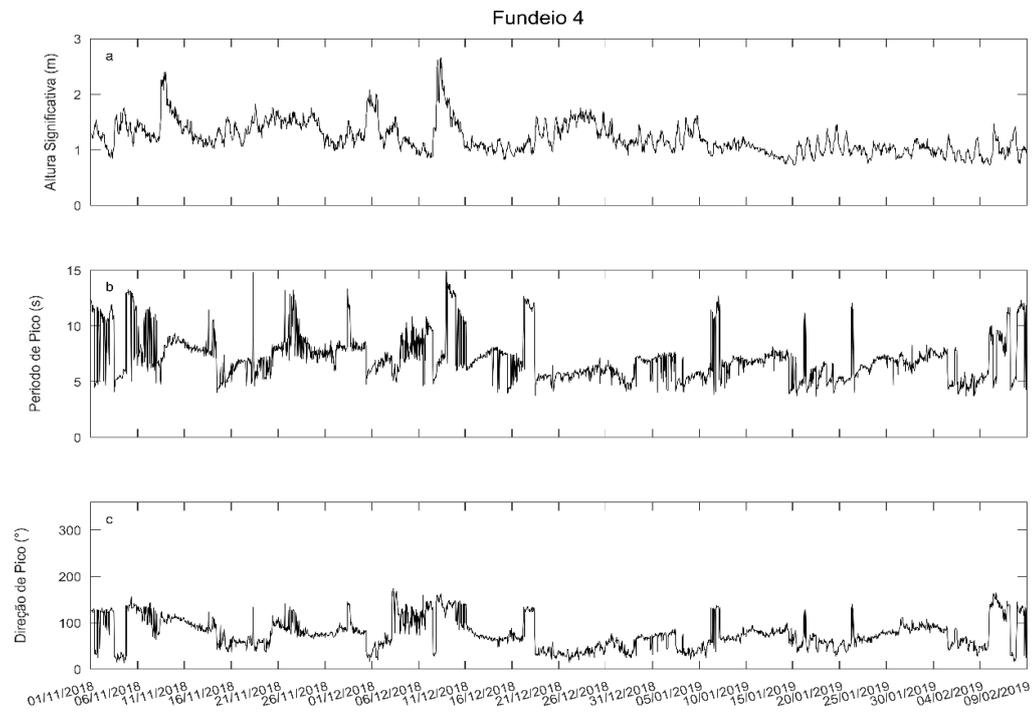
Fonte: autoria própria.

Figura 77: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F3.



Fonte: autoria própria.

Figura 78: Série temporal de (a) Altura significativa, (b) Período de Pico e (c) Direção de Pico das ondas verificadas no F4.



Fonte: autoria própria.

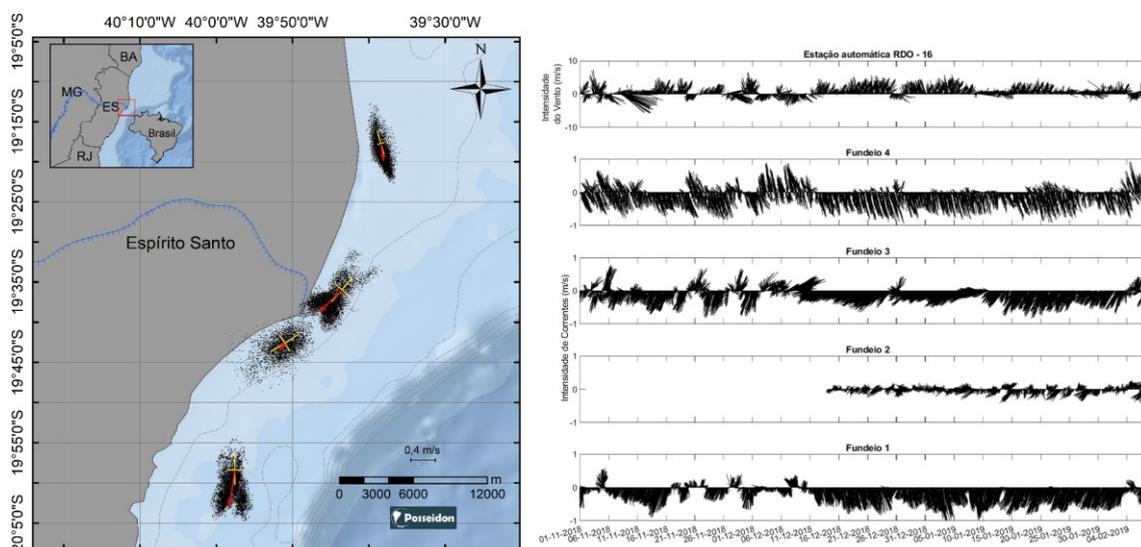
A direção das ondas nos diferentes fundeios deve ser avaliada com cautela. Embora seja possível associar períodos de aumento de Hs a mudanças atmosféricas locais e remotas, a refração de ondas é um importante fator local de alteração da direção de ondas devido à profundidade local de instalação dos fundeios. A refração local das ondas, bem como o regime de vento atuante fizeram com que fossem observadas diferenças de direção preferencial na incidência das ondas nos pontos amostrados (Figura 78 B). O Fundeio 2 mostrou-se diferenciado por não contemplar o mesmo período de dados dos demais fundeios. Porém, analisando os períodos coincidentes, observou-se uma coerência entre o padrão observado no fundeio F2 com as observações realizadas nos fundeios F1, F3 e F4.

1.5.7 VARIABILIDADE DAS CORRENTES E O VENTO LOCAL

A seção anterior caracterizou as observações realizadas nas quatro diferentes áreas, descrevendo as principais características do registro de correntes 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 nas quatro regiões apresentaram um alinhamento paralelo às isóbatas, com uma rotação da direção do vetor médio conforme a batimetria local (Figura 79). As correntes médias superficiais na APA Costa das Algas apresentaram uma magnitude de 0,42 m/s, com direção para sudoeste-sul. A região de lançamento de F2, ao sul da Foz do Rio Doce, apresentaram o menor valor de corrente média superficial, de aproximadamente 0,03 m/s orientado em direção sudoeste. O espalhamento direcional dos vetores de corrente ao longo do registro mostrou que não há uma clara direção preferencial das correntes na região, embora um alinhamento com a batimetria local seja visível. Ao norte da foz do Rio Doce a corrente média superficial mostrou valores maiores se comparado ao sul da foz, com magnitude de 0,35 m/s e orientação para sudoeste. Na região de Degredo, as correntes superficiais apresentaram uma polarização clara em direção sudeste-sul, com um vetor médio de magnitude 0,19 m/s e o menor espalhamento direcional das 4 regiões.

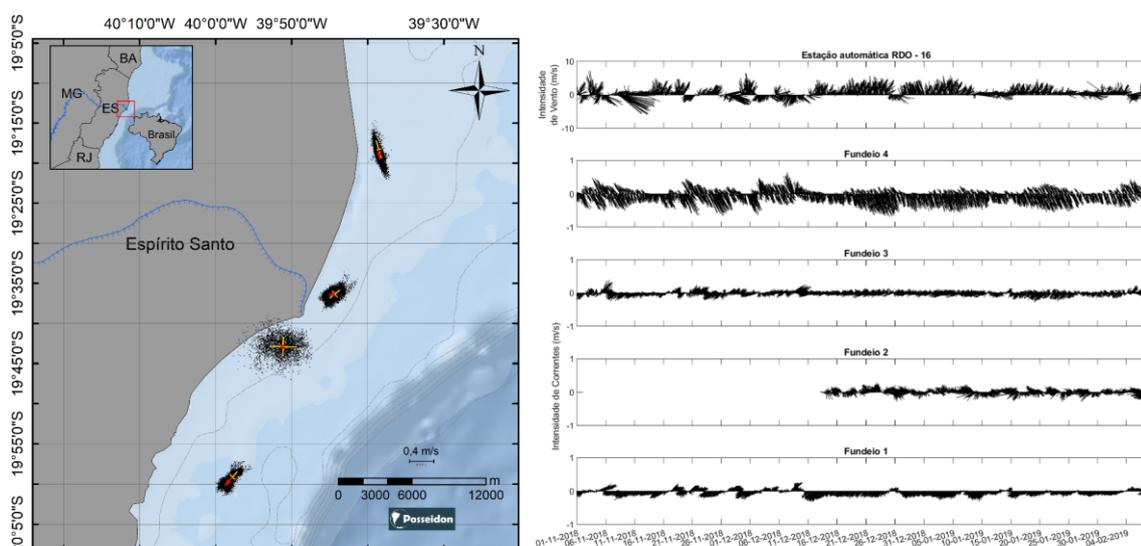
Figura 79: Espalhamento direcional das correntes medidas ao longo do período amostral (Painel à esquerda). As setas vermelhas correspondem aos valores médios de velocidades das correntes medidas próximo à superfície e, as cruzes amarelas representam o eixo preferencial das correntes. No painel à direita estão apresentadas as variações temporais de intensidade dos ventos e das correntes, em superfície, medidas nos quatro fundeios.



Fonte: autoria própria.

As correntes de fundo apresentaram mudanças em relação às correntes superficiais, tanto na direção quanto na magnitude das correntes. As correntes médias junto ao fundo nos fundeios F1, F2, F3 e F4 apresentaram magnitudes de 0,09 m/s, 0,01 m/s, 0,05 cm e 0,1 cm/s, respectivamente (Figura 80).

Figura 80: Espalhamento direcional das correntes medidas ao longo do período amostral (Painel à esquerda). As setas vermelhas correspondem aos valores médios de velocidades das correntes medidas próximo ao fundo e, as cruzes amarelas representam o eixo preferencial das correntes. No painel à direita estão apresentadas as variações temporais de intensidade dos ventos e das correntes, no fundo, medidas nos quatro fundeios.

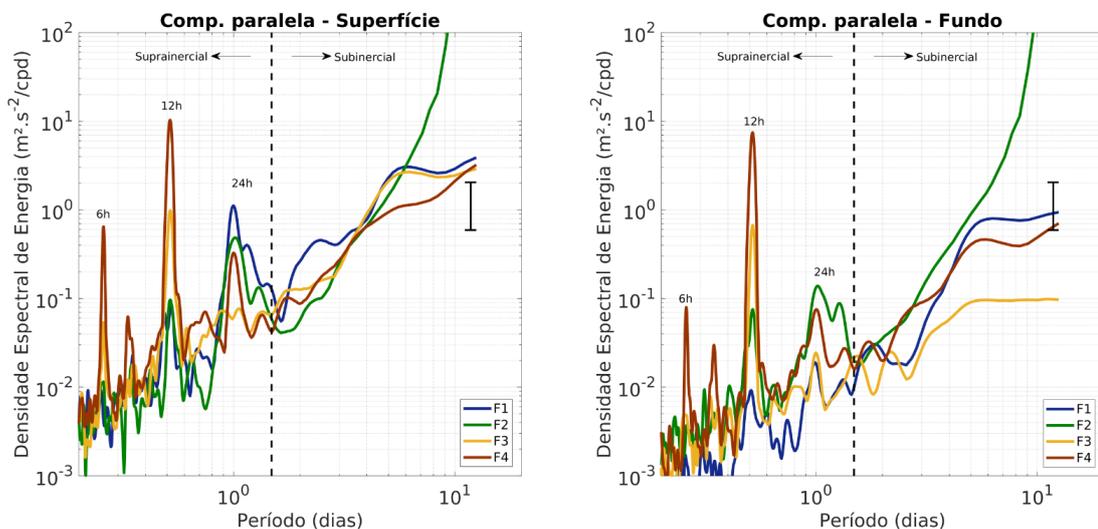


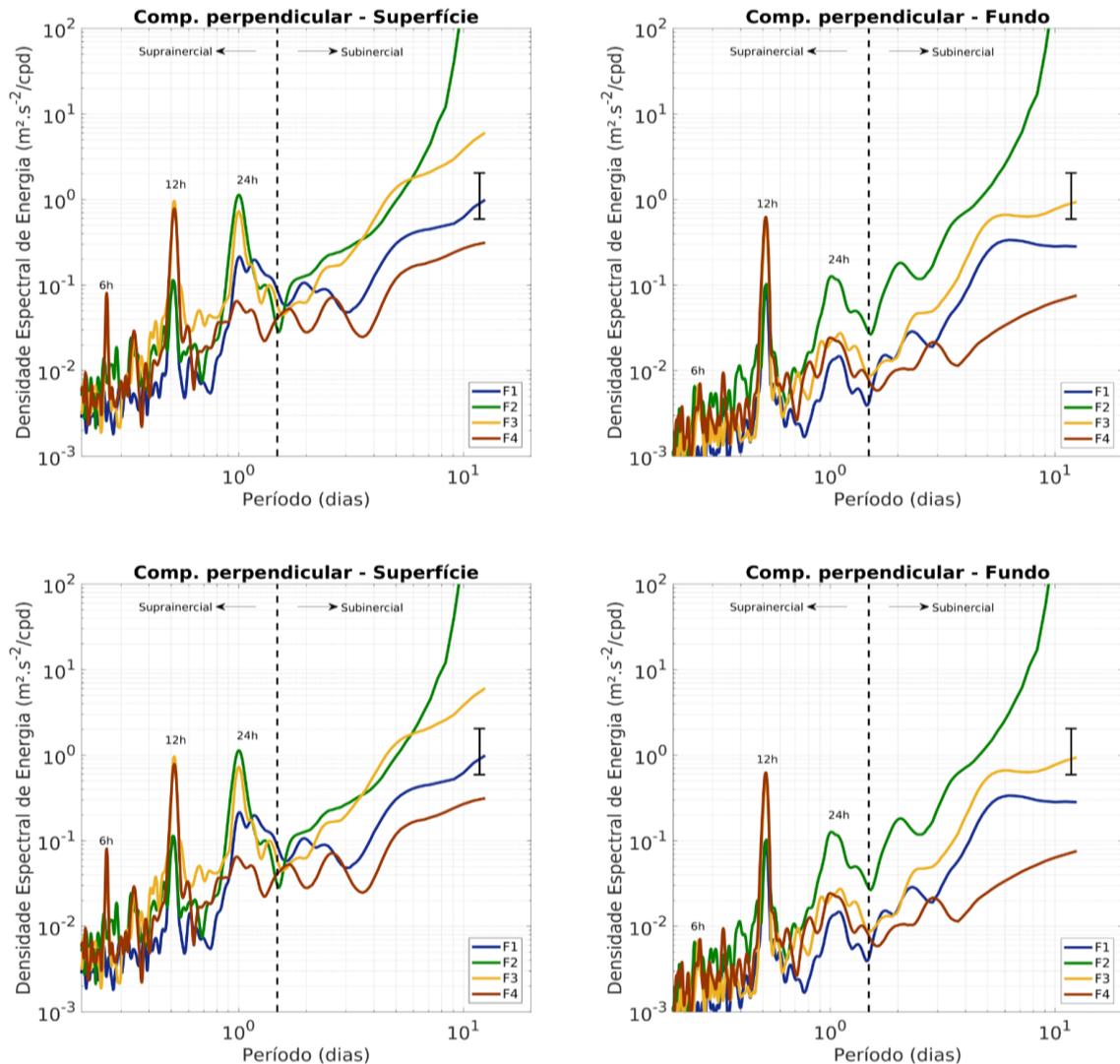
Fonte: autoria própria.

Na APA Costa das Algas e ao sul e norte da foz do Rio Doce, houve uma rotação da direção principal das correntes, aumentando a contribuição das componentes perpendiculares à costa. As séries temporais apresentadas nas Figura 79 e Figura 80 mostraram que, especialmente nos momentos em que as correntes superficiais apresentaram uma direção para sul-sudoeste (e.g, a partir da segunda quinzena de dezembro de 2018), as correntes junto ao fundo apresentaram uma componente em direção à costa, associada ao processo de ressurgência costeira local que promoveu a entrada e afloramento de águas mais frias que as superficiais desde a APA Costa das Algas até a região de F3. Já para a região de Degredo, 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. Esses resultados indicam que a região entre a Costa das Algas 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 de 2018 e fevereiro de 2019 (seção 1.4) 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.

A variabilidade temporal das correntes na região mostrou que as correntes paralelas e perpendicular à costa foram dominadas pela influência do vento e da maré (Figura 81). Para as 4 regiões a escala suprainercial apresentou o maior pico em frequências semidiurnas (~12h), com picos secundários em quarto-diurnas (~6h) e diurnas (~24h). Análises harmônicas de correntes e nível (não mostradas) mostraram as maiores amplitudes associadas à constituinte harmônica M2 (principal lunar). No entanto, houve uma regionalização da energia da maré na variância total das 4 regiões. A região de Degredo apresentou as maiores densidades espectrais de energia para os picos semidiurno e quarto-diurno, decrescendo em direção ao sul.

Figura 81: Espectro das componentes paralelas e perpendiculares das correntes na superfície e no fundo nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).





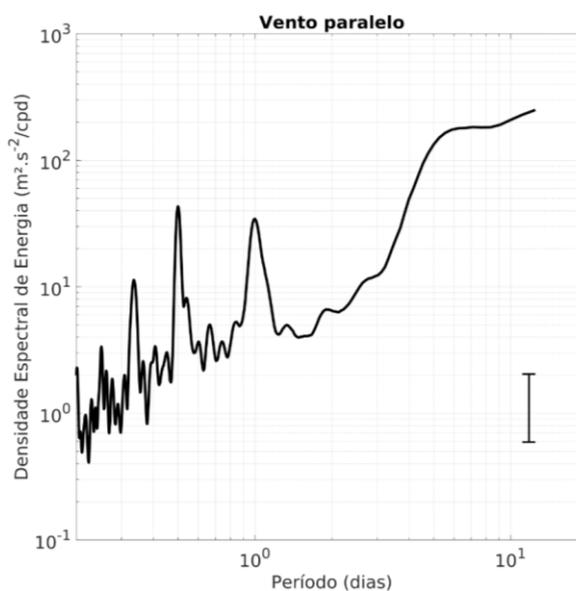
Fonte: autoria própria.

Inversamente, na escala subinercial, as correntes superficiais paralelas à costa apresentaram maior energia na região sul da foz do Rio Doce, decrescendo em direção ao norte. Essa energia se espalhou em uma faixa de 3 a 10 dias e esteve ligada às flutuações de vento local. A componente perpendicular à costa mostra maior energia na escala subinercial nos fundeios F2 e F3 (Figura 81). Essa faixa de variação também pode estar associada à propagação de ondas confinadas costeiras, que se propagam para o norte ao longo da costa brasileira e são formadas por ventos remotos. As séries temporais relativamente curtas até o momento impossibilitaram a separação dos efeitos locais e remotos do vento e foram tratados com a continuidade das observações na região.

Ainda na escala subinercial, os ventos na região mostraram frequências de variabilidade (Figura 82) semelhantes aos apresentados nas correntes nos quatro fundeios. As séries de velocidade paralela à costa mostraram uma coerência espectral alta com as flutuações de vento locais (Figura 83), exceto para F2 ao sul da foz do Rio Doce. Embora a dinâmica local próxima à foz tenha apresentado energia em escalas de 3-10 dias, a coerência abaixo do limite de confiança estatística indicou que as correntes

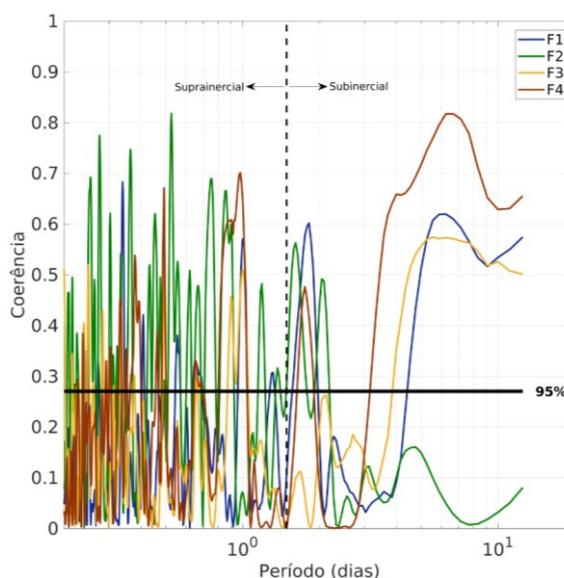
em F2 apresentaram flutuações com esse período que não estiveram relacionadas às oscilações do vento local. Deve-se ressaltar, que a séries de velocidade em F2 foram consideravelmente menores que as demais, e os equipamentos foram instalados a partir de um período de relativa estabilidade dos ventos locais. Espera-se que a continuidade das observações permita analisar com mais profundidade a importância do vento local e outras forçantes na variabilidade de correntes próximas da foz do Rio Doce.

Figura 82: Espectro da componente paralela de velocidade do vento



Fonte: autoria própria.

Figura 83: Coerência espectral entre a componente paralela do vento e as correntes paralelas nos fundeios F1 (azul), F2 (verde), F3 (amarelo) e F4 (vermelho).



Fonte: autoria própria.

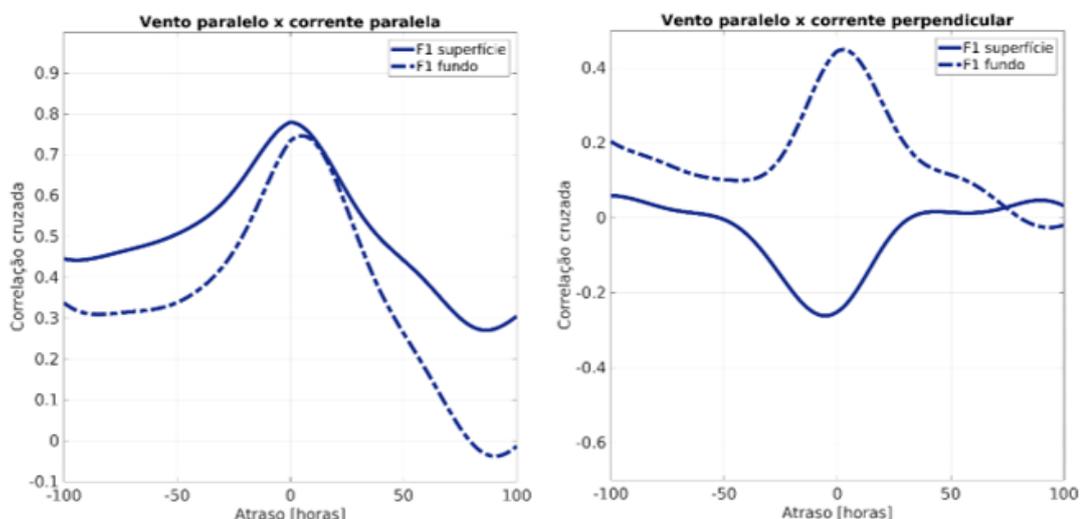
A região de Degredo apresentou a maior coerência com o vento em escalas subinerciais, seguido da região da APA Costa das Algas. Essas regiões, no entanto, apresentaram respostas diferentes na

vertical em relação à transferência de momento realizada pelo vento. Análises de correlação cruzada entre o vento paralelo e as correntes paralelas na Costa das Algas mostraram que as correntes superficiais tiveram uma resposta quase imediata à ação do vento (atraso entre 0 e +1h), enquanto que o fundo mostrou um atraso de cerca de +6h para responder à ação do vento na superfície (Figura 85).

Na região de Degredo a superfície e o fundo responderam quase juntos a influência do vento. Enquanto a superfície mostrou um atraso de +7h para responder ao vento, o fundo mostrou uma correlação cruzada máxima com um atraso de +9h. Isso reforçou a ideia de uma coluna d'água misturada (sem estratificação) que apresentou pouca variação vertical das correntes (ambiente barotrópico) e pequeno cisalhamento vertical.

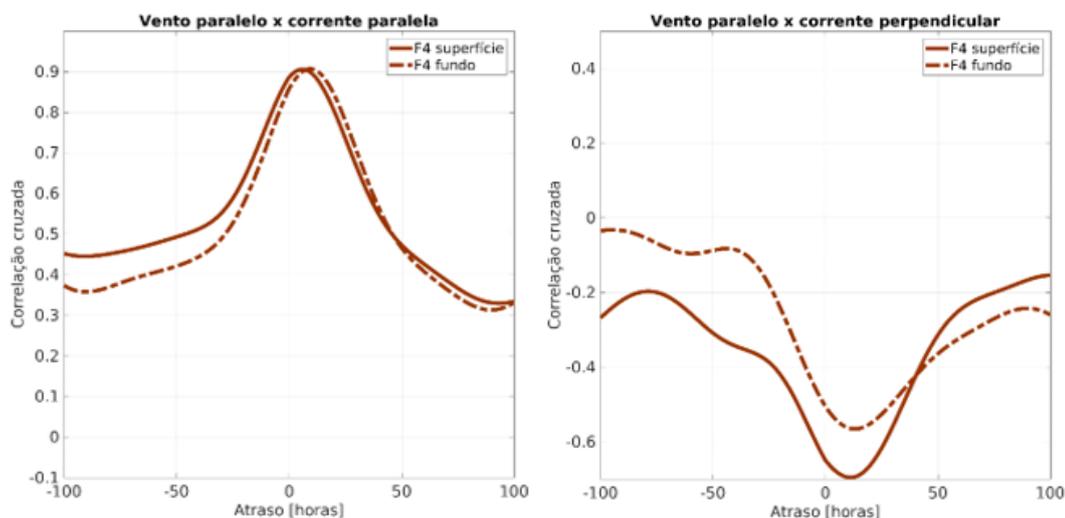
A análise da correlação cruzada entre o vento paralelo à costa e as correntes perpendiculares mostrou uma diferença significativa entre as regiões extremas ao norte e a sul da área de observação de correntes. Na região da APA Costa das Algas (Figura 84), a superfície apresentou uma correlação negativa com o vento, com atraso de +6h, enquanto o fundo apresentou uma correlação positiva com um atraso de -10h. Essas correlações mostraram um processo de ressurgência costeira local respondendo ao estímulo do vento. Quando o vento paralelo à costa apresentou uma forte componente negativa (ventos de nordeste), na região da superfície se estabeleceu uma componente perpendicular positiva (retirando águas superficiais para o oceano aberto), enquanto que o fundo apresentou uma componente perpendicular negativa, levando águas oceânicas em direção à costa. O atraso negativo indicou que o movimento da camada de subsuperfície não dependeu apenas do vento local, mas de um efeito regional do vento atuando na formação de ressurgência/subsidência. A região de Degredo apresentou respostas distintas na correlação entre o vento paralelo e as correntes perpendiculares (Figura 85). Tanto a superfície quanto o fundo apresentaram correlações negativas com o vento com atrasos de +12h e +13h, mostrando novamente que a região apresentou uma resposta barotrópica ao estímulo do vento.

Figura 84: Correlação entre o vento paralelo e a corrente paralela e perpendicular à costa na superfície (linha contínua) e no fundo (linha tracejada) na região da Costa das Algas (F1).



Fonte: autoria própria.

Figura 85: Correlação entre o vento paralelo e a corrente paralela e perpendicular à costa na superfície (linha contínua) e no fundo (linha tracejada) em Degredo (F4).



Fonte: autoria própria.

1.6 MODELAGEM NUMÉRICA

1.6.1 INTRODUÇÃO

A modelagem numérica proposta e em execução no presente monitoramento objetiva dar uma visão sinóptica 3D da dinâmica de dispersão da pluma do Rio Doce e das condições hidrodinâmicas da plataforma continental do Espírito Santo e sul da Bahia, o que vem a ser uma complementação às observações realizadas *in situ*. A análise conjunta de ambas as abordagens permitiu uma ampla investigação dos aspectos oceanográficos costeiros, que somada as observações *ex situ* (sensoriamento remoto) permitem uma melhor compreensão da atuação das forçantes externas sobre a hidrodinâmica costeira. Nesse contexto, o uso de modelos numéricos faz-se importante devido a sua empregabilidade em estudos costeiros e regionais, envolvendo rotineiramente a análise em conjunto de dados *in situ* e *ex situ*, necessários para o estudo da dinâmica de plumas de rios devido sua natureza de alta variabilidade espaço-temporal.

Plumas de rios são conhecidas por possuírem alta variabilidade, sendo suas formas, tamanhos e dinâmicas controladas por uma combinação complexa, na qual são consideradas a vazão fluvial, os ventos locais, as ondas, as marés, as correntes costeiras, a batimetria local e a força de Coriolis (Chant, 2011). Devido às plumas fluviais terem uma extensão espacial relativamente grande e escalas de variabilidade de tempo pequenas, pode ser difícil mapear sua estrutura tridimensional. No geral estudos de plumas de rios se restringem a pesquisas realizadas à bordo de embarcações oceanográficas.

As plumas fluviais são feições de submesoescala e mesoescala geralmente caracterizadas por: (a) movimento mais intenso em resposta às forçantes que atuam sobre ela, e; (b) por apresentar estratificação mais intensa que leva à redução da mistura entre a camada superficial e águas mais

profundas (Garvine 1984, 1995, Cole e Hetland, 2015). Como resultado, plumas de rios podem transportar grandes volumes de água doce, sedimentos, nutrientes, carbono, lixo e poluentes antropogênicos de dezenas a centenas de quilômetros de distância das fozes e, conseqüentemente, influenciar a qualidade da água, morfologia do fundo, produtividade biológica e as cadeias alimentares em amplas áreas costeiras (Wright, 1977; Milliman e Syvitski, 1992; Jickells, 1998; Rabalais et al., 2002; Wang, 2006; Reifel et al., 2009; Borges e Gyphens, 2010).

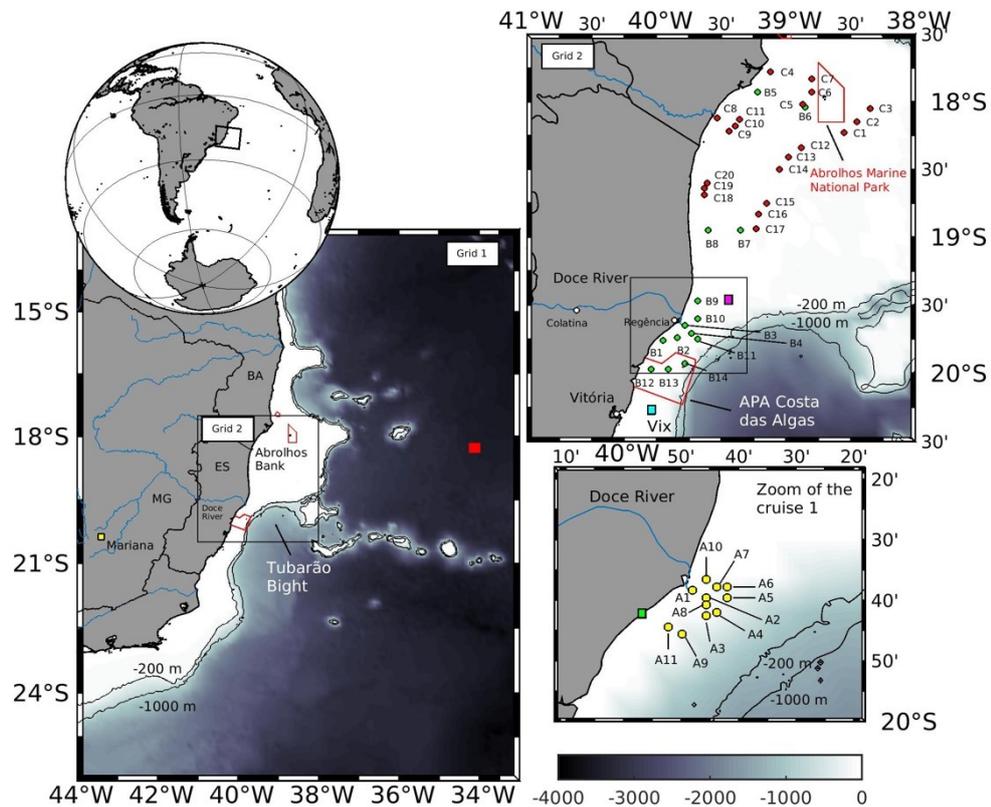
Para o desenvolvimento do estudo numérico da região da plataforma continental do Espírito Santo e sul da Bahia foram propostas duas modelagens, i) a primeira de caráter realístico sobre a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos nos primeiros meses após o desastre ambiental (modelo ROMS+STRiPE), e ii) a segunda quase-idealizada, com o objetivo de verificar a influência da direção do vento no transporte e dispersão da pluma de água doce ao longo da plataforma continental (modelo ROMS).

O período escolhido para a realização da modelagem hidrodinâmica e do transporte de sedimento foi de seis meses (novembro de 2015 até abril de 2016). A determinação deste período de simulação foi devida as seguintes razões: (a) o rompimento da barragem de Fundão, visto que mesmo três meses após o evento os rejeitos permaneceram como sendo uma importante fonte de material particulado suspenso, (Hatje et al., 2017); (b) a precipitação máxima anual ser observada em janeiro na região de estudo (Guimarães et al., 2010), e; (c) também porque houve significativa aquisição de dados coletados na região de estudo nos primeiros seis meses após o evento.

1.6.2 MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo oceânico tridimensional ROMS (Regional Ocean Modeling System, <http://www.myroms.org>) foi implementado para a área de interesse mostrada na Figura 86. Este modelo foi utilizado tanto para evidenciar processos de submesoescala e mesoescala ao longo da plataforma continental do Espírito Santo e oceano adjacente, quanto para modelar o transporte de sedimentos. Duas grades (Grade 1 e Grade 2) com distintas resoluções espaciais foram utilizadas para simular a hidrodinâmica dos anos de 2015 e 2016. Na Grade 1, a resolução espacial implementada foi de $1/24^\circ$ (aproximadamente 4,6 km), cobrindo a região de 44° e 33°W e 13° e 26°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 38°W e $17,5^\circ$ e $20,5^\circ\text{S}$) (Figura 86). Na Grade 2 foram incluídas 47 estações virtuais com saídas horárias de resultados, com as localizações determinadas de acordo com as primeiras campanhas oceanográficas realizadas após o desastre ambiental. Nessas estações foram obtidos resultados termohalinos (de temperatura e salinidade) e de velocidade do modelo hidrodinâmico, bem como a concentração (kg/m^2) de sedimento superficial do modelo de transporte de sedimento.

Figura 86: 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, localizados em pontos em que ocorreram coleta de dados *in situ* nas primeiras campanhas de monitoramento ambiental. O quadrado verde destaca a localização do marégrafo de Barra de Riacho, enquanto os quadrados rosa e vermelho destacam o ponto de localização onde foram extraídos dados de vento do banco de dados do CFSR/NCEP e de temperatura da Boia do Projeto PIRATA



Fonte: autoria própria.

A elevação da superfície foi parametrizada pela condição limite de Chapman (modo explícito) (Chapman, 1985), enquanto as parametrizações radiation/nudging e Flather (2D momentum) (Flather, 1976) foram utilizadas para as componentes baroclínicas e barotrópicas, 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 m²/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 (AH = 50 m²/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 $CD = 3 \times 10^{-3}$.

A discretização vertical é de 40 camadas sigma com os parâmetros de estiramento de superfície e fundo prescritos como 6,5 e 2,5, respectivamente. As medições *in situ* pretéritas 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 podem ser observados no Quadro 4.

Quadro 4: Dados e forçantes utilizados como condições iniciais e de contorno na modelagem hidrodinâmica.

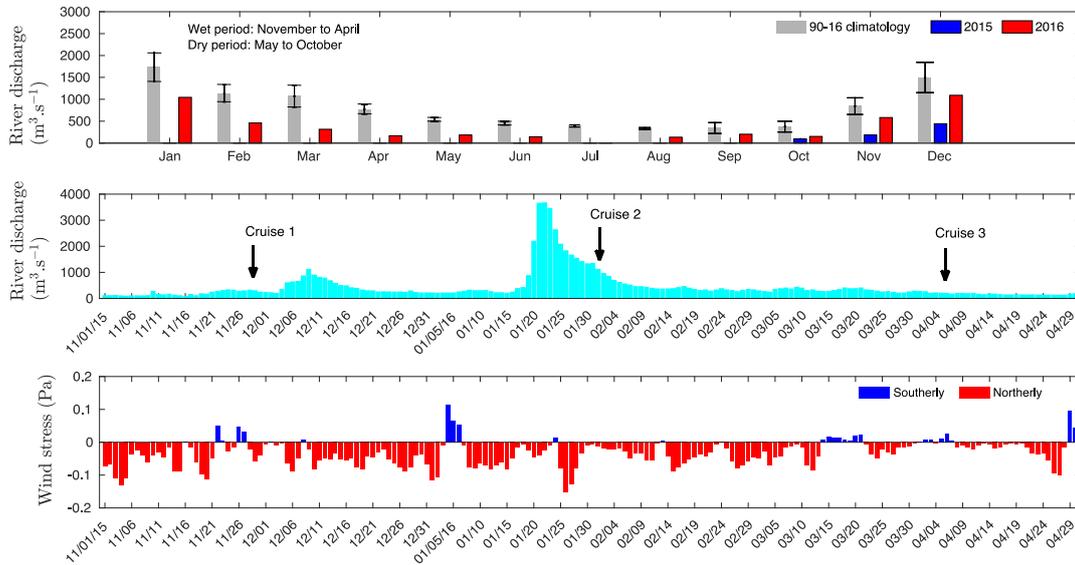
Dados e forçantes	Fonte	Resolução espacial	Resolução temporal
Batimetria	Mapa Batimétrico Geral dos Oceanos (GEBCO) (IOC e BODC, 2003)	30'	-
Atmosférica	<i>Climate Forecast System Reanalysis of National Centers for Environmental Prediction</i> (CFSR/NCEP) (Saha et al., 2010)	0,5°	6 horas
Maré (M₂, S₂, N₂, K₂, K₁, O₁, P₁, Q₁, M_f e M_m)	TPXO 7.1 (Egbert e Erofeeva, 2002)	0,25°	-
Hidrodinâmico	HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM Global) NCODA	0,5°	24 horas

Fonte: autoria própria.

1.6.2.1 Dados de vazão e tensão de cisalhamento do vento

Para a modelagem numérica oceânica foram obtidos dados diários de vazão do Rio Doce na estação de medição mais a jusante (ID:56994510, <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>, aproximadamente 110 km a montante da foz do rio), localizada na cidade de Colatina, por ter a maior série temporal contínua de dados disponíveis (de 1990 a 2016). Uma estatística básica da série de vazão (média, máximo, mínimo e desvio padrão) foi calculada para o período após o desastre ambiental até abril de 2016. A tensão de cisalhamento do vento foi calculada com base no estudo de Large e Pond (1981). A Figura 87 mostra os dados de tensão de cisalhamento do vento e vazão (2015-2016) utilizados na modelagem numérica. A climatologia da vazão inserida na figura ilustra o período de seca que o rio se encontrava à época do desastre ambiental.

Figura 87: Painel superior: dados climatológicos mensais (de 1990 a 2016) de vazão do Rio Doce combinados com médias mensais de 2015 a 2016, obtidos na estação da cidade de Colatina. As barras verticais representam o erro padrão. Painel central: medições diárias de vazão de novembro de 2015 a abril de 2016. As setas pretas marcam a data quando ocorreram três cruzeiros oceanográficos. Painel inferior: Seis meses de componente de tensão do vento CFSR/NCEP N-S (de novembro de 2015 a abril de 2016) obtido no quadrado rosa marcado na Figura 28.

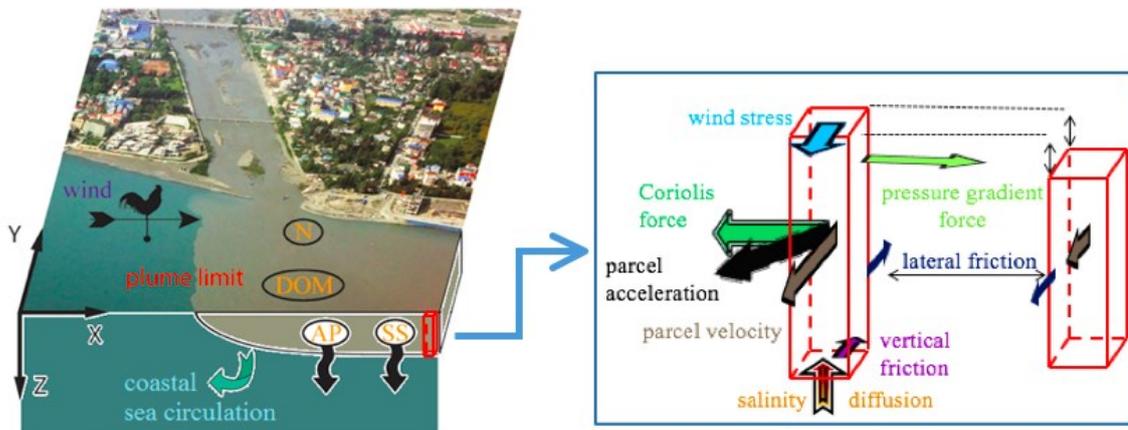


Fonte: autoria própria.

1.6.2.2 Modelo de transporte de sedimento

O transporte e a decantação de sedimentos finos suspensos transportados pelo Rio Doce foram simulados usando um módulo de rastreamento de partículas Lagrangeanas. Cada partícula representa um elemento imaginário de água doce da pluma (superfície à base inferior da pluma) sujeita à ação de diferentes forçantes, como por exemplo a força gradiente de pressão, tensão do vento, fricção lateral e vertical, etc. (Figura 88).

Figura 88: 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.



Fonte: autoria própria.

Os movimentos horizontais e verticais de uma partícula de sedimento foram calculados usando 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 e Korshenko, 2017).

O modelo STRiPE foi desenvolvido para a simulação de partículas em alta resolução da dinâmica de submesoescala de plumas de rios (Osadchiev e 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 a 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, 2017) 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 ROMS. As massas específicas do rio e da água do mar foram prescritas como 1.000 kg.m^{-3} e 1.037 kg.m^{-3} , 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 novembro de 2015 a abril de 2016 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2015), 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

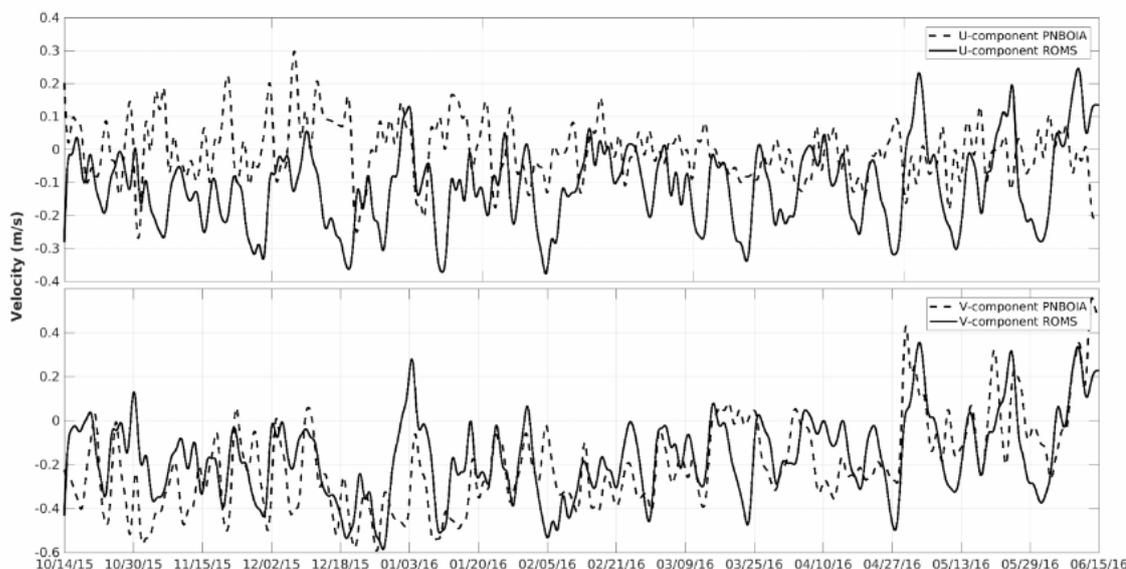
geralmente transportadas para longe da foz do rio e são dispersas em uma ampla área costeira devido à sua baixa velocidade de sedimentação. O movimento vertical induzido pela gravidade é determinado pela lei de Stokes (Stokes, 1901).

1.6.2.3 Validação do modelo hidrodinâmico

Para a validação do modelo hidrodinâmico foram utilizados dados de velocidade de corrente do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), referente a boia Vitória, que encontra-se localizada na região da quebra de plataforma na costa do Espírito Santo ($19^{\circ}55'S$ e $39^{\circ}41'W$), abrangendo o período de 14 de outubro de 2015 até 15 de junho de 2016. A dinâmica da plataforma externa na região é dominada pela influência da Corrente do Brasil, definida como sendo uma corrente de contorno oeste que fecha o giro subtropical oceânico no Atlântico Sul.

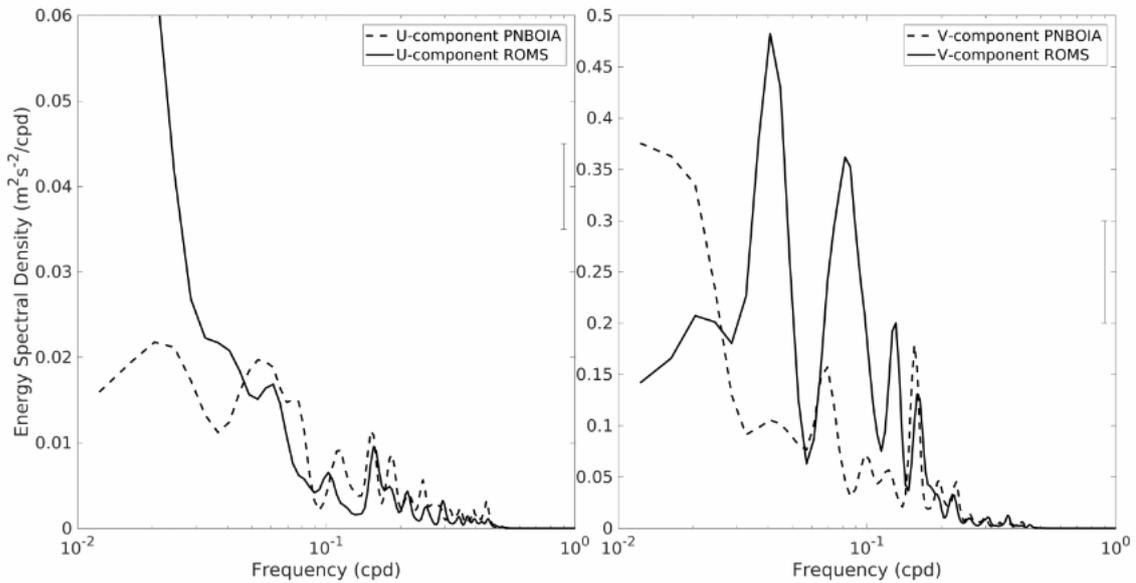
As componentes zonal e meridional das velocidades medidas e modeladas (Figura 89) mostraram a variabilidade da Corrente do Brasil próximo à localização da boia. As velocidades meridionais apresentaram valores negativos em quase todo o registro, mostrando uma boa comparação entre velocidades medidas e modeladas. Apesar das velocidades zonais mostrarem amplitudes e sinal pouco concordantes ao longo do registro, o espectro de energia das frequências de oscilação foi similar aos dados observados (Figura 90). De qualquer forma, é esperado que haja diferenças entre as correntes medidas e modeladas 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 89: 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.



Fonte: autoria própria.

Figura 90: 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.

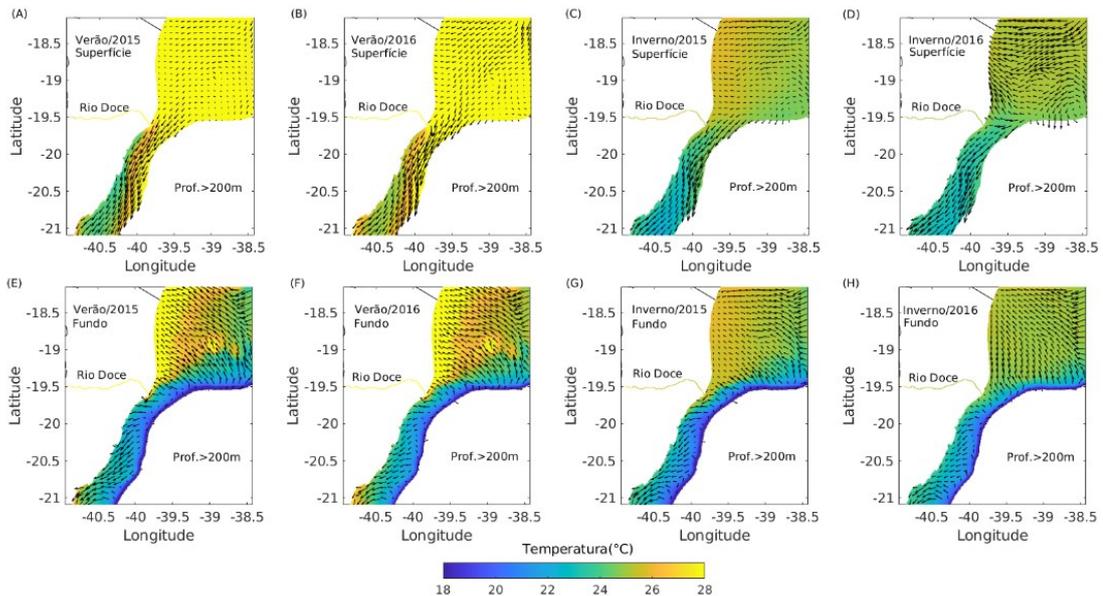


Fonte: autoria própria.

1.6.2.3.1. Hidrodinâmica da plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce

Considerando as simulações numéricas realizadas para os anos de 2015 e 2016, na Figura 91 são mostrados mapas que representam os resultados das médias sazonais (verão e inverno) de temperatura e correntes simulados na Grade 2 para os anos supracitados. Na Figura 91 os níveis sigma 40 e 1 correspondem a superfície e fundo, respectivamente.

Figura 91: Temperatura média simulada para os períodos de verão e inverno nos anos de 2015 e 2016. Na parte superior da figura são apresentados mapas de superfície referentes ao nível sigma 40 (superfície). Na parte inferior da figura são apresentados mapas referentes ao nível sigma 1 (fundo). Os vetores representam a circulação média para os mesmos períodos nos respectivos níveis.



Fonte: autoria própria.

O padrão de distribuição espacial de temperatura média em superfície (Figura 91) foi comum para os dois anos e 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. O resfriamento próximo à costa representa o sinal superficial de um processo de ressurgência costeira recorrente na região (Palóczy et al., 2016). Essa feição também pode ser identificada na Figura 2 2 que mostra a temperatura média mensal da superfície do mar medida pelo satélite.

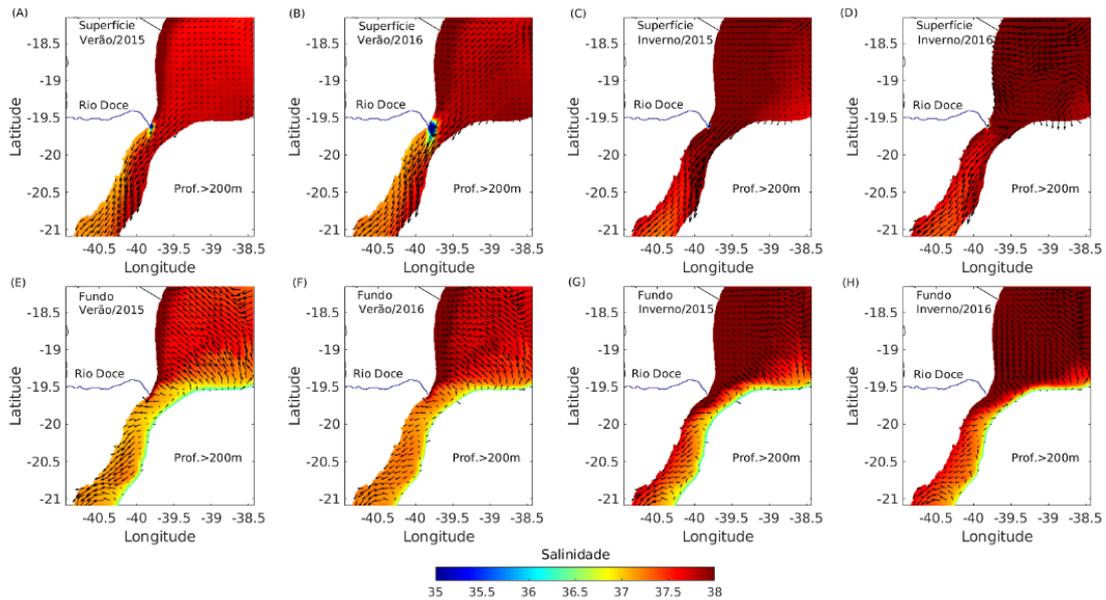
As temperaturas próximas ao fundo mostram a entrada de águas frias ($<22^{\circ}\text{C}$) ao longo da quebra do talude continental (Figura 91 E, F, G e H), que afloram à superfície por um processo oceanográfico dirigido essencialmente pela ação da tensão de cisalhamento do vento local oriundos dos quadrantes norte-nordeste, que representa o padrão mais recorrentes na região. Embora no outono e inverno as inversões de vento na região sejam mais frequentes comparativamente ao verão, há ainda um sinal superficial e um sinal de entrada de águas frias junto ao fundo. Ao norte da foz do Rio Doce, no entanto, o alcance de penetração de águas frias junto ao fundo restringiu-se apenas à plataforma externa, mostrando uma temperatura de fundo sobre o Banco de Abrolhos com temperaturas superiores a 24°C .

Verticalmente, tantos nos invernos quanto nos verões se verificou a penetração da ACAS (Água Central do Atlântico Sul) a partir da quebra da plataforma continental. Já durante o inverno, houve mistura turbulenta promovida, por exemplo, pela inversão do fluxo líquido de calor na interface oceano-atmosfera (Figura 8) e pela tensão de cisalhamento do vento na região. Observa-se na Figura 33 que durante os invernos a coluna d'água tornou-se consideravelmente misturada, se comparada à estratificação que ocorreu no verão, período que mostra diferenças de temperatura superiores a 5°C entre a superfície e o fundo.

A circulação média das correntes na plataforma continental mostrou a penetração de águas oceânicas no limite offshore, junto ao fundo, ao longo de praticamente toda a região. Já a circulação superficial média evidenciou correntes fluindo preferencialmente ao longo da costa na direção sudoeste, seguindo os contornos batimétricos da plataforma continental capixaba, indicando uma dinâmica diferenciada entre a superfície e o fundo na região da foz do Rio Doce. Ao sul da latitude de 19.6°S , as médias de intensidade das correntes foram maiores do que as registradas ao norte desta latitude.

A distribuição da salinidade média sobre a plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce mostrou um padrão semelhante ao descrito para o campo térmico, com valores de salinidade maiores ao norte da foz do Rio Doce e menores ao sul (Figura 92 A, B, C e D) evidenciando a entrada de ACAS sobre a plataforma continental.

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

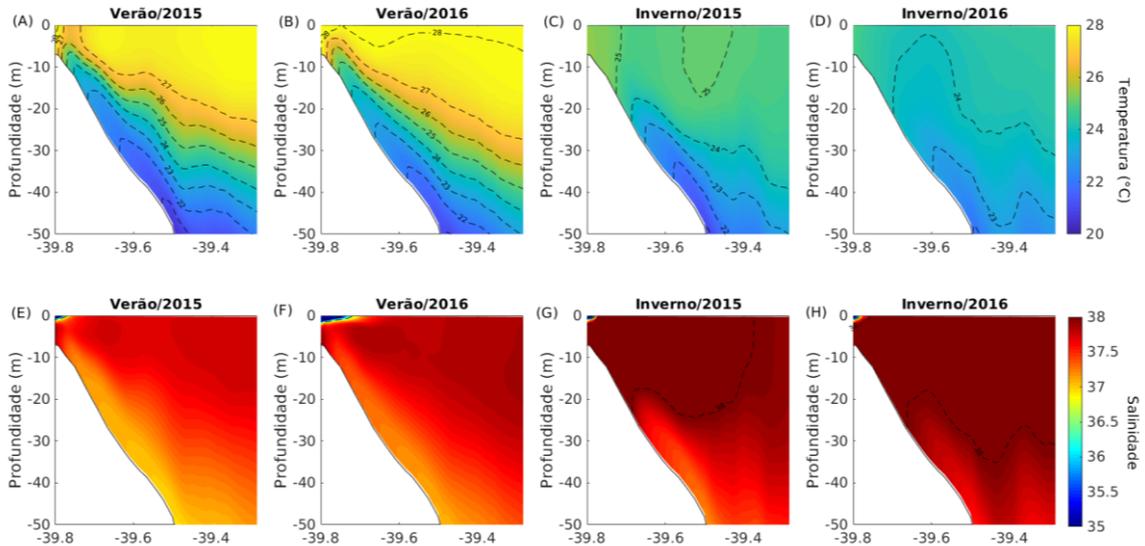


Fonte: autoria própria.

Em superfície, a salinidade média esteve acima de 37 em quase toda a região simulada (Figura 92). No verão, quando a descarga continental na plataforma continental é muito mais pronunciada do que no inverno, a Figura 92 A e B mostraram uma pluma de água de menor salinidade associada à foz do Rio Doce. Embora no verão de 2016 o aporte de água continental na plataforma tenha sido mais significativo do que o registrado no ano anterior, a distribuição espacial da água com salinidade inferior a 35 se restringiu, em média, à região da foz do Rio Doce, muito embora campos instantâneos mostrem que esse espalhamento possa ter sido maior sob específicas condições hidrodinâmicas e meteorológicas.

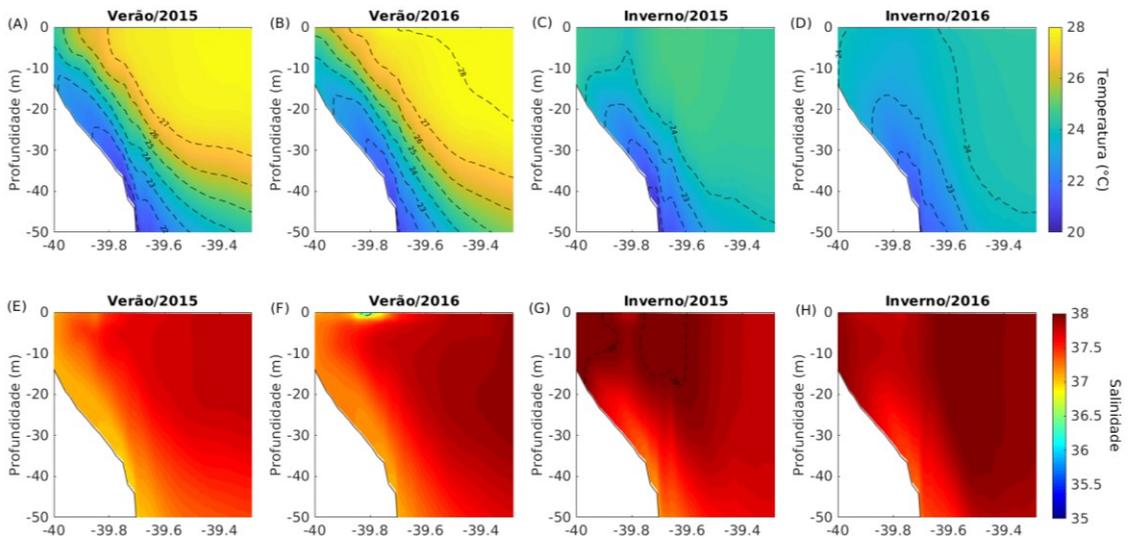
A água de mistura próxima à Foz do Rio Doce encontrou-se, em média, confinada à plataforma continental interna, não alcançando isóbatas maiores que 20 m de profundidade local (Figura 93 e Figura 94, E, F, G, H). Além disso, a água de mistura encontrou-se restrita aos primeiros metros da coluna d'água, evidenciando um forte gradiente horizontal e vertical de salinidade com águas oceânicas adjacentes. Durante o verão de 2016, período de maior vazão entre os dois anos analisados, a água de mistura mostrou um maior alcance zonal e foi possível evidenciar um sinal superficial na média a aproximadamente 118 km da desembocadura do rio.

Figura 93: Seções verticais médias de temperatura (A, B, C, D) e salinidade (E, F, G, H) simulados com o modelo numérico para os períodos de Verão e Inverno dos anos de 2015 e 2016, para uma seção transversal à costa localizada em frente à desembocadura do Rio Doce.



Fonte: autoria própria.

Figura 94: Seções verticais médias de temperatura (A, B, C, D) e salinidade (E, F, G, H) simulados com o modelo numérico para os períodos de Verão e Inverno dos anos de 2015 e 2016, para uma seção transversal à costa localizada ao sul da desembocadura do Rio Doce, passando pela APA Costa das Algas



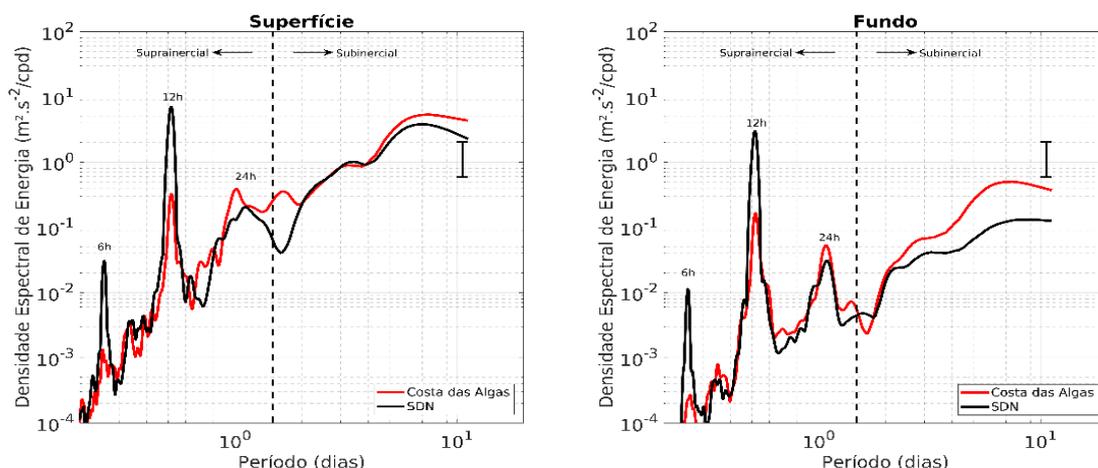
Fonte: autoria própria.

Na seção perpendicular a foz do Rio Doce, a distribuição de temperatura durante o verão (Figura 93 A e B) evidenciou o padrão térmico de desenvolvimento de uma ressurgência costeira com a água mais fria quase aflorando em superfície próximo à costa. Embora não tenha havido o sinal da água mais fria em superfície há o desenvolvimento de uma estratificação zonal próximo à foz do Rio Doce. Durante o inverno a água de temperatura menor que 23°C esteve presente no fundo na porção externa da plataforma, mas a estratificação vertical foi significativamente reduzida e a coluna de água se apresentou quase que barotrópica.

As mesmas características foram encontradas em uma seção vertical perpendicular à costa passando pela APA Costa das Algas (Figura 94 A, B, C, D). Aqui, no entanto, a ressurgência costeira foi plenamente desenvolvida com água fria ocorrendo em superfície durante o verão e ficando restrita ao fundo na plataforma continental externa durante o inverno. A coluna de água que no verão esteve estratificada tendeu a totalmente misturada durante o inverno.

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 35h) foi dominada pela influência da maré. 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 quarto-diurnas (~6h) na região. No entanto, a energia associada à maré ao norte do Rio Doce foi maior quando comparada ao sul da foz. 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 suprainercial 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 (ver Seção 1.4). A superfície e o fundo mostraram processos de períodos semelhantes, apenas com energias diferentes.

Figura 95: Espectros de potência das correntes ao longo da costa (alongshore) simuladas para o período de verão de 2016, na Costa das Algas (sul da foz) e SDN (norte da foz), próximo à isóbata de 25m: à esquerda para as correntes em superfície, à direita para as de fundo.



Fonte: autoria própria.

1.6.2.4 Validação do modelo de transporte de sedimentos

A validação dos resultados do modelo STRiPE através de imagens de satélite foi realizada com o uso de dados de cor do oceano nível L2 do sensor MODIS dos satélites Aqua e Terra combinados em

médias diárias. Esses dados são da mesma fonte utilizada para a análise da turbidez por sensoriamento remoto, apresentado previamente para o período de outubro/2018 até fevereiro de 2019.

A fim de reduzir a ausência de informação, foram utilizados produtos derivados pelo sensor MODIS, para o período de novembro de 2015 até abril de 2016, com 1 km de resolução espacial para a região da Grade 2. Esses dados se referem a Remote Sensing Reflectance (RRS) em 555 nm (sr-1).

O RRS da luz em 555 nm pode ser utilizada como um proxy das águas de origem continental. Mendes et al (2014, 2017) citam que existe uma relação consistente entre a distribuição espacial do RRS_555 e a vazão fluvial diária para o Rio Douro, em Portugal, sendo utilizada inclusive para calcular a frente da pluma sobre a plataforma.

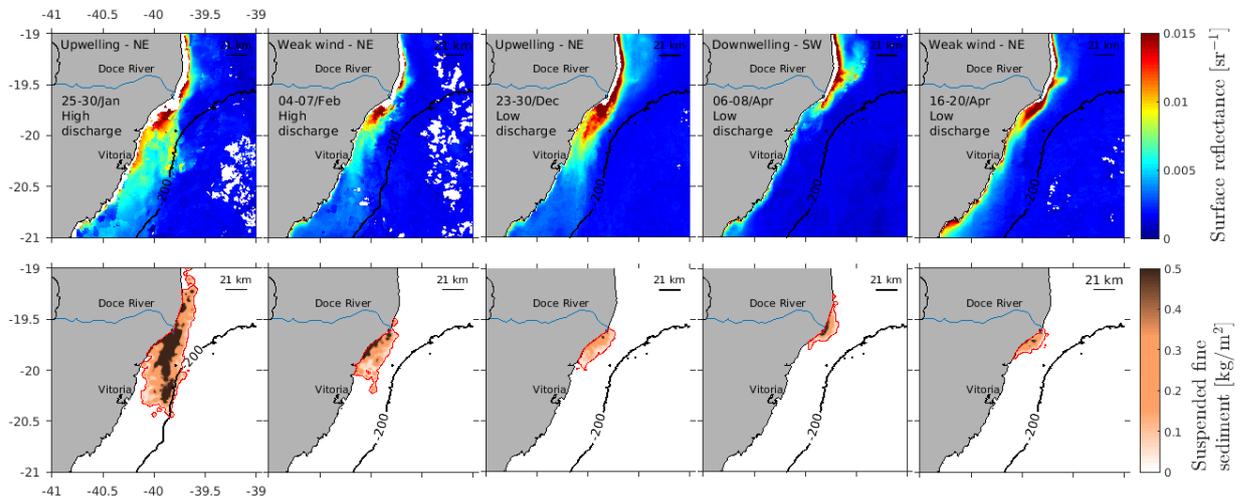
Assim como estabelecido no estudo de sensoriamento remoto, para a validação do modelo de transporte de sedimentos foram estabelecidos cenários que representassem o comportamento distinto da pluma sob diferentes condições de vento e vazão. Dessa forma, foram avaliados cenários de alta e baixa vazão do 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 esteve dentro do período de 6 meses de análise. O Quadro 5 mostra os dados considerados nos cenários e a Figura 96 os resultados encontrados.

Quadro 5: Cenários, características e datas escolhidos para a validação do modelo de transporte de sedimentos. AV - alta vazão e BV - baixa vazão.

Cenário	Data	Vazão (m ³ /s)	Direção do vento	Intensidade do vento (km/h)
1	25-30/01/16	1606.9 (AV)	N-NE	24.5
2	04-07/02/16	621.8 (AV)	N-NE (vento fraco)	17.7
3	23-30/12/15	288.5 (BV)	N-NE	24.2
4	06-08/04/16	301.1 (BV)	S-SE	5.7
5	16-20/04/16	253.5 (BV)	N-NE (vento fraco)	11.2

Fonte: autoria própria.

Figura 96: Composições de dados de sensoriamento remoto de reflectância da cor do oceano na banda de 555 nm (parte superior) e os resultados da modelagem numérica de transporte de sedimentos em superfície (parte inferior) para os diferentes cenários apresentados na Tabela 6-12. A isolinha vermelha nos mapas dos painéis inferiores delimita a concentração de 0,02kg/m².



Fonte: autoria própria.

As cores mais intensas indicam maior quantidade de material em suspensão, representando um proxy da turbidez gerada pela pluma do Rio Doce. Os resultados mostraram comportamentos distintos da pluma do rio em diferentes condições ambientais de vento e vazão. No primeiro cenário, sob a influência de ventos de ressurgência e alta vazão (entre 25 e 30 de dezembro de 2015), a pluma do Rio Doce 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 observado 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, ocupando 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 preferencialmente para sul, influenciando diretamente a APA Costa das Algas e se dispersando por uma ampla área da plataforma continental (Figura 96).

Em um cenário de uma diminuição na intensidade do vento, ainda sob alta vazão, percebeu-se que a pluma sofreu uma retração de sua área e distância de alcance, ficando 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 de 2016 (Figura 96).

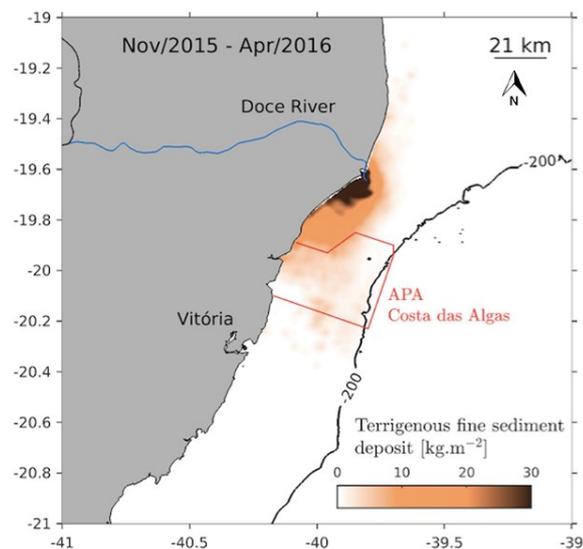
Os cenários de baixa vazão mostraram situações similares sobre a dispersão da pluma. Geralmente a pluma fica mais retida na costa e se concentra próximo da foz, ocupando uma área menor e não alcança distâncias superiores a 30 km a partir da foz do rio. Sob efeito de ventos favoráveis a subsidência (downwelling) observou-se que a pluma sofreu um deslocamento para o norte, no entanto, ficando ainda mais restrita à costa.

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 encontrados mostraram similaridade entre os dados obtidos por sensoriamento remoto e a modelagem numérica

para os diferentes cenários observados na região. Resultados da modelagem de transporte de sedimentos

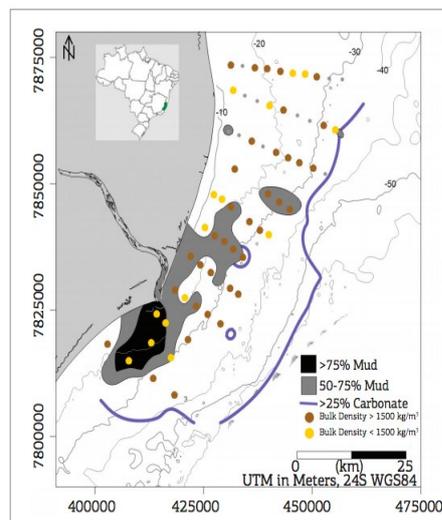
Ao final de seis meses de simulação numérica (novembro de 2015 até abril de 2016) o resultado da modelagem do transporte de sedimentos mostrou que sedimentos finos depositaram-se preferencialmente ao sul da foz do Rio Doce, afetando diretamente a APA Costa das Algas (Figura 97). Esse resultado deve-se principalmente à direção principal das correntes e dos ventos costeiros sobre a plataforma continental nesse período do ano, além da maior média anual da taxa de vazão que ocorreu durante o verão. A distribuição apresentada nesta figura se assemelha aqueles apresentados por Quaresma et al. (2015) (Figura 98).

Figura 97: Distribuição espacial do depósito de sedimentos finos da pluma do Rio Doce após seis meses de simulação (novembro de 2015 até abril de 2016).



Fonte: autoria própria.

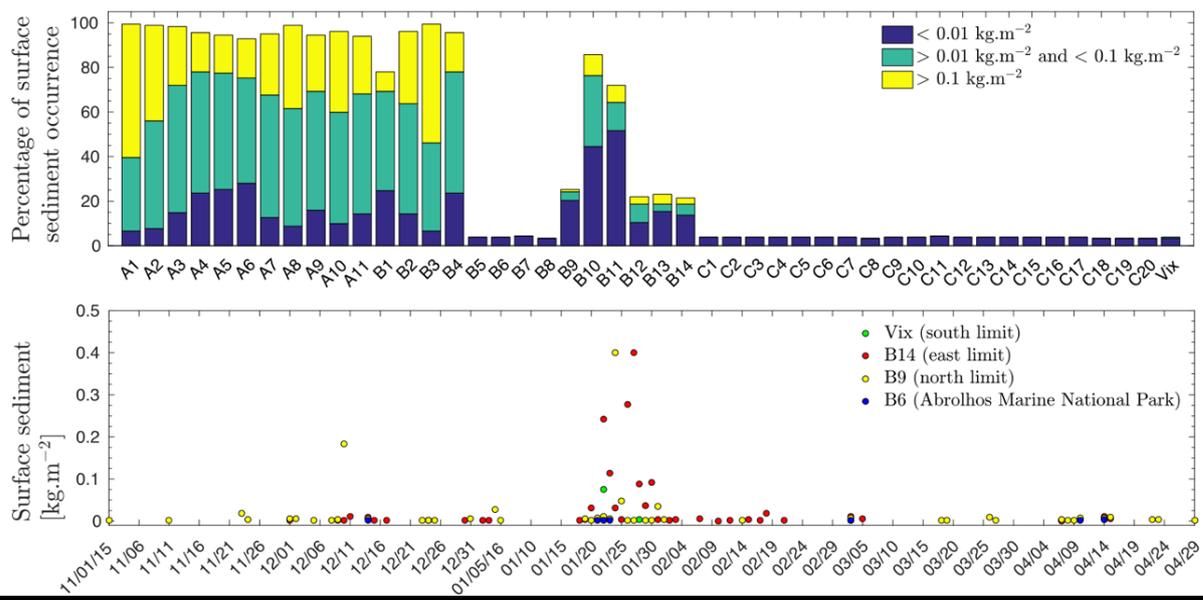
Figura 98: Mapa mostrando o principal depósito de lama (>50%) e medidas de densidade úmida. A linha azul representa o limite para os sedimentos compostos de mais de 25% de carbonato.



Fonte: Quaresma et al., 2015.

O limite sul dos sedimentos associados à pluma atingiu a latitude em torno de 20,4°S, similar ao resultado encontrado através dos dados de sensoriamento remoto nas imagens do Modis Aqua e Terra (555 nm) no período de alta vazão, na composição realizada entre os dias 25-30 de janeiro de 2016 (Figura 96). Nesse cenário observou-se que a pluma de sedimentos foi capaz de influenciar toda a plataforma continental até a isóbata de 200 m. Ao norte, observou-se que a pluma de sedimentos teve pouca influência, basicamente se limitando à latitude de 19,2°S. Por fim, 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.m⁻²). Os resultados das estações virtuais (Figura 86) mostraram, como esperado, que a presença de maior concentração de sedimento em suspensão (> 0.1 kg/m²) foi encontrada nos pontos mais próximos da foz do rio (A1 a A11, B2, B3, B4, B10 e B11). Além disso, o maior destaque foi que em todos os pontos analisados foi observada a presença de sedimentos, mesmo em concentrações muito baixas, inclusive no Parque Nacional Marinho de Abrolhos e na região costeira adjacente à Vitória (Figura 99).

Figura 99: Porcentagem de tempo de ocorrência de sedimento em suspensão (painel superior) e a concentração de sedimento encontrada nos pontos limites na plataforma continental (painel inferior). Os limites definidos no painel superior foram definidos aleatoriamente



Fonte: autoria própria.

Outro detalhe a ser notado foi que no período de alta vazão, entre 20 e 30 de janeiro de 2016, a concentração de sedimentos foi alta (> 0,1 kg/m²), diferentemente dos demais dias de análise, e somente nesse período o sedimento chegou mais significativamente próximo da quebra de plataforma (ponto B14) e ao norte (ponto B9).

1.6.2.5 Simulação numérica para avaliação do papel do vento (tensão de cisalhamento) e vazão do rio: Configuração quase-idealizada

Assim como proposto no escopo da modelagem hidrodinâmica aqui apresentada e observado nos resultados encontrados, a dispersão da pluma de sedimentos do Rio Doce apresentou uma alta

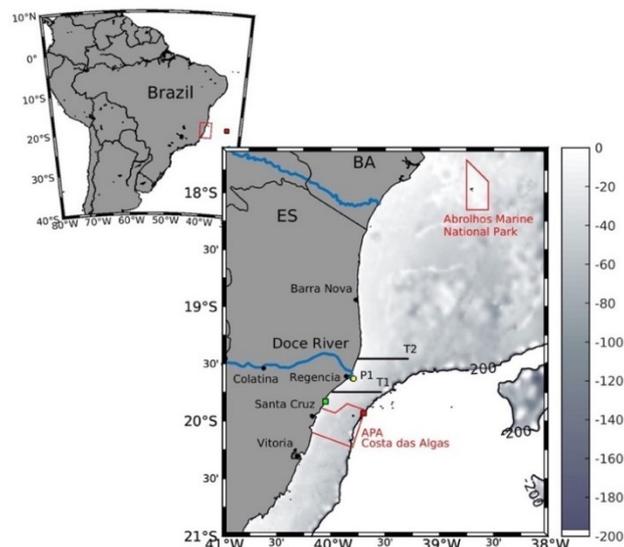
variabilidade espaço-temporal e foi fortemente influenciada pela ação do vento (tensão de cisalhamento) e pela vazão do Rio Doce. Esses resultados representaram uma visão mais realística possível dos cenários que ocorreram dentro do período de simulação. No entanto, alguns aspectos sobre o papel dessas forçantes externas ainda necessitam ser melhor avaliadas. Por exemplo, a dispersão da pluma de baixa salinidade responde da mesma forma à variabilidade do padrão do vento e da vazão? Qual o alcance dessa pluma de água doce em diferentes condições de vazão e vento? Qual o papel do vento nessa dispersão?

Nesse contexto, a fim de investigar com maior detalhamento o comportamento da dispersão da pluma nesses diferentes cenários, foram realizadas simulações numéricas quase-idealizadas sobre o comportamento hidrodinâmico da pluma de água doce do Rio Doce na costa do Espírito Santo. Entende-se por quase-idealizado àquelas simulações feitas em cenários específicos (não-datados) que podem representar condições ambientais reais de vento, vazão e dispersão da pluma de baixa salinidade.

Nesse estudo foi reconstruído na Grade 2 um canal fluvial desde a cidade de Colatina até a foz, com trajetória semelhante ao traçado real do Rio Doce. Esse canal possui um ou dois pontos de grade de largura e 5 m de profundidade. A salinidade zero e os dados de vazão foram impostos no limite leste e distribuídos homogeneamente na coluna de água. A temperatura de 25°C permaneceu constante ao longo do tempo.

Os resultados produzidos nesse estudo foram analisados em dois transectos perpendiculares à costa, um ao sul e outro ao norte da foz do Rio Doce (T1 e T2, respectivamente), além de uma estação virtual localizada na foz do rio (P1) em 5 m de profundidade (Figura 100).

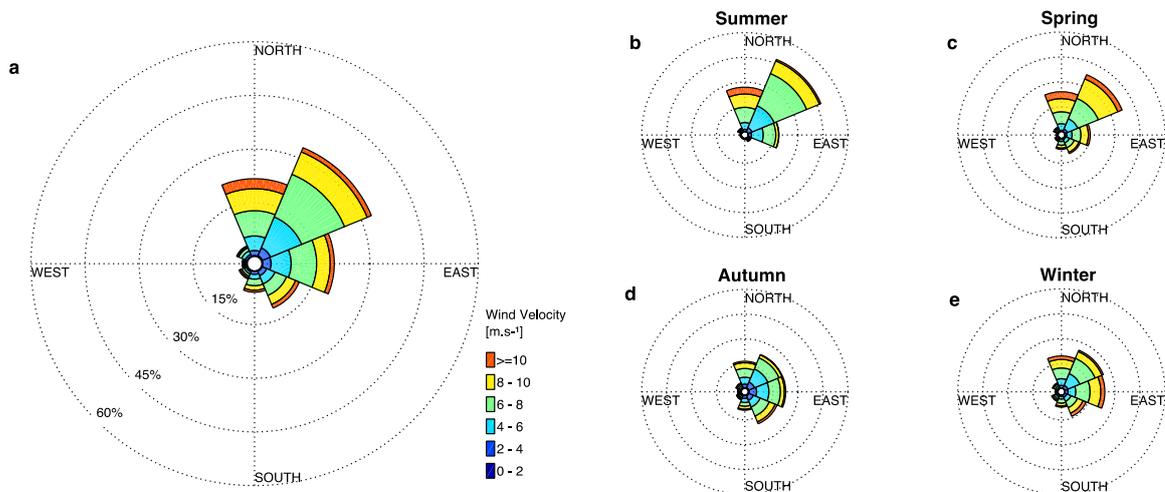
Figura 100: Área de estudo da modelagem idealizada na costa do Espírito Santo. Os polígonos em vermelho representam as áreas de proteção ambiental, enquanto o quadrado verde mostra a localização do marégrafo da Barra do Riacho e o ponto amarelo (P1) a foz do rio onde foram feitas as análises de nível de água, profundidade de água doce, velocidade zonal e salinidade. Os transectos T1 e T2 representam a localização da análise do perfil vertical de velocidade, temperatura, frequência de Brunt-Väisälä e transporte de água doce.



Fonte: autoria própria.

Para a determinação dos cenários idealizados foi realizada uma análise do padrão de ventos a partir dos resultados do modelo CFSR/NCEP para um ponto próximo à foz do Rio Doce (Figura 86) entre os anos de 2009 e 2016. Observou-se que a intensidade média dos ventos foi de 6,7 m/s, e as direções predominantes foram de NE (33%), N (16%), E (15,5%) e SE (11,5%). Em média, o vento permaneceu na mesma direção por 5 dias. O padrão de direção e intensidade do vento médio anual e sazonal é apresentado na Figura 101.

Figura 101: Rosa-dos-ventos para a média anual (a) e por estação do ano entre 1990 e 2016 para a região próxima à foz do Rio Doce (b, c, d e e).



Fonte: CFSR/NCEP.

A estimativa da vazão do Rio Doce também foi feita a partir dos dados diários da estação de Colatina entre os anos de 1990 e 2016, aproximadamente 110 km distante da foz. A análise pelo método Flow Duration Curve (FDC) foi usada para identificar um valor representativo de alta (963 m³/s) e baixa (325 m³/s) vazão, baseada na metodologia de EPA (2007). Com base nessas observações, foram propostos oito cenários de simulação numérica quase-idealizados (Quadro 6).

Quadro 6: Cenários de simulação quase-idealizada.

Cenário	Direção do vento	Vazão
1	NE	Alta
2	E	Alta
3	SE	Alta
4	N	Alta
5	NE	Baixa
6	E	Baixa
7	SE	Baixa
8	N	Baixa

Fonte: autoria própria.

A partir da inicialização do modelo a velocidade do vento foi lentamente modificada até atingir 6,7 m/s sobre o período de 24h, a fim de evitar a geração de oscilações inerciais provocadas por mudanças abruptas e descontínuas do vento. Cada experimento durou 5 dias e todos partiram do mesmo cenário inicial.

Ao final de cada experimento foram calculadas a profundidade e o transporte de água doce e os perfis verticais de temperatura, salinidade e frequência de Brunt-Väisälä nos transectos T1 e T2. O conteúdo de água doce dentro da coluna de água foi calculado usando a equação a seguir:

$$f_w = \int_{-h}^{\eta} \frac{S_a - S(z)}{S_a} dz$$

Onde $S(z)$ é a salinidade do modelo, S_a é a salinidade de referência, e o termo da integral representa a anomalia de salinidade entre a superfície e a profundidade onde S_a ocorre (Choi e Wilkin, 2006; Mazzini et al., 2014).

O parâmetro δ_{fw} representa a profundidade na qual puramente água doce é encontrada, como um típico valor de um oceano de duas camadas sem mistura. A salinidade ambiente é referenciada aqui como a salinidade da plataforma continental influenciada pelas águas do estuário do Rio Doce, a qual foi definida como 35,4. Muitos estudos numéricos tem encontrado um único valor de salinidade que marca o limite externo da pluma usando diferentes metodologias, Choi e Wilkin (2006) escolheram o valor de 32 para o Rio Hudson, Liu e colaboradores (2009) e Burla e colaboradores (2010) definiram 36 e 28 para a pluma do Rio Colúmbia, respectivamente, enquanto Falcieri e colaboradores (2011) escolheram 36 para a pluma do Rio Po. Este último usou como metodologia o valor de salinidade superficial sobre o máximo gradiente horizontal da profundidade da camada de mistura. Entretanto, o valor de 35,4 corresponde aproximadamente ao máximo gradiente observado, e foi considerado adequado para o propósito desse estudo.

Da mesma forma, o transporte de água doce foi calculado para cada experimento integrando a velocidade (v_x) multiplicado pela anomalia de água doce (equação a seguir):

$$V_{fw} = \iint_{-h}^{\eta} v_x \frac{S_a - S(z)}{S_a} dx dz$$

A frequência de Brunt-Väisälä, que estima a oscilação da coluna de água de acordo com a estratificação, foi estimada de acordo com a equação a seguir:

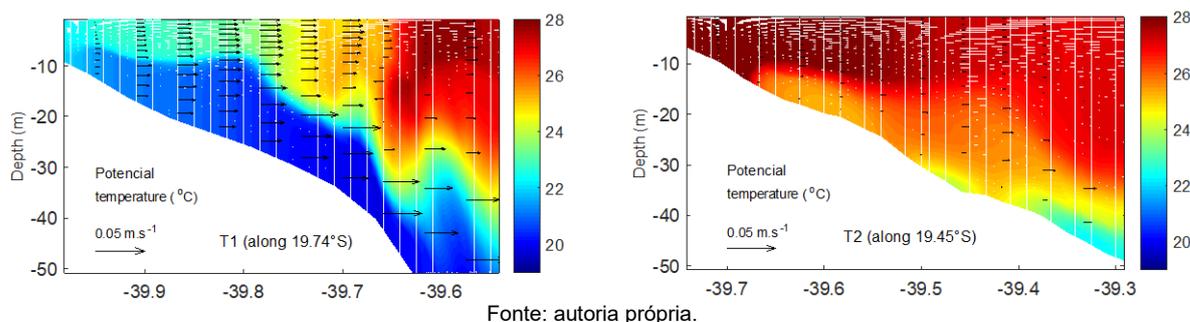
$$N = \left(-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{1/2}$$

Onde g é a gravidade e ρ representa a massa específica da água.

A condição inicial dos cenários baseou-se nas condições hidrodinâmicas simuladas no dia 31 de dezembro de 2015, ou seja, baixa vazão do Rio Doce ($< 400 \text{ m}^3/\text{s}$), ventos do quadrante norte e

plataforma continental sob influência de ressurgência costeira no T1 (Figura 102). A partir desse cenário foram realizadas as simulações quase-idealizadas de 5 dias.

Figura 102: Seções verticais de temperatura potencial para os transectos T1 (esquerda) e T2 (direita). Os vetores sobrepostos representam a velocidade zonal nas respectivas seções.

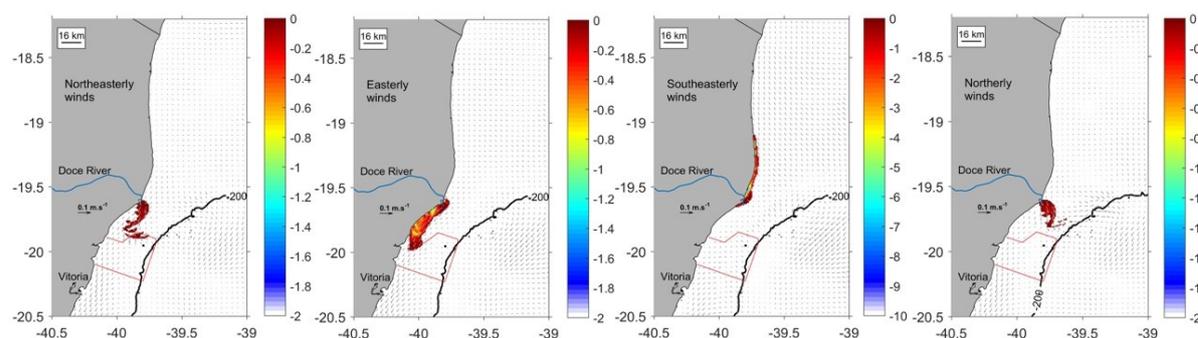


1.6.2.5.1. Resultados da modelagem quase-idealizada

a) Alta vazão

Os resultados encontrados nos cenários de alta vazão mostraram que a pluma de água doce deslocou-se 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 anexada 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 103).

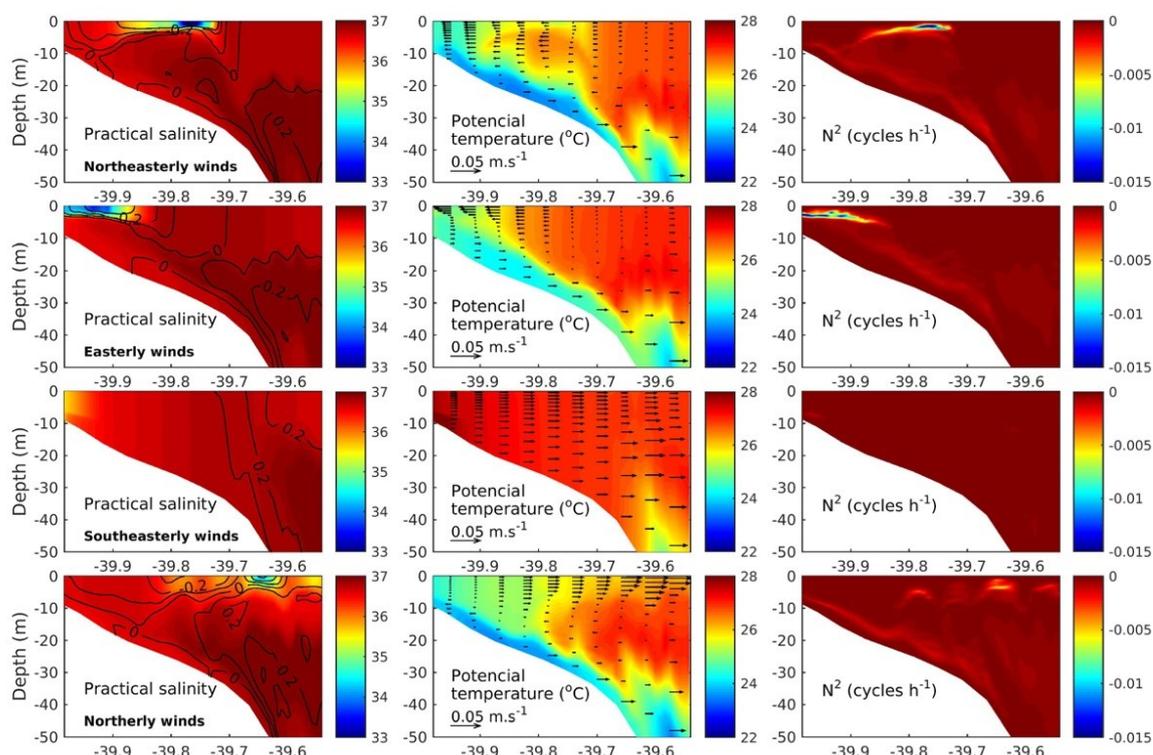
Figura 103: Distribuição espacial da profundidade de água doce (m) após 5 dias de simulação em cenários de ventos NE, E, SE e N durante alta vazão (cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente – Quadro 6). O polígono em vermelho representa a APA Costa das Algas. A linha preta contínua delimita a quebra de plataforma em 200 m



Em situações de ventos favoráveis à ressurgência costeira as plumas de rios tendem 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 doce é aprisionada na costa e sofre aprofundamento, também sob efeito do transporte de Ekman, porém em direção on shore.

Os resultados mostrados nas seções verticais ratificaram esta assertiva. Sob a ação de ventos NE e N a pluma de água doce (salinidade < 35,4) encontrou-se mais afastada da costa, com ventos E a pluma estava anexada junto à costa, e em ventos SE não foi observada a pluma no transecto T1 (Figura 104). A frequência de Brunt-Väisälä no painel da direita mostra mais claramente esse comportamento, destacando a interface entre a base da pluma e o oceano adjacente.

Figura 104: 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 o transecto T1 durante alta vazão após o 5° dia de simulação.



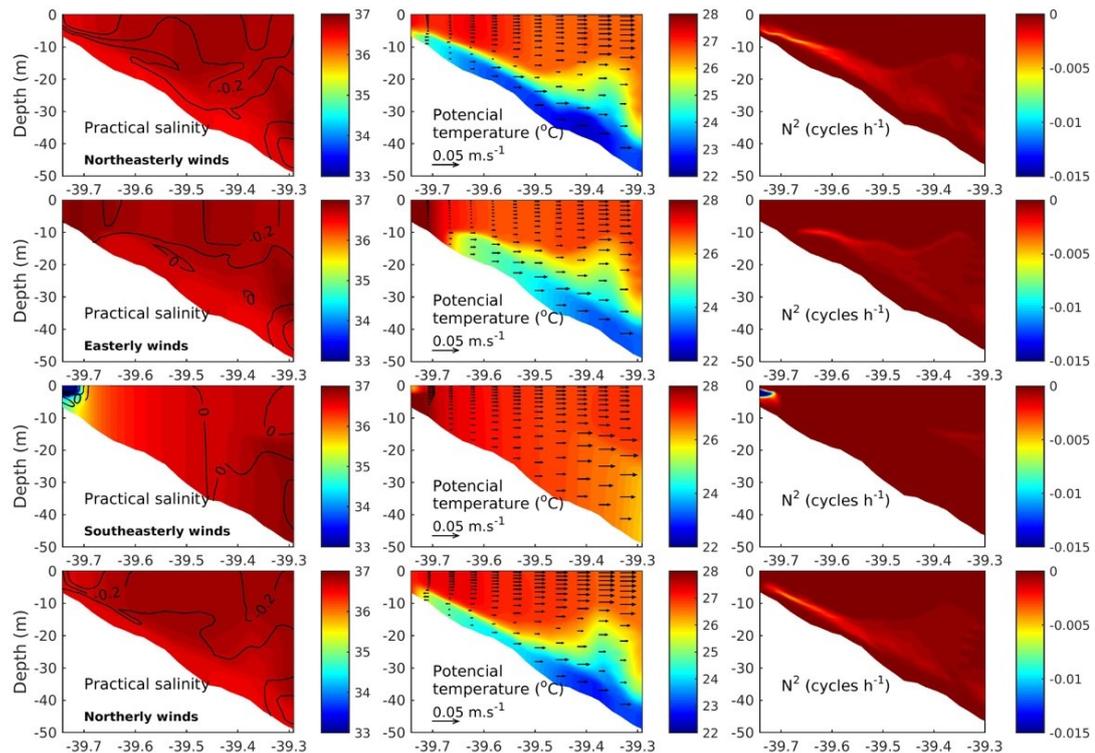
Fonte: autoria própria.

A modificação do perfil de velocidade zonal (painel central) causada pelo vento ficou evidente nos cenários de simulação. Com ventos E apenas uma pequena camada superficial de água (< 4 m) é forçada em direção à costa, aprisionando a pluma, o que não ocorre com ventos NE, quando ocorre uma maior homogeneidade da intensidade da velocidade na coluna de água em direção à costa. No entanto, como a pluma ocupa apenas os primeiros metros, a velocidade nessa camada influenciou mais a dispersão da pluma. Já em ventos N foi observado uma maior advecção em direção offshore, o que causou um maior afastamento da pluma em relação à costa e conseqüentemente seu afinamento.

No transecto T2, ao norte da foz do rio, a pluma de água doce só foi observada quando esteve sob a influência de ventos de SE (Figura 105). Assim como observado nos resultados de profundidade de água doce, a pluma ficou concentrada na costa e sofreu aprofundamento, mesmo sob ação de correntes offshore ao longo da coluna de água.

Diferentemente do observado no T1, o perfil vertical de temperatura do T2 mostrou que águas frias de ressurgência ($T < 23^{\circ}\text{C}$) ficaram confinadas abaixo da superfície, e a coluna de água misturada só foi observada próximo da costa.

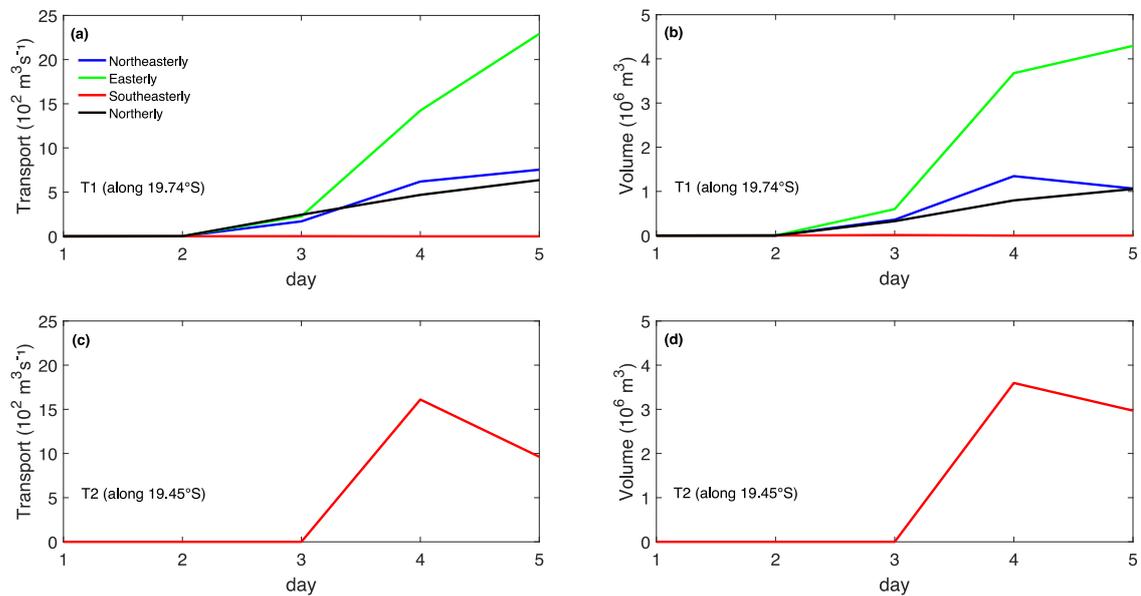
Figura 105: Seções verticais da salinidade prática com sobreposição de isolinhas de velocidade meridional (esquerda), temperatura potencial com a sobreposição de vetores de velocidade zonal (centro) e frequência de Brunt-Väisälä (direita) para o transecto T2 durante alta vazão após o 5º dia de simulação.



Fonte: autoria própria.

Por fim, o resultado do transporte de volume de água doce nos transectos T1 e T2 mostraram resultados distintos. Observou-se que no transecto sul os ventos E foram os principais responsáveis pelo maior transporte de água para a região ao sul da foz do Rio Doce ($22 \times 10^2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), seguido por ventos NE e N ($6,5 \times 10^2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), ou seja, durante a alta vazão os ventos E dispersaram a pluma de água doce em direção à APA Costa das Algas em torno de três vezes mais do que os demais ventos predominantes na região. O volume de água transportada também seguiu o mesmo padrão do transporte de água, atingindo o máximo para ventos E ($4,2 \text{ Sv}$), seguido por ventos NE e N (1 Sv). Ambos os resultados também mostraram que a pluma do Rio Doce respondeu rapidamente à mudança do vento, já no segundo dia começou a ocorrer o aumento do transporte e volume de água doce. Apenas no cenário de ventos de SE não houve presença de água doce no transecto T1. Por outro lado, no transecto T2 somente ventos SE deslocaram água doce para o norte da foz do rio, sendo observada a partir do terceiro dia. Nota-se que a magnitude tanto do transporte quanto do volume de água no transecto T2 para os ventos SE foram equivalentes às magnitudes encontradas no transecto T1 para os ventos NE, E e N (Figura 106).

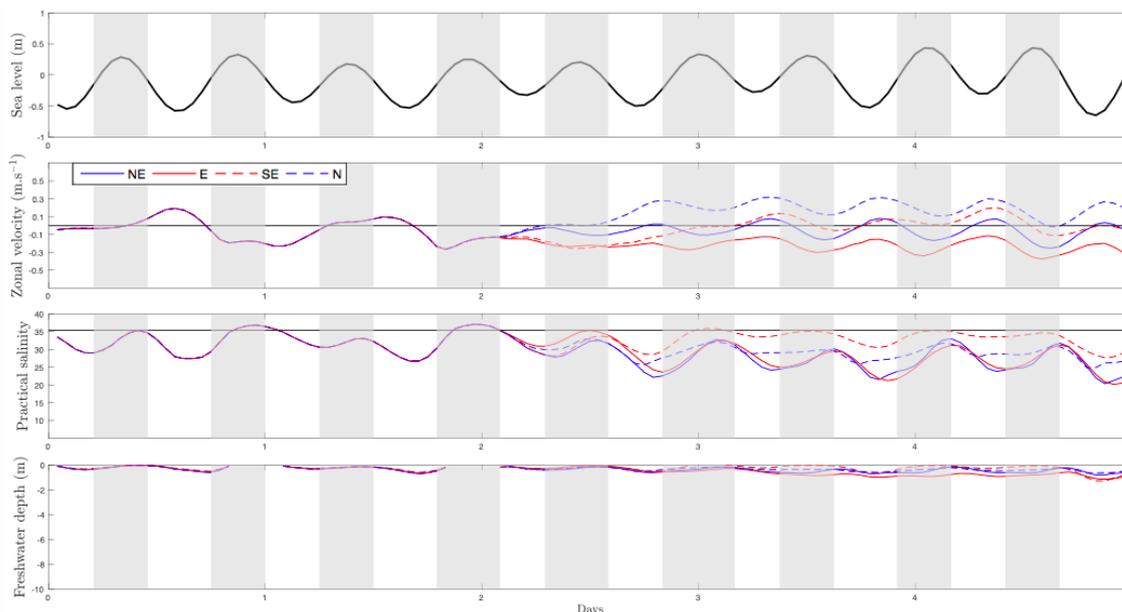
Figura 106: Transporte (m^3/s) e volume (m^3) de água doce no transecto T1 ($19,74^\circ S$) e transecto T2 ($19,45^\circ S$) para o período de alta vazão ao longo de 5 dias consecutivos de ventos NE, E, SE e N.



Fonte: autoria própria.

A análise realizada na foz do Rio Doce (ponto P1) mostrou que durante a preamar foi observada mais água salgada ($> 35,4$) entrando no estuário (sentido onshore), a velocidade zonal diminuiu ou foi invertida (valor negativo) e que não existiu água doce ou sua profundidade foi muito baixa. Em processo inverso, durante a baixa-mar a velocidade zonal aumentou seu valor positivamente (sentido offshore), a salinidade diminuiu e a profundidade de água doce no ponto aumentou. Sobre os diferentes cenários de vento, percebeu-se que os ventos N foram os principais responsáveis por exportar água oriunda da vazão do Rio Doce. Já os ventos E tenderam a aprisionar mais água dentro do rio, independentemente do estágio da maré. Os ventos SE foram os principais responsáveis por aumentar a salinidade no ponto P1, enquanto que os ventos E e NE tenderam a diminuir a salinidade na foz do rio. Do mesmo modo, as maiores profundidades de água doce na foz estiveram relacionadas com a menor presença de água salgada, o que está em função da maré e também da direção do vento (Figura 107).

Figura 107: Séries temporais de nível da água (dados da estação virtual próxima do marégrafo de Barra do Riacho), velocidade zonal, salinidade e profundidade de água doce na foz do Rio Doce (ponto P1) durante os 5 dias de simulação nos cenários de ventos NE, E, SE e N e alta vazão.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 107 observa-se que a dinâmica da maré foi de grande importância para a dispersão da água doce no campo próximo da foz do rio, e que a orientação da foz do rio também seja importante na dispersão e aprofundamento da pluma para cada direção do vento. Por exemplo, no caso da foz orientada para SE, os ventos SE tendem a aprisionar mais água doce dentro do rio do que para uma foz orientada para NE, por exemplo. Apesar desse aspecto, em particular, ainda estar sob investigação, espera-se que esse processo ocorra.

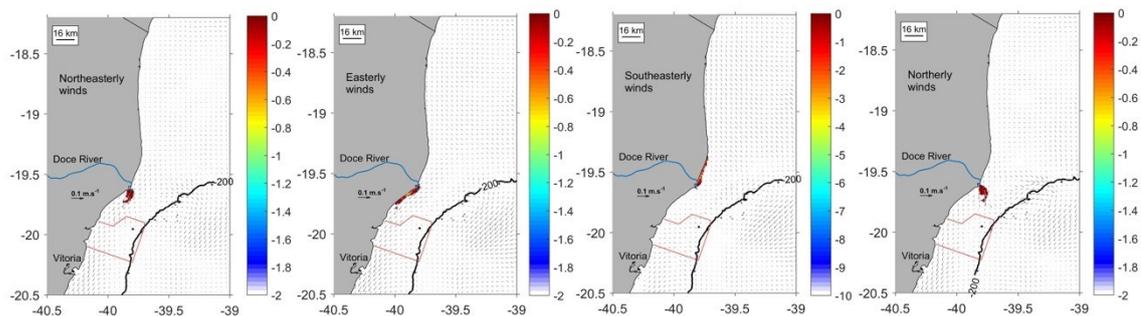
Ainda de acordo com os resultados, espera-se que em períodos de baixa-mar a pluma de água doce na região próxima da foz seja maior, exceto para ventos SE. Por outro lado, em períodos de preamar espera-se que a pluma de baixa salinidade esteja mais contraída próximo da costa, principalmente durante eventos de ventos de SE. Outro resultado mostrado foi que, independentemente da maré e do vento, a partir do 2º dia a salinidade na foz foi sempre menor do que 35,4, o que é explicado devido à alta vazão exportando água doce para a região costeira adjacente. A atuação do vento e da maré nesse caso foi apenas no sentido de aumentar ou diminuir esse valor. Esse resultado mostra a importância de investigação do estágio da maré e das condições do vento em campanhas de monitoramento com pontos de coleta mais próximos da foz do Rio Doce (Figura 107).

b) Baixa vazão (< 325 m³/s)

Os resultados para os cenários 5, 6, 7 e 8 (Quadro 6) mostraram comportamentos distintos da pluma, porém a mesma dinâmica descrita nos resultados anteriores se aplica aqui. Para ventos NE, SE e N (ventos favoráveis à ressurgência) a profundidade de água doce não ultrapassou 0,7 m, enquanto que para ventos favoráveis à subsidência (SE) a profundidade de água doce atingiu até 4 m da coluna de

água. No primeiro caso a pluma tendeu a afinar e a se afastar da costa, devido à advecção do transporte de Ekman offshore estando, portanto, mais sujeita ao processo de dispersão pela ação do vento no chamado campo distante. No segundo caso a pluma foi aprisionada na costa também devido ao transporte de Ekman no sentido onshore, porém nesse caso ela tendeu a aprofundar na coluna de água (Figura 108).

Figura 108: Distribuição espacial da profundidade de água doce (m) após 5 dias de simulação em cenários de ventos NE, E, SE e N durante baixa vazão (cenários 5, 6, 7 e 8, respectivamente – Quadro 6). O polígono em vermelho representa a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas. A linha preta contínua delimita a quebra de plataforma em 200 m

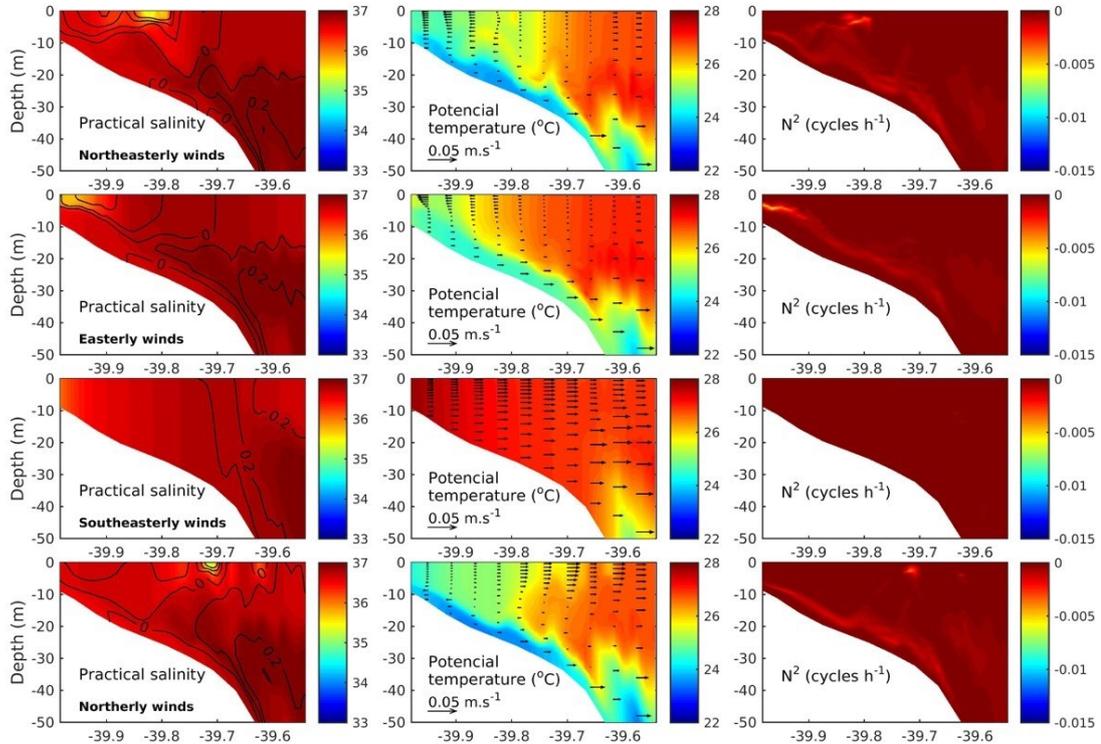


Fonte: autoria própria.

Apenas nos cenários de ventos NE e N a pluma se afastou da costa no sentido offshore, ou seja, sob influência de ventos favoráveis à ressurgência. Sob a ação de ventos favoráveis à ressurgência. Sob a ação de ventos E e SE a pluma ficou confinada próxima à costa, mas nesse último advectada para norte. Por fim, em todos os cenários de baixa vazão a pluma de água doce não se afastou mais de 20 km em relação à foz, não influenciando a área da APA Costa das Algas (Figura 108).

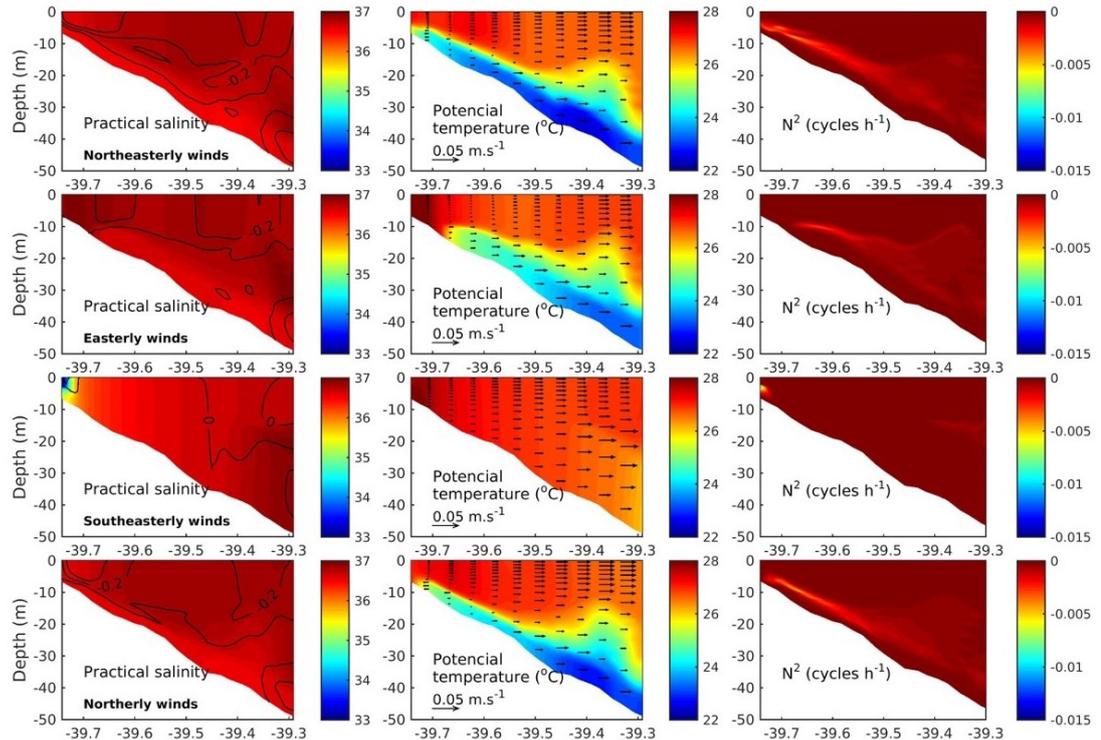
Os perfis verticais de salinidade, temperatura e frequência de Brunt-Väisälä para baixa vazão mostraram o mesmo padrão dos resultados de alta vazão, porém com menor presença da pluma de água doce. A diferença mais significativa entre os cenários de alta e baixa vazão foi observada no transporte e volume de água (Figura 109 e Figura 110).

Figura 109: 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 o transecto T1 durante baixa vazão após o 5° dia de simulação.



Fonte: autoria própria.

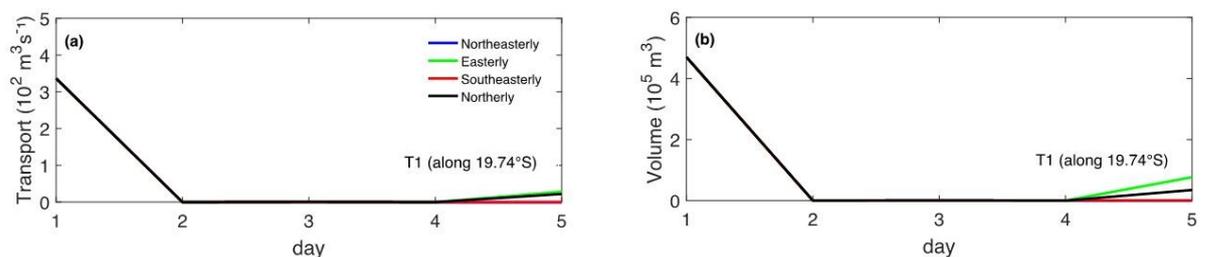
Figura 110: Seções verticais da salinidade prática com sobreposição de isolinhas de velocidade meridional (esquerda), temperatura potencial com a sobreposição de vetores de velocidade zonal (centro) e frequência de Brunt-Väisälä (direita) para o transecto T2 durante baixa vazão após o 5° dia de simulação.



Fonte: autoria própria.

Ao final de cinco dias de simulação em condição de baixa vazão, não foi observada a presença de água doce no transecto ao norte da foz do rio sob ação de vento SE. O transporte de água doce nos cenários de ventos N e E não ultrapassou $0,4 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$, e só foi observado a partir do 4o dia de simulação. O volume transportado não ultrapassou a 1 Sv a partir desse 4o dia. Esses resultados, combinados com os mapas de profundidade de água doce mostraram que em períodos de baixa vazão a água de melhos salinidade oriunda do Rio Doce ficou confinada próximo à foz, sofrendo baixa dispersão, praticamente não influenciando as áreas de proteção ambiental ao sul da foz (Figura 111).

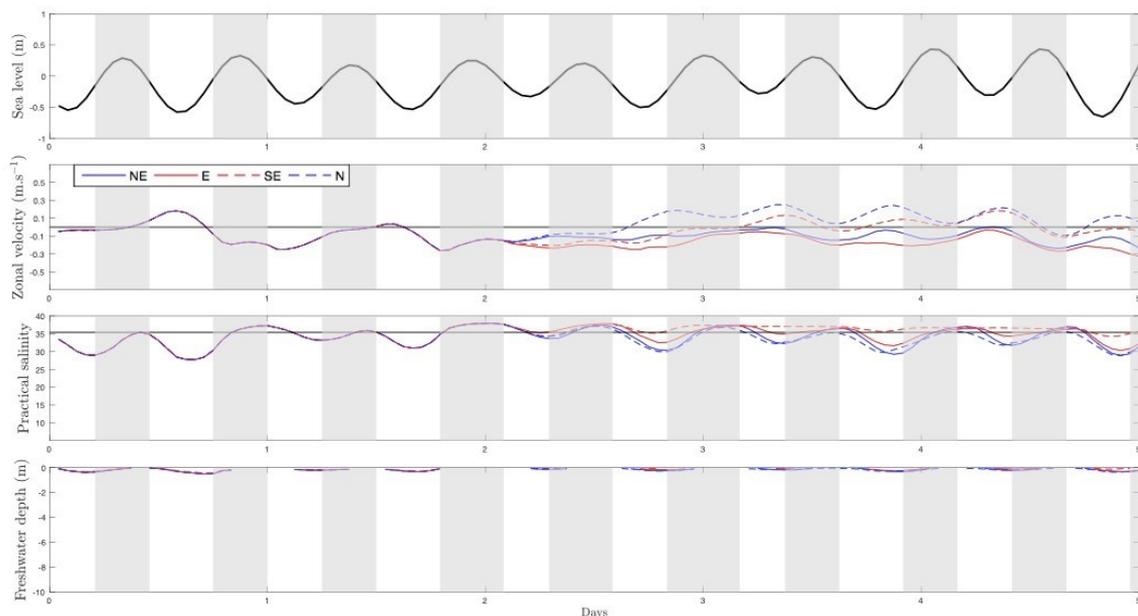
Figura 111: Transporte ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) e volume (m^3) de água doce no transecto T1 (19.74oS) para o período de baixa vazão ao longo de 5 dias consecutivos de ventos NE, E, SE e N.



Fonte: autoria própria.

A variabilidade das séries temporais de velocidade zonal, salinidade e profundidade de água doce na foz do Rio Doce sob influência de ventos NE, E, N e SE durante a baixa vazão apresentaram a mesma dinâmica mostrada para os cenários de alta vazão, porém com intensidades reduzidas. Por exemplo, com a baixa vazão ocorreu maior intrusão de água salgada para dentro da foz do rio, principalmente durante ventos de SE e na preamar, e a profundidade de água doce foi menor devido a menor presença de água doce na foz (Figura 112).

Figura 112: Séries temporais de nível da água (dados da estação virtual próxima do marégrafo de Barra do Riacho), velocidade zonal, salinidade e profundidade de água doce na foz do Rio Doce (ponto P1) durante os 5 dias de simulação nos cenários de ventos NE, E, SE e N e baixa vazão.



Fonte: autoria própria.

1.6.2.6 Considerações

Os resultados numéricos da modelagem de transporte de sedimentos indicaram o padrão predominante de propagação para o sul da pluma do Rio Doce durante os seis meses de simulação após o rompimento da barragem de Fundão. Durante a maior parte desse período, a pluma esteve localizada na área delimitada ao norte e a sul pelas latitudes de 19,4oS e 20,3oS, respectivamente, e a leste à quebra de plataforma localizada a aproximadamente 45 km da costa logo ao sul da foz do rio.

Durante os eventos de alta vazão sob contínuos ventos NE, a pluma de sedimentos propagou-se mais de 75 km para sul ao longo da região costeira. Essas condições são mais comuns durante a estação chuvosa (de novembro a abril), especialmente em janeiro, quando a vazão do rio é alta e os ventos dos quadrantes N-NE predominam. Durante o período simulado, a maior taxa de vazão durou aproximadamente 10 dias, entre 20 e 30 de janeiro de 2016. Consequentemente, a pluma de sedimentos foi observada na região costeira adjacente à cidade de Vitória (plataforma média e externa) apenas durante 2 dias, menos de 5% do período total de tempo investigado.

Nesse sentido preferencial para sul da pluma, a APA Costa das Algas foi atingida em quase 50% do tempo de simulação, embora em pequenas concentrações. A influência da pluma sobre a APA está de acordo com resultados informados por Bastos e colaboradores (2017) e Rudorff e colaboradores (2018).

Na direção norte o alcance da pluma foi limitado a aproximadamente 75 km da foz, que fica próximo à localidade de Barra Nova (18,95°S e 39,73°W). O depósito de sedimentos finos simulados neste estudo está em boa concordância com os resultados de Quaresma e colaboradores (2015), Bastos e colaboradores (2015) e Bourguignon e colaboradores (2018) com base em medições *in situ*, que revelaram que a menor fração de sedimentos é transportada para o mar e depositada preferencialmente na plataforma interna, principalmente ao sul da foz entre 10 e 30 m de profundidade, e uma fração menor deslocada para o norte ao longo da costa. A distribuição dos sedimentos simulados no fundo foi formada principalmente durante os ventos NE e a baixa vazão do rio, estando localizada entre a foz do rio e aproximadamente 20oS. Embora pouco frequentes no período simulado ventos SW favoreceram a deposição de sedimentos ao norte da foz do rio. No entanto, depois que os rejeitos foram lançados no oceano, a extensão norte do depósito de sedimentos para o fundo do mar foi limitada em 19,5°S na plataforma média, de acordo com a distribuição de fácies sedimentares (Bastos et al., 2015; Bourguignon et al., 2018), revelando o mesmo padrão e área de lama terrígena depositada ao norte da foz do rio. No entanto, reconstruiu-se apenas a deposição primária de sedimentos em suspensão e não se simulou sua ressuspensão e redistribuição subsequente causada pela circulação costeira, marés e ondas, nem seu impacto no ambiente costeiro (Figura 97).

A modelagem quase-idealizada mostrou o comportamento da pluma de água doce em cenários de vento e vazão observados na região da costa do Espírito Santo e na foz do Rio Doce. Os resultados encontrados são similares as imagens de sensoriamento remoto obtidas em condições semelhantes.

A presença da pluma anexada à costa ou afastada da costa está diretamente ligada à direção do vento, enquanto que o alcance da pluma, o transporte e volume de água doce estão diretamente ligados à vazão e à direção do vento.

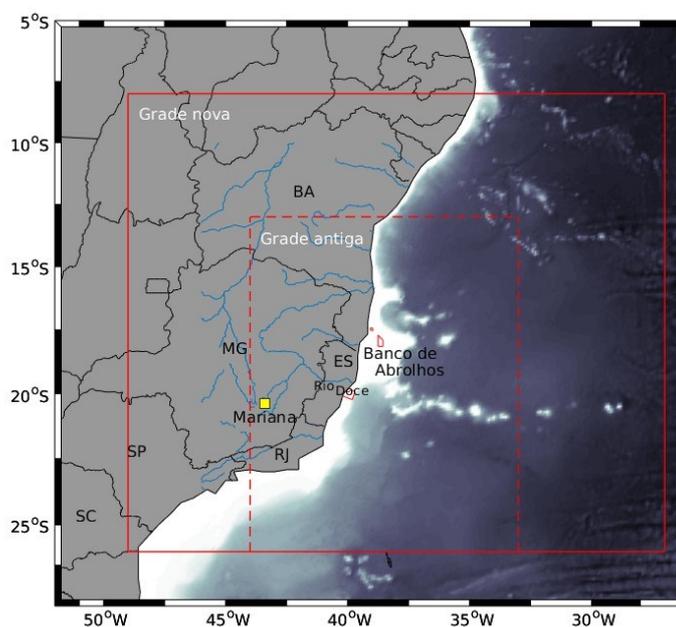
Os resultados da influência do vento na modelagem quase-idealizada são similares às observações obtidas nas perfilagens termohalinas. Sob a ação de ventos E, foi observada salinidade menor que 36 na superfície nos pontos SDS 20 (35,1) e SDS 13 (35,2), bem próximo à costa ao sul da foz, durante a campanha trimestral (janeiro e fevereiro de 2019) em regime de alta vazão ($> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figura 50). Como mostrado na Figura 108 a ação desse vento aprisionou a pluma de baixa salinidade na costa ao sul da foz, sendo mais evidente justamente em períodos de alta vazão. Por outro lado, sob a ação de ventos NE a modelagem quase-idealizada mostrou que a pluma de baixa salinidade se despreendeu da costa ao sul da foz (Figura 108), e esse processo foi observado durante a campanha mensal em dezembro/2018. Em regime de alta vazão a salinidade superficial nos pontos SDS 30 e SDS 20 foi menor que 35,6, enquanto que no ponto SDS 13, localizado entre eles e próximo da costa, mostrou salinidade maior que 36. Esse padrão está de acordo com o cenário no qual a pluma de baixa salinidade estava descolada da costa sob a ação desse vento.

Finalmente, a diminuição da salinidade identificada no Fundeio F4 (Figura 72) mostra uma possível semelhança com o cenário simulado mostrado na Figura 6 19 (painel esquerdo – ventos SE). No entanto, a análise dessa dinâmica ainda está em avaliação.

1.6.2.7 Novas etapas da modelagem numérica oceânica

Nos últimos meses foram realizadas modificações do modelo numérico de forma a tornar a representação dos cenários modelados ainda mais realística. Num primeiro momento, a área da grade 1 foi expandida (Figura 4 25: Imagem da cor verdadeira obtida pelo sensor VIIRS/Suomi NPP (A), da Temperatura da Superfície do Mar (TSM – B) e da concentração de Clorofila-a obtidas pelo sensor Aqua/MODIS no dia 15 de janeiro de 2019. Os círculos em branco mostram a localização das estações oceanográficas onde foram realizados os levantamentos de dados com o CTD durante a campanha trimestral e os círculos em verde mostram as estações realizadas no dia da obtenção da imagem. As regiões em branco das figuras são referentes à presença de nuvens.) e, até o momento, têm-se optado pelo aninhamento do tipo one-way.

Figura 113: Domínio de modelagem considerado nas primeiras simulações realizadas (Grade antiga) e o domínio que vem sendo considerado nos últimos cenários na modelagem.



Fonte: autoria própria.

Além disso, foram realizadas melhorias no alisamento da batimetria incorporada ao modelo (GEBCO), a fim de remover problemas gerados no processo de interpolação da batimetria para a grade de modelagem. Também foram redefinidos os níveis sigma, para que as camadas limites de superfície e fundo pudessem ser melhor resolvidas.

Ao serem avaliados os resultados das médias de temperatura da água para os períodos de verão e inverno dos anos de 2015 e 2016, foi identificado que o modelo tem se aquecido, e para solução deste problema optou-se pela modificação do banco de dados das forçantes atmosféricas, passando a ser utilizado o *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA Interim/ECMWF), que fornece produtos num intervalo de 3 horas, somado a um relaxamento newtoniano da superfície para valores climatológicos.

Optou-se pela alteração da fonte de dados de maré imposta nos contornos, de modo que atualmente vem sendo utilizado o *Finite Element Solution* (FES2014, AVISO, 2014) que fornece informações de 34 componentes de maré, com resolução de $1/16^\circ$.

Em face dos aprimoramentos realizados, temos um novo modelo operante, com simulação iniciada em 2013 e rodando, com planejamento de integração até o ano de 2018. Nos mais recentes cenários de modelagem, novas estações virtuais foram definidas, de forma que seus resultados possam ser comparados com os dados que vem sendo coletados na região. Em relação ao módulo biogeoquímico do modelo, apesar da necessidade de aquecimento, este já se encontra em modo operante. Na atual etapa do trabalho, vem-se trabalhando na implementação do lançamento de derivadores lagrangeanos virtuais durante as simulações.

1.7 DISCUSSÃO/INTEGRAÇÃO

Neste item é realizada uma discussão/integração dos resultados que foram apresentados detalhadamente nas seções anteriores das diferentes abordagens de estudo (sensoriamento remoto, perfilagem, fundeios e modelagem numérica).

O objetivo dessa seção é comparar e confrontar os resultados, discutindo-os de forma a melhor compreender o destino do aporte de água doce e sedimentos provenientes do Rio Doce. Quando possível foram realizadas análises dos resultados pré-acidente, ou seja, anteriores a novembro de 2015, para avaliar: (1) a dispersão dos materiais ocorrida no período agudo de chegada rejeitos ao oceano, e; (2) os efeitos decorrentes da chegada dos rejeitos no mar, associando-os à dinâmica física costeira dominante na região.

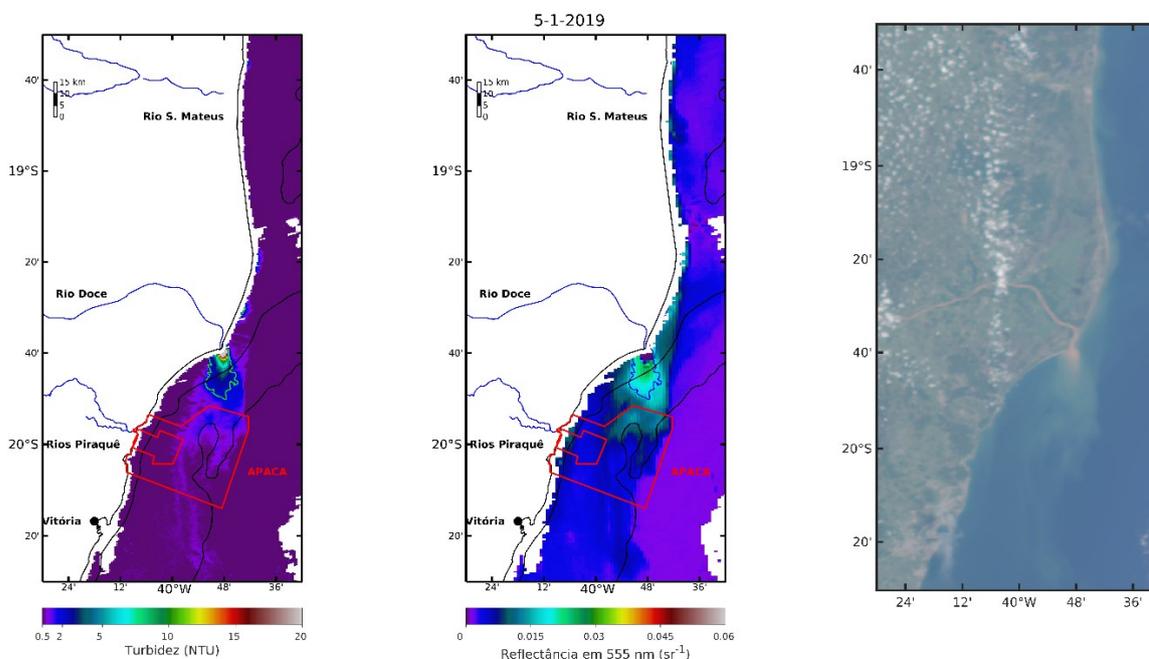
As análises apresentadas nesta seção giram em torno das distribuições espacial (horizontal e vertical) e temporal da turbidez, assim como giram em torno do transporte de sedimentos simulados a partir de modelagem numérica.

A turbidez próxima à foz do Rio Doce mostrou variações temporais e espaciais que são consequência de uma combinação de diferentes processos físicos que ocorrem 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 pela atuação dos ventos (tensão de cisalhamento).

Os maiores valores de turbidez registrados em superfície durante os cruzeiros estiveram relacionados aos pontos mais rasos (prof. local < 20m), sendo que quanto mais próximo a foz do Rio Doce maiores eram os valores de turbidez, apesar de os valores medidos sempre terem sido inferiores a 10 NTU. A distribuição espacial identificada a partir das perfilagens mostrou semelhanças com os resultados obtidos a partir do sensoriamento remoto de cor da água do mar na região. No sensoriamento remoto, a diferenciação entre a reflectância no comprimento de onda 555 nm (banda da cor verde no espectro visível) e a turbidez superficial calculada permitiu observar que a abrangência deste último parâmetro alcançou as primeiras dezenas de quilômetros (~10-20 km) ao sul da foz do Rio Doce.

Nos primeiros dias de janeiro de 2019, quando a vazão do rio atingiu seu ápice com valores superiores a 3000 m³/s e os ventos predominantes eram de norte-nordeste, o sensoriamento mostrou que a isolinha superficial de 2 NTU de turbidez marcou o limite norte da APA Costa das Algas a aproximadamente 25 km da foz do rio (Figura 114, ver também a Figura 20 no Cenário II da Seção 1.3). Nessa época, foram calculados os maiores valores de turbidez superficial obtidos a partir dos sensores remotos. Nos dias 2 e 3 de janeiro, a turbidez superficial ultrapassou os valores de 100 NTU a 1 quilômetro da foz do Rio Doce, dirigindo-se para sul em direção à APA Costa das Algas. Para norte, a determinação do alcance da pluma de sedimentos via sensoriamento remoto foi quase sempre prejudicada tanto pela presença de nuvens quanto por eventos de ressuspensão que mascararam o sinal superficial do aporte fluvial primário que saiu do Rio Doce.

Figura 114: Imagem de turbidez (em NTU) calculada para a região adjacente a foz do Rio Doce (painel à esquerda), reflectância no comprimento de onda 555 nm (associado à banda da cor verde do espectro visível) (centro) e cor verdadeira (direita) obtidas pelo sensor MODIS no dia 05 de janeiro de 2019. As linhas vermelhas demarcam a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (APACA). As isolinhas verdes (na imagem à esquerda) e azuis (na imagem ao centro) marcam o valor de turbidez de 2 NTU. As linhas pretas correspondem às isóbatas de 25 e 50 metros.



Fonte: autoria própria.

Embora os valores de turbidez e reflectância no comprimento de onda 555 nm obtidos através do sensoriamento remoto sejam consideravelmente maiores do que os medidos *in situ*, a comparação quantitativa dos valores de turbidez deve ser considerada à luz das limitações de cada uma das abordagens. O processamento da turbidez superficial a partir do satélite utilizou algoritmos-padrão de cálculo e considerou diferentes canais de comprimento de onda dos sensores remotos, adequados a um cálculo geral de turbidez aplicado à diferentes regiões do globo. Para obtenção de valores mais realísticos, seria necessário a modificação dos algoritmos, o que demandaria a realização de calibrações com dados medidos *in situ*. Para as medições dos dados, seria necessário a utilização de instrumentos específicos para que os valores absolutos de turbidez superficiais remotos fossem mais próximos das medições de campo. Ademais, é importante ressaltar que as campanhas de campo nem sempre mediram o núcleo de maior turbidez devido à distribuição dos pontos das estações oceanográficas e a direção do fluxo proveniente do aporte fluvial do Rio Doce. Durante os momentos de dominância dos ventos de norte-nordeste, foi comum observar nas imagens de cor do mar a passagem das águas de maior turbidez entre os pontos SD 01 e SDS 20 (e.g., Figura 40 na Seção 1.4).

Em momentos de ventos de leste, houve uma diminuição do sinal superficial de ressurgência e a cor da água mostrou maior turbidez seguindo a linha de costa em direção sudoeste (e.g., ver Figura 66 na Seção 1.4). Os pontos extras realizados ao longo das campanhas tentaram justamente minimizar a perda de informações devido ao complexo trabalho de acompanhar a direção do aporte fluvial na região costeira em tempo real, o que será explicado a seguir.

Durante as campanhas, as observações de campo das equipes embarcadas indicaram que houve uma resposta da posição da pluma superficial de sedimentos em função dos ciclos de enchente e vazante da maré, porém com as amostragens realizadas não foi possível traçar conclusões objetivas em relação à forçante de maré. A modelagem numérica oceânica, no entanto, permitiu simular o efeito da maré na região da foz do Rio Doce. Dentre os efeitos da maré, o mais importante pode ser didaticamente explicado do seguinte modo: durante as enchentes, as águas costeiras invadiam a foz do rio e empurravam o aporte fluvial para o interior da barra da foz em superfície. Inversamente, nas vazantes a diminuição do nível permitia a saída superficial do material fluvial (água de mistura e sedimentos), fato descrito pela equipe de campo que observou in loco tal dinâmica. A variabilidade da posição desse sinal superficial também foi observada via modelagem numérica, sendo o efeito da maré simulado nos primeiros 4 km da Foz do Rio Doce, escala espacial próxima do raio interno de deformação de Rossby para a região, considerando a estratificação local.

De modo geral, a região próxima à foz do Rio Doce apresentou um padrão vertical repetido na maioria das campanhas. Nos perfis de turbidez apresentados (Seção 1.4) os valores encontrados foram consideravelmente maiores próximos ao fundo se comparados aos medidos na superfície, tanto nos momentos em que o aporte fluvial se dirigia para o sul quanto para o norte. Geralmente, obteve-se valores de turbidez junto ao fundo uma ordem de grandeza superiores aos observados na superfície. Esses resultados apontaram para uma saída assimétrica de sedimentos na região costeira, com o fundo apresentando turbidez mais elevada se comparado à superfície. Essa diferença vertical foi destacada nas campanhas semestral e mensais de novembro e fevereiro, chegando a atingir valores superiores a 60 NTU junto ao fundo na mensal de novembro (Figura 47- Seção 1.4).

Nos resultados apresentados observou-se que o gradiente vertical de turbidez próximo à foz do Rio Doce mostrou uma relação com a estratificação gerada pela presença do processo de ressurgência costeira na região. Nesse caso específico, a estratificação pôde ser considerada uma barreira à homogeneização vertical. Ao se combinar a estratificação com a vazão do rio e a hidrodinâmica regional, criou-se um sistema de duas camadas na região com comportamentos que podem ser distintos na direção de transporte de sedimentos.

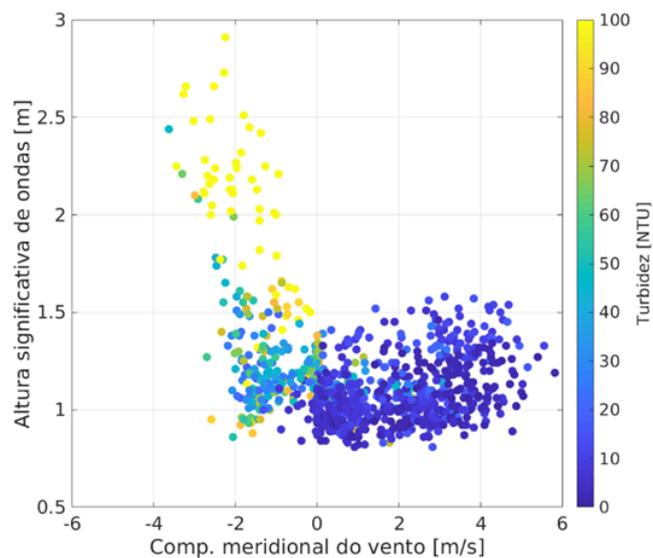
Durante o período de relativa estabilidade dos ventos de norte-nordeste após 11 de dezembro de 2018, foi possível observar o sinal superficial da turbidez no sensoriamento em direção ao sul. Ao mesmo tempo, as correntes próximas ao fundo no Fundeio 2 mostravam em certos períodos correntes para oeste-sudoeste, indicando comportamentos distintos de transporte de sedimentos entre a superfície e fundo. As correntes no Fundeio 2 mostraram uma intensa variabilidade temporal ao longo do registro, sem uma direção preferencial das correntes e uma intensa rotação dos vetores ao longo de toda a coluna d'água. De acordo com Quaresma e outros (2015), a região onde está localizado o Fundeio 2, ao sul da foz, se insere no chamado depocentro, definido como sendo a área preferencial de deposição dos sedimentos provenientes do Rio Doce. As imagens de satélite que se referem a cor verdadeira da água do mar mostraram a recorrente formação de estruturas ciclônicas ao sul da foz, que explicaram

em parte a alta variabilidade temporal de correntes observadas no Fundeio 2 e a existência do depocentro nessa mesma área.

A diferença vertical dos perfis de turbidez, no entanto, não foi uma característica absolutamente invariável ao longo das observações junto à foz do Rio Doce. As campanhas mensal de dezembro e trimestral mostraram perfis com pequenas diferenças verticais de turbidez. Durante o período dessas campanhas - entre a segunda quinzena de dezembro de 2018 e janeiro de 2019 - as condições hidrodinâmicas da plataforma continental mostraram eventos de menor energia (conforme descrito na Seção 1.4). Esse período foi marcado por uma relativa estabilidade dos ventos de norte-nordeste, alturas significativas de ondas menores que 1,5m e relativa estabilidade direcional das correntes na coluna d'água. Nessa mesma época, os resultados de sensoriamento remoto foram marcados por baixos valores de reflectância do comprimento de onda 555 nm e turbidez (Cenário II - Seção 1.3), exceto próximo à foz do rio durante o período de alta vazão no início de janeiro de 2019 (Cenário III - Seção 1.3).

Ainda em relação às perfilagens realizadas na segunda quinzena de dezembro de 2018 e janeiro de 2019, temos que a combinação de condições hidrodinâmicas com menor energia e perfis de turbidez com pequenas diferenças verticais, sugeriram que nos perfis que mostraram o aumento da turbidez junto ao fundo havia altura significativa de ondas acima de 1,5m, inversões constantes de vento e correntes. Logo, nestes eventos tiveram-se não somente a saída de material proveniente do Rio Doce como também o material depositado na região costeira, mas que sofreu ressuspensão. Na Figura 115 pode ser observada a interação entre a turbidez, altura de onda e vento, sendo destacada a ressuspensão associada a eventos de alta energia, como a entrada de frentes frias e aumento da altura significativa de ondas.

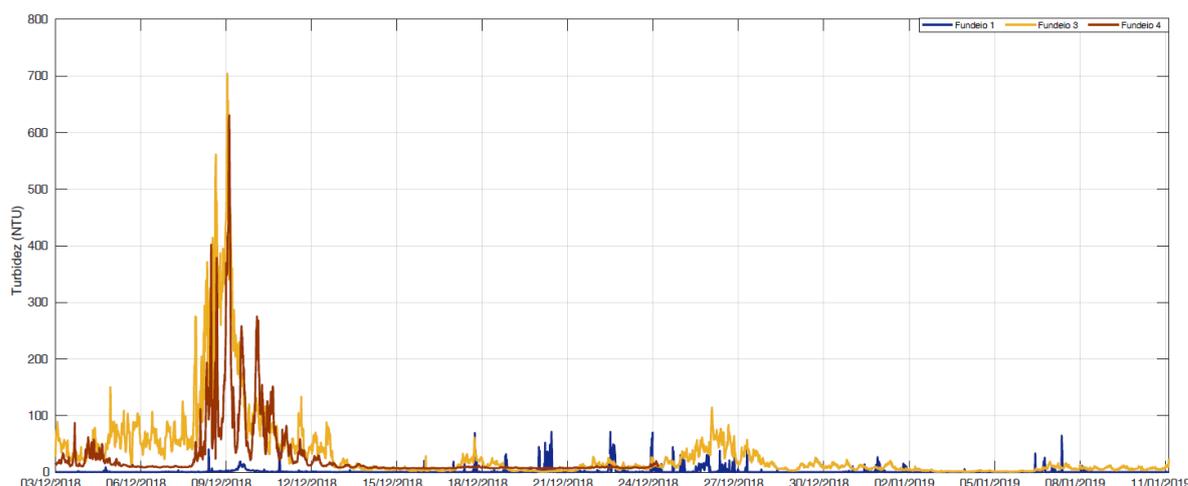
Figura 115: Relação entre altura significativa de ondas, componente meridional do vento e a turbidez medida no fundo no Fundeio 3 para o período entre 03 e 24 de dezembro de 2018.



Fonte: autoria própria.

No campo mais afastado da foz esse fato tornou-se ainda mais evidente, visto que nessa região a variabilidade da vazão fluvial e ciclo de maré foram menos importantes e a turbidez junto ao fundo respondeu às mudanças na hidrodinâmica costeira. Infelizmente as dificuldades ocorridas com a continuidade de medições do CTD e, por conseguinte, a evolução temporal da turbidez junto ao fundo (Figura 116) não permitiram analisar um período muito longo de variabilidade temporal da relação da turbidez com a hidrodinâmica.

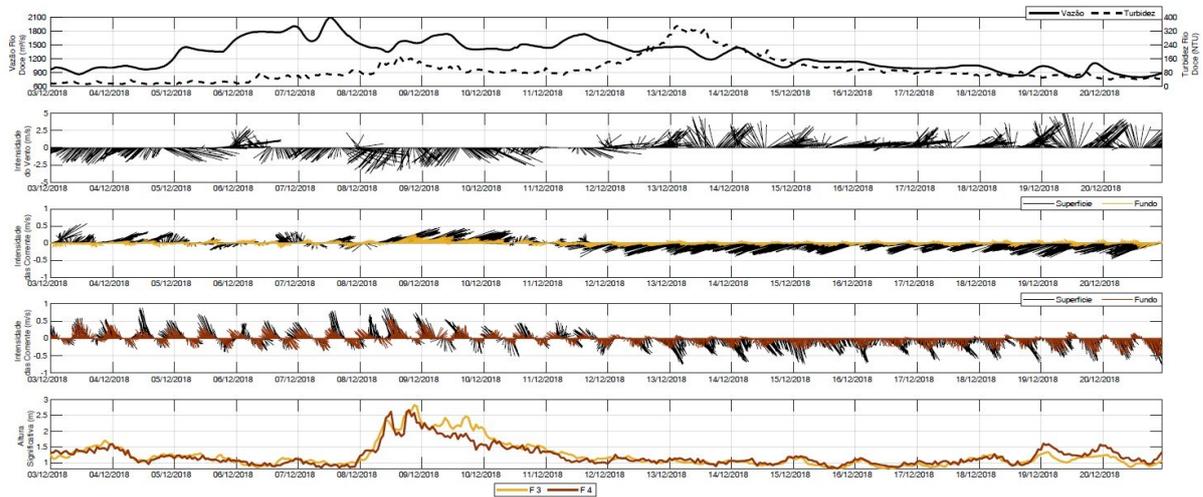
Figura 116: Série temporal da Turbidez nos fundeios F1 (azul), F3 (amarelo) e F4 (vermelho) entre os dias 03 de dezembro de 2018 a 11 de janeiro de 2019.



Fonte: autoria própria.

Dentre o período de medição de dados, destacou-se um evento de aumento da turbidez no fundo ocorrido no início de dezembro de 2018. A evolução temporal no período das forçantes é mostrada na Figura 117 e os efeitos nos demais parâmetros medidos é visualizado na Figura 118. Esse período iniciou-se com a entrada de uma frente fria na região no dia 3 de dezembro. À entrada da frente seguiu-se um aumento significativo da temperatura junto ao fundo na APA Costa das Algas e ao norte da foz do Rio Doce (Fundeio 3) e uma forte diminuição da temperatura no fundo em Degredo (Fundeio 4), diminuindo consideravelmente o gradiente horizontal de massa específica (Figura 118 A) e temperatura (Figura 118 D) entre o norte da foz e a região de Degredo, conforme também destacado na Seção 1.3.

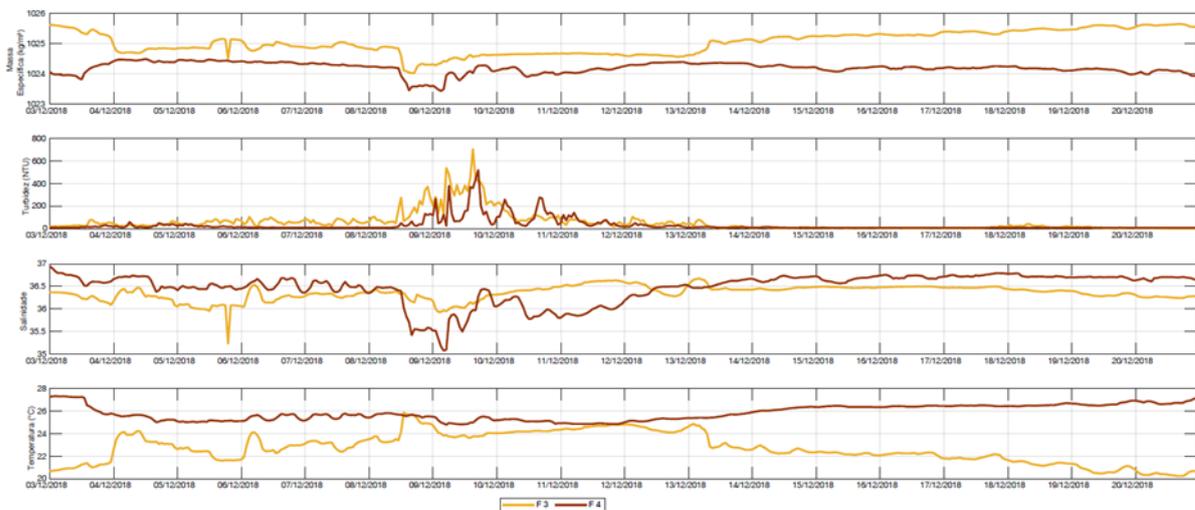
Figura 117: Série temporal da (a) vazão do Rio Doce estimada para a foz a partir dos dados medido em Colatina – ES (contínuo) e turbidez medida na estação automática RDO-16 bóia (tracejado), (b) média de 6 em 6 h dos ventos medidos na estação automática RDO-16, (c) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (amarelo) medidas no F3, (d) corrente superficial (preto) e corrente de fundo (vermelho) medidas no F4 e, (e) Altura significativa de onda medida no F3 (amarelo) e no F4 (vermelho), no período de 03 a 20 de dezembro de 2018.



Fonte: autoria própria.

Embora a informação do perfil vertical de temperatura não esteve disponível para os demais fundeios, especulou-se que nesses momentos de aquecimento no fundo em Fundeio 1 e Fundeio 3 o gradiente vertical de temperatura diminuiu consideravelmente devido ao recuo para o oceano de águas frias características da ACAS. Nos dias 6 e 7 de dezembro, o Rio Doce exibiu picos de vazão superiores a 1800 m³/s (Figura 117 A). Ao mesmo tempo, houve a passagem de uma nova frente fria na região, alterando a direção dos ventos (Figura 117 B) e intensificando as correntes para norte em Fundeio 3 (Figura 117 C), com menores alterações em Fundeio 4 (Figura 117 D).

Figura 118: Série temporal da (a) Massa específica, (b) Turbidez, (c) Salinidade e (d) Temperatura medidas nos fundeios F3 (amarelo) e F4 (vermelho) no período de 03 a 20 de dezembro de 2018.



Fonte: autoria própria.

Essas mudanças foram acompanhadas por um aumento da altura significativa de ondas ($> 2\text{m}$ –Figura 117 E) e do período de pico ($>12\text{s}$). 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 118 B). No mesmo período, no entanto, houve uma queda significativa da salinidade junto ao fundo (Figura 118 C) em Fundeio 3 (diminuição de 0.5) e especialmente em Fundeio 4 (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 Fundeio 3 e Fundeio 4 no período foi o menor do registro, o que pode também ter contribuído para diminuir a barreira imposta ao transporte pela estratificação.

Durante o período de aumento da turbidez em Fundeio 3 e Fundeio 4 no início de dezembro de 2018, as imagens de sensoriamento remoto foram bastante prejudicadas pela cobertura de nuvens presente em praticamente todo o período de inversão das correntes para o norte. Dentre as imagens, apenas a que se refere ao dia 6 de dezembro (Figura 20 - Seção 1.3) mostrou o início da advecção para norte do aporte fluvial e um início do sinal de ressuspensão ao norte da Foz do Rio Doce, que se estendeu até menores latitudes sobre o Banco de Abrolhos. Embora com diversas lacunas devido às nuvens, essa imagem mostrou que a abrangência espacial da reflectância no comprimento de onda de 555 nm foi consideravelmente maior que a da turbidez superficial calculada. Eventos semelhantes foram observados em diferentes ocasiões e são ilustrados nas Figura 25 e Figura 26 (Seção 1.3), nos dias 2 de agosto de 2013 (inverno) e 6 de janeiro de 2016 (verão). As imagens de cor verdadeira indicaram uma continuidade de um sinal superficial ao longo da costa norte do Espírito Santo até Caravelas. No entanto, a separação entre a reflectância no comprimento de onda de 555 nm e turbidez mostrou que essa continuidade está muito mais relacionada ao primeiro sinal do que ao segundo.

A entrada das frentes frias prejudicou tanto a aquisição de imagens de satélite devido à alta cobertura de nuvens, como também prejudicaram as saídas de campo. Logo, as observações nesses momentos foram escassas e a compreensão espacial dos processos de transporte da pluma de sedimentos tornou-se um desafio muito maior. Além disso, não foi possível quantificar, na maioria das vezes, o tempo demandado para que as mudanças nos padrões (de turbidez, das condições termohalinas e hidrodinâmicas) gerados pela entrada de frentes frias voltassem a ter características dos padrões típicos de verão.

O pico de vazão registrado no início de 2019 não estava relacionado à passagem de uma frente fria na região e foi resultado das chuvas que ocorreram numa área da bacia do Rio Doce distante da foz (região de Minas Gerais). Com isso, foi possível observar a advecção para sul da pluma de sedimentos até atingir o limite norte da APA Costa das Algas (Cenário III - Seção 1.3).

A integração dos resultados descrita anteriormente se referiu, em sua maioria, às medições *in situ* e *ex situ* realizadas de outubro de 2018 a fevereiro de 2019. As análises concentraram-se em caracterizar

a hidrodinâmica local e entender as relações entre o aporte fluvial recente e a turbidez do material já depositado na plataforma continental ao longo dos mais de três anos desde o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana - MG. Os efeitos agudos da chegada dos rejeitos nos meses seguintes a novembro de 2015 foram analisados a partir de uma abordagem numérica de modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos (apresentados na Seção 1.6).

Os resultados numéricos indicaram um padrão predominante de propagação para o sul da pluma de sedimentos do Rio Doce durante os seis meses de simulação após a chegada na plataforma continental. Durante a maior parte desse período, a pluma esteve localizada na área delimitada pelas latitudes de 19,4°S e 20,3°S, enquanto o limite leste correspondeu à quebra de plataforma (100 m de profundidade) localizada até 40 km da costa logo ao sul da foz do rio, porém em concentrações de sedimento em suspensão inferiores sobre a plataforma interna e média.

Durante os eventos de alta vazão sob contínuos ventos de NE, a pluma de sedimentos propagou-se com um alcance máximo de 75 km para sul ao longo da região costeira. Essas condições foram mais comuns durante a estação chuvosa (de novembro a abril), especialmente em janeiro, quando a vazão do rio foi alta e os ventos dos quadrantes norte-leste predominaram. Durante o período simulado, a maior taxa de vazão durou aproximadamente dez dias, entre 20 e 30 de janeiro de 2016. Consequentemente, a pluma de sedimentos foi observada nas latitudes próximas à cidade de Vitória (plataforma média e externa) apenas durante dois dias, menos de 5% do período total de tempo investigado. Nesse sentido preferencial para sul, a APA Costa das Algas foi atingida em quase 50% do tempo de simulação, embora em pequenas concentrações. A influência do aporte fluvial do Rio Doce sobre a APA Costa das Algas já havia sido mencionada em trabalhos anteriores (Bastos et al., 2017, Rudorff et al., 2018).

Na direção norte o alcance da pluma foi limitado a aproximadamente 75 km da foz, próximo à localidade de Barra Nova (18,95°S e 39,73°W). A distribuição espacial dos depósitos de sedimentos finos simulados neste estudo esteve em boa concordância com os resultados de Quaresma et al. (2015), Bastos et al. (2015) e Bourguignon et al. (2018) com base em medições *in situ*, que revelaram que a menor fração de sedimentos é transportada para o mar e depositada preferencialmente na plataforma interna, principalmente ao sul da foz entre 10 e 30 m de profundidade, e uma fração menor deslocada para o norte ao longo da costa. A distribuição dos sedimentos simulados no fundo foi formada principalmente durante os ventos NE e a baixa vazão do rio, estando localizada entre a foz do rio e aproximadamente 20°S.

Ao serem considerados cenários no qual houve ocorrência de ventos SW, que são pouco frequentes na região, observou-se a deposição de sedimentos para ao norte da foz do rio. No entanto, depois que os rejeitos chegaram ao oceano, a extensão norte do depósito de sedimentos para o fundo do mar foi limitada em 19,5°S na plataforma média, semelhante à distribuição de fácies sedimentares (Bastos et al., 2015; Bourguignon et al., 2018), revelando o mesmo padrão e área de abrangência da lama terrígena depositada ao norte da foz do rio. Vale ressaltar que nos cenários de simulações

considerados, reconstruiu-se apenas a deposição primária de sedimentos em suspensão, não sendo simulada a ressuspensão e redistribuição de material subsequente, que no ambiente é causada pela circulação costeira, marés e ondas, nem o seu impacto no ambiente costeiro.

1.7.1 SÍNTESE DOS RESULTADOS

1.7.1.1 APA Costa das Algas

Os resultados obtidos e analisados para a APA Costa das Algas revelaram, em termos hidrodinâmicos, que a região apresentou correntes coerentes com a variabilidade temporal dos ventos na região, com períodos de oscilação na escala de 3 a 10 dias. A superfície mostrou uma resposta quase que imediata (0-1h) às mudanças no vento, enquanto o fundo apresentou uma resposta com atraso (~6h) em relação ao vento. Esse atraso e diferenças entre a circulação da superfície e fundo estiveram relacionadas ao processo de ressurgência costeira que ocorreu principalmente durante o verão na região, englobando a APA. Esse comportamento, no entanto, pode ser significativamente alterado no inverno, quando há uma homogeneização vertical na região.

A turbidez próxima ao fundo mostrou pequenas variações associadas à ressuspensão de material depositado no fundo em eventos de entrada de frente fria e ondulações remotas. Porém, tanto os resultados de sensoriamento remoto quanto os resultados de modelagem numérica apontaram para uma influência direta sobre a APA da pluma de sedimentos oriunda do Rio Doce e que é transportada para sul durante os períodos de ventos dominantes de norte-nordeste durante o verão. Embora a região de deposição principal esteja localizada entre o norte da APA e ao sul da foz (depocentro), o transporte de sedimentos modelado para o período do efeito agudo da chegada dos rejeitos mostrou a deposição de sedimentos oriundos do rio em toda a APA, principalmente na plataforma interna e média. Em períodos de alta vazão recentes, a pluma de sedimentos superficial atingiu o limite norte da APA. Porém, efeitos secundários do aporte fluvial associados à reflectância no comprimento de onda 555 nm que podem ser associados ao fitoplâncton marinho mostraram-se recorrentes sobre a APA Costa das Algas e estenderam-se até maiores latitudes ao sul da área de proteção.

1.7.1.2 Banco de Abrolhos e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos

As observações da área física sobre o Banco de Abrolhos e o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos tiveram uma abrangência espacial e temporal muito restrita que dificultaram a análise da conectividade entre a saída dos rejeitos do Rio Doce e essas áreas. As medições no extremo sul do Banco na plataforma interna mostraram que a maré exerceu um papel importante na hidrodinâmica local. Os cruzeiros mostraram perfis de turbidez com baixos valores (< 2 NTU) e uma coluna d'água com baixa estratificação na plataforma interna ao longo do Banco e sobre o PARNAMAR dos Abrolhos. No entanto, as entradas de frentes frias e ondulações remotas foram capazes de remobilizar o fundo ao sul do Banco, aumentando consideravelmente (>600 NTU) a turbidez no fundo e disponibilizando sedimento e nutrientes para transporte.

Esses momentos de entradas de frentes e ondulações apresentaram sinais característicos no sensoriamento remoto que permitiu uma melhor compreensão espacial da distribuição da cor verdadeira da água do mar. Os momentos de mobilização do fundo ao norte da foz do Rio Doce foram geralmente acompanhados por um sinal de turbidez superior a 2 NTU bem próximo à costa que se estendeu desde a foz até praticamente o Rio Caravelas, próximo ao PARNAMAR dos Abrolhos. Esse sinal de turbidez, no entanto, foi proveniente da mistura do aporte do Rio Doce com o aporte dos demais rios ao longo da costa, tornando difícil separar a influência de cada um nessa continuidade do sinal. Sobreposto ao sinal de turbidez superficial, o efeito secundário associado à reflectância no comprimento de onda 555 nm, que pode ser associado ao fitoplâncton marinho, também foi significativo e conectou a foz do Rio Doce ao PARNAMAR até pelo menos a isóbata de 25 metros de profundidade. A modelagem de transporte de sedimentos apontou que, embora não haja a chegada e deposição de sedimentos oriundo do Rio Doce na área do PARNAMAR dos Abrolhos, o alcance norte do aporte do Rio Doce pode se estender até pelo menos 75 km da foz, depositando sedimentos finos sobre o sul do Banco de Abrolhos. Deve-se salientar novamente que a modelagem numérica realizada não contemplou a ressuspensão do sedimento já depositado. Visto que as medições *in situ* apontaram para eventos de ressuspensão associados às entradas de frentes frias, o limite norte para o sedimento recorrentemente mobilizado por esses eventos pode ser ainda maior que o simulado e apresentado neste relatório.

1.7.2 PERGUNTAS EM ABERTO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste relatório foram apresentados dados e análises inéditas sobre a hidrodinâmica costeira do litoral norte do Espírito Santo e indicações do destino do aporte fluvial proveniente do Rio Doce sob a perspectiva de melhor compreender a dispersão no ambiente marinho dos rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), em novembro de 2015. Os fatores físicos que influenciaram a distribuição e a variabilidade da turbidez ao longo da coluna d'água foram analisados em diferentes abordagens: medições *in situ*, *ex situ* e modelagem numérica hidrodinâmica e de transporte de sedimentos.

Embora a combinação das diferentes abordagens tenha permitido a análise de diferentes processos físicos que atuam na região, respondendo questões relevantes para a compreensão do destino dos rejeitos e possível impacto na biodiversidade, algumas questões permanecem em aberto. As caracterizações e análises apresentadas até o presente momento concentraram praticamente todo o conhecimento da dinâmica regional nos períodos de verão. Destacou-se nessa estação a importância da ressurgência costeira no estabelecimento de um sistema de duas camadas até o norte da foz do Rio Doce, que influencia significativamente a distribuição vertical dos perfis de turbidez próximo à foz e faz com que as correntes ao longo da plataforma continental apresentem em alguns momentos direções distintas entre a superfície e o fundo. A região ao norte da foz e ao sul de Degredo apresentou uma forte estratificação vertical e horizontal durante o verão, resultado da ressurgência incompleta (sem afloramento das isotermas). A região ao sul do Rio Doce apresentou menor estratificação próximo à costa (aproximadamente em profundidades < 20m) devido ao afloramento da ressurgência costeira.

Somado ao efeito da ressurgência, o período de verão foi marcado por uma prevalência de ventos de norte e nordeste na região da foz, com eventuais entradas de frentes frias e ondas de gravidade de origem remota. Os resultados apresentados apontam que a remobilização do fundo e aumento da turbidez na coluna d'água têm estreita relação com a entrada de ondas de maior período e maior altura significativa, que somada à modificação das correntes pela atuação dos ventos de sul foram capazes de diminuir a estratificação local e transportar sedimentos para o norte em direção ao Banco de Abrolhos.

Mudanças consideráveis nesses padrões de circulação e precipitação atmosférica e dinâmica oceânica são esperados para o inverno. Nesta estação, os fluxos termodinâmicos líquidos direcionam-se para a atmosfera, resfriando a camada limite superficial oceânica, alteram-se os regimes de precipitação sobre a bacia hidrográfica do Rio Doce, diminuindo sensivelmente a vazão fluvial, intensifica-se as entradas de frentes frias e ondulações remotas oriundas do quadrante sul, alterando-se consideravelmente a energia dos processos hidrodinâmicos na região do Rio Doce, entre outros fatores. Esses diferentes processos atmosféricos e oceânicos podem alterar consideravelmente a hidrodinâmica costeira e o transporte de sedimentos oriundos do Rio Doce ao longo da estação, dar sustentação a modificar conclusões baseadas no verão, e até mesmo motivar mudanças sensíveis nas estratégias e metodologias de estudo da dinâmica local. Essas mudanças são levantadas a seguir em tópicos e contextualizadas com os resultados já obtidos:

- As medições *in situ* e *ex situ* mostraram a importância da ação das ondas na mobilização do fundo marinho na região e disponibilização de sedimentos para o transporte. Espera-se futuramente a realização de simulações numéricas oceânicas acopladas a modelos de propagação de ondas de gravidade para aumentar o grau de realismo das modelagens computacionais e avançar o conhecimento do destino dos rejeitos na região costeira;

- Os resultados mostraram que há uma frente térmica entre o norte da foz e Degredo, com eventos transporte para norte do sedimento oriundo do Rio Doce somados a remobilização do material já depositado na plataforma continental. Esse sinal seguiu junto à costa para norte e apresentou eventualmente um transporte para nordeste sobre o banco de Abrolhos. Seria necessário o lançamento de um fundeio adicional nesse caminho para nordeste do material ressuscitado e/ou um fundeio em latitudes próximas da foz do Rio Doce, porém na plataforma média/externa de forma a melhor compreender a variabilidade temporal da penetração de ACAS na plataforma, que condiciona genericamente a existência de duas camadas de transporte de sedimentos na plataforma interna? Seria necessário reposicionar o fundeio em Degredo de maneira a melhor compreender o alcance norte do transporte de partículas e da variabilidade temporal do sinal da ressurgência costeira e eventos de resfriamento sobre o Banco de Abrolhos?

- O subgrupo de sedimentologia mostrou resultados que revelaram uma complexa composição dos sedimentos oriundos do aporte fluvial do Rio Doce, com granulometrias variadas, diferentes composições mineralógicas e velocidades de decantação. Esses resultados apontam para um desafio

metodológico de simular numericamente essa complexidade de fatores que afetam o transporte dos sedimentos, visto que a maioria dos modelos possuem estado da arte atuais que não contemplam as complexidades apresentadas e precisariam de ajustes empíricos e semi-analíticos e uma longa sequência de testes de forma a aproximar os processos físicos simulados aos processos reais.

- O sensoriamento remoto mostrou-se uma importante ferramenta de acompanhamento superficial do destino do material oriundo da foz do Rio Doce e indicador dos processos de ressuspensão e florações algais ao longo da plataforma continental capixaba e Banco de Abrolhos. A separação entre as diferentes bandas medidas pelos sensores passivos do satélite permitiu diferenciar a contribuição da turbidez e da banda da cor verde do espectro visível na composição dos mapas de cor verdadeira de água do mar. A metodologia empregada, no entanto, não está ajustada para as características locais do sedimento em suspensão, fitoplâncton e materiais dissolvidos que alteram o sinal de retorno da luz do sol e mudam as leituras dos sensores dos satélites. Uma mudança dos algoritmos de separação das diferentes bandas adaptadas às características regionais estaria condicionada a aquisição de instrumentos específicos e a realização de campanhas de campo direcionadas às medições desses diferentes fatores que afetam os registros dos sensores remotos.

- Efeitos de variabilidade interanual dos padrões atmosféricos e oceânicos podem afetar sensivelmente o destino dos rejeitos depositados na plataforma continental. Os ciclos de El Niño-La Niña que influenciam a América do Sul e alteram os padrões de circulação atmosférica, regimes de precipitação e agitação marítima na costa do Espírito Santo podem representar uma importante fonte de variabilidade temporal e espacial do aporte e dispersão fluvial do Rio Doce na costa capixaba, com efeitos ainda imprevisíveis que devem ser monitorados e avaliados. Os resultados apresentados ao longo deste relatório entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019 se inserem em um período de El Niño. Os efeitos ainda precisam ser melhor avaliados com a continuidade do monitoramento e a comparação com observações em períodos sem a influência do El Niño. Além disso, eventos extremos como a tempestade tropical Iba, que se desenvolveu próxima à costa capixaba e baiana em março de 2019, podem ter efeitos agudos ainda imprevisíveis sobre a dispersão dos rejeitos e impacto na biodiversidade regional.

1.8 REFERÊNCIAS

- Alvarenga, B. Distribuição Fitoplanctônica. Vitória, UFES, 2019. (Comunicação oral).
- ANA. Agência Nacional de Águas, Rede Hidrometeorológica Nacional. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/gestorpcd/Mapa.aspx>>. Acesso em: março de 2019.
- 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 v. 18, p. 71–78, 2004.
- Aurin, D.; Mannino, A.; Franz, B. Spatially resolving ocean color and sediment dispersion in river plumes, coastal systems, and continental shelf waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 137. 2013.
- AVISO. Satélite Altimetry Data. 2014. Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>>. Acesso em: março de 2019.
- Bastos, A.C., Quaresma, V.S., Marangoni, M.B., D’agostini, D.P., Bourguignon, S.N., Cetto, P.H., Silva, A.E., Amado-Filho, G.M., Moura, R.L., Collins, M. Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: a synthesis from a mixed siliciclastic carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. *J. S. Am. Earth Sci.* v. 63, p. 125–136, 2015.
- Bastos, A.C., coautores. Monitoramento da Influência da Pluma do Rio Doce após o rompimento da Barragem de Rejeitos em Mariana/MG, Novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- Bjornsson, H.; Venegas, S. A. *A Manual for EOF and SVD analyses of Climatic Data*. Montréal, Québec, 1997.
- Bourguignon, S.N., Bastos, A.C., Quaresma, V.S., Vieira, F.V., Pinheiro, H., Amado-Filho, G.M., Moura, R.L., Teixeira, J.B. Seabed Morphology and Sedimentary Regimes defining Fishing Grounds along the Eastern Brazilian Shelf. *Geoscience*. v. 8, p. 91, 2018.
- Burla, M.; Baptista, A.M., Zhang, Y.; Frolov, S. Seasonal and interannual variability of the Columbia River plume: A perspective enabled by multiyear simulation databases. *J. Geophys. Res.* v. 115, C00B16, 2010.
- 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.
- Castelão, R.; Barth, J. (2006). Upwelling Around Cabo Frio, Brazil: The Importance of Wind Stress Curl. *Geophysical Research Letters*, 33:L03602.
- Chant, R. J. Interactions between Estuaries and Coasts: River Plumes – Their Formation, Transport, and Dispersal. In: Wolanski E and McLusky DS (eds.) *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Vol 2, pp. 213–235, 2011.

Chapman, D.C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. *J. Phys. Oceanogr.* v. 15, p. 1060–1075, 1985.

Choi, B.J.; Wilkin, J.L. The effect of wind on the dispersal of the Hudson River plume. *J. Phys. Oceanogr.* v. 37, p. 1878-1897, 2007.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

CPRM. Sistema de Alerta de Eventos Críticos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. p. 147–166. 2015. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/alerta/site/sace/index.html>>. Acesso em: 01 mar. 2019.

Dogliotti, A. I.; Ruddick, K. G.; Nechad, B.; Doxoran, D.; Knaeps, E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 156, 2015.

Egbert, G.D., Erofeeva, S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.* v.19, p. 183–204, 2002.

Flather, R.A. A tidal model of the northwest European continental shelf. *Mem. Soc. R. Sci. Liége, Ser.* v. 6, p. 141–164, 1976.

Ghisolfi, R. D.; Da Silva, M. P.; Dos Santos, F. T.; Servino, R. N.; Cirano, M.; Thompson, F.L. (2015). Physical Forcing Mechanisms Controlling the Variability of Chlorophyll-a Over the Royal-Charlotte and Abrolhos Banks—Eastern Brazilian Shelf. *Plos One* 10(2).

Gordon, H. R; McCluney, W. R. Estimation of the depth of 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: março de 2019.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em << <http://www.inmet.gov.br>>> Acesso em: março de 2019.

IOC, I., BODC. Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans. British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K. 2003.

Korotenko, K.A., Osadchiev, A.A., Zavialov, P.O., Kao, R.C., Ding, C.F. Effects of bottom topography on dynamics of river discharges in tidal regions: case study of twin plumes in Taiwan Strait. *Ocean Sci.* v. 10, p. 863–879, doi:10.1029/94rg01872. 2014.

Large, W.G., Pond, S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.* v. 11, p. 324–336. doi:10.1175/1520-0485(1981)011,0324:OOMFMI.2.0.CO;2. 1981.

Liu, Y.; MacCready, P.; Hickey, B.M. Columbia River plume patterns in summer 2004 as revealed by a hindcast coastal ocean Circulation model. *Geophys. Res. Lett.* 36, L02601. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2008GL036447>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

Marinha do Brasil. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>> Acesso em: março de 2019.

Mazzini, P. L. F.; Barth J. A. (2013). A Comparison of Mechanisms Generating Vertical Transport in the Brazilian Coastal Upwelling Regions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 5977–5993.

Mazzini, P.L.F.; Barth, J.A.; Shearman, K.; Erofeev, A. Buoyancy-Driven Coastal Currents off Oregon during Fall and Winter. *J. Phys. Oceanogr.* v. 44, p. 2854-2876, 2014.

Mendez, R.; Saldias, G. S.; Decastro, M.; Gomez-Gesteira, M.; Vaz, N.; Dias, J. M. Seasonal and interannual variability of the Douro turbid river plume, northwestern Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, v. 194, 2017.

Mobley, C. D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic press. 2004. Acesso em: <http://soap.siteturbine.com/webbook/file.php?id=176>.

Modern sedimentary processes along the Doce River adjacent continental shelf. *Braz. J. Geol.* v. 45, p. 635–644, 2015. Orlandi, I., 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. Comp. Sci.* v. 21, p. 251–269, 1976.

NASA. Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group; (2014): Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data, NASA OB.DAAC. . Acesso em: 28 fev. 2019.

Nezlin, N. P.; DiGiacomo, P. M.; Stein, E. D.; Ackerman, D. Stormwater runoff plumes observed by SeaWifs radiometer in the Southern California Bight. *Remote Sensing of Environment*, v. 98. 2005.

North, G. R.; Bell, T. L.; Cahalan, R. F.; Moeng, F. J. Sampling errors in the estimation of the empirical orthogonal functions. *Monthly weather review*, v. 110, 1982.

Oliveira, K. S. S., Quaresma, V. S. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. *Journal of South American Earth Sciences*, 78, 101-115, 2017.

Osadchiv, A. A. A method for quantifying freshwater discharge rates from satellite observations and Lagrangian numerical modeling of river plumes. *Environ. Res. Lett.* 10, 085009, doi:10.1088/1748-9326/10/8/085009, 2015.

Osadchiv, A.A., Korotenko, K.A., Zavialov, P.O., Chiang, W.S., Liu, C.C. 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.* v. 16, p. 41–54, doi:10.5194/nhessd-3-5155-2015, 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.* v. 13, p. 465–482, 2017.

Osadchiev, A.A., Zavialov, P.O. Lagrangian model for surface-advected river plume. *Cont. Shelf Res.* v. 58, p. 96–106, doi:10.1016/j.csr.2013.03.010, 2013.

Palóczy, A, Brink KH, da Silveira ICA, Arruda WZ, Martins R.P. 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 p. 5134–5163, 2016.

Quaresma, V.S., Catabriga, G.M., Bourguignon, S.C., Godinho, E., Bastos, A.C.

Raymond, W.H., Kuo, H.L. A radiation boundary condition for multi-dimensional flows. *Quart. J. R. Met. Soc.* v. 110, p. 535–551, 1984.

Rudorff, N., Rudorff, C.M., Kappel, M., Ortiz, G. 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. and Remote Sensing.* v. 145, p. 349-361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.013>, 2018.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Coauthors. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *B. Am. Meteorol. Soc.* v. 91, p. 1015–1057, 2010.

Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equation. 1. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.* v. 91, p. 99–165, 1963.

SNIRH, 2017. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 28 fev. 2019.

Stokes, G.G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Mathematical and Physical Papers*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 1–10, 1901.

Warner, J.C., Sherwood, C.R., Arango, H.G., Signell, R.P. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Model.* v. 8, p. 81–113, 2005.