



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS DEPARTAMENTO
DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL**

LUDMILA FAVA ZOGHEIB

**O IMPACTO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DE
FUNDÃO (MG) NO DEPÓSITO SEDIMENTAR DA FOZ DO RIO
DOCE (ES)**

ESPÍRITO SANTO
2020

LUDMILA FAVA ZOGHEIB

**O IMPACTO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE
REJEITOS EM FUNDÃO (MG) NO DEPOSITO
SEDIMENTAR DA FOZ DO RIO DOCE (ES)**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação do Departamento de Oceanografia e Ecologia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos

VITÓRIA/ES
2020

LUDMILA FAVA ZOGHEIB

**O IMPACTO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE
REJEITOS EM FUNDÃO (MG) NO DEPOSITO
SEDIMENTAR DA FOZ DO RIO DOCE (ES)**

Dissertação/Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre/Doutor em Oceanografia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Alex Bastos – Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo/UFES

Prof. Dr. Fabian Sá
Universidade Federal do Espírito Santo/UFES

Prof. Dr. Caio Turbay
Universidade Federal do Sul da Bahia/UFSE

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Fundação de Amparo e Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) e a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior do Espírito Santo (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo, sem as quais eu não conseguiria me manter estudando e fazendo ciência.

Agradeço todo suporte oferecido por meu orientador Prof. Dr. Alex Bastos e os conselhos a mim cedidos pela Prof. Dr. Valéria Quaresma, partes fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço aos meus colegas de laboratório – LabOGeo, pela paciência e incentivo para que eu seguisse em frente.

À minha família que esteve em meu lado em todos os momentos, sempre acreditaram, apostaram e confiaram em mim, meu sincero muito obrigada e amo vocês.

Muito obrigada também aos meus amigos que não me largaram nem um minutinho, cada um com seu papel ao meu lado. Não citarei nomes porque vocês já sabem que moram no meu coração!

OBRIGADA A TODOS QUE ME AJUDARAM A CHEGAR AQUI!

“No fundo de um buraco ou de um poço, acontece descobrir-se as estrelas.”
Aristóteles

RESUMO

A plataforma continental adjacente ao Rio Doce recebeu um grande aporte de rejeito de minério de ferro em novembro de 2015, com característica mineralógica e sedimentar bem distintas da esperada para a região. Sendo assim o objetivo dessa pesquisa é investigar o efeito do aporte deste material de rejeito na granulometria do depósito sedimentar na plataforma interna adjacente à foz do Rio Doce e na dinâmica de dispersão do sedimento, comparando diferentes momentos antes e depois do evento de rompimento da barragem, tanto ao sul, quanto ao norte da foz do rio. A metodologia é desenvolvida a partir de um banco de dados de amostras de sedimento superficiais de fundo coletadas desde 2013 até 2017, investigando através de análise granulométrica e forçantes meteoceanográficas a variação temporal e espacial destes, com enfoque em sedimentos finos. Para tal, é utilizado os teores em porcentagem, mediana, máximo e mínimo das granulometrias de sedimento fino e gráficos de box-plot para a compreensão da variabilidade temporal. Maio e outubro de 2013 tem os D50 tanto para norte quanto para sul da foz na granulometria silte fino, já julho de 2013 e janeiro de 2014 o D50 é representado por silte médio no setor norte e silte fino no setor sul. Dezembro de 2015 é a campanha que representa a chegada do rejeito na foz do Rio Doce, e o D50 para norte e sul é de argila grossa e silte muito fino respectivamente. Fevereiro de 2016 tem o setor norte representado pelo D50 na granulometria silte fino e o sul com D50 calculado silte muito fino, dezembro de 2016 silte médio e silte fino na devida ordem e abril de 2017 com o D50 de ambos setores sendo silte muito fino. Os gráficos de variação temporal para teor de lama apesar de mostrarem grande variação entre as campanhas não evidencia tendência ou padrão, já os gráficos de teor de argila e D50 mostram de forma clara que a chegada do rejeito, aumentando a quantidade de argila e diminuindo o D50 dos meses estudados. O aporte de rejeito na região costeira e marinha alterou o tamanho das partículas do fundo marinho e conseqüentemente sua dinâmica sedimentar, uma vez que o comportamento de resuspensão e transporte está diretamente ligado ao tamanho da partícula. Destaca-se ainda a importância de um maior detalhamento das forçantes físicas visto que essas estão também diretamente relacionadas à dinâmica do fundo marinho. A mudança no tamanho, composição e comportamento das partículas é evidente e acarreta uma série de mudanças no ambiente, com maior tempo de

permanência na coluna d'água, maior potencial de resuspensão e disponibilidade ao ambiente afetando diretamente os habitats ali existentes.

Palavras-chave: plataforma continental, dinâmica sedimentar, argila.

ABSTRACT

The continental shelf adjacent to the Doce River received a large amount of iron ore tailings in November 2015, with a mineralogical and sedimentary characteristic very different from that expected for the region, thus affecting the behavior of the hydrological and sedimentary regime. Therefore, the objective of this research is to investigate the effect of the contribution of this tailings material on the granulometry of the sedimentary deposit on the internal platform adjacent to the mouth of the Rio Doce and on the dynamics of dispersion of the sediment, comparing different moments before and after the dam rupture event. , both to the south and north of the river mouth. The methodology is developed from a database of superficial bottom sediment samples collected from 2013 to 2017, investigating, through granulometric analysis and meteoceanographic forces, their temporal and spatial variation, focusing on fine sediments. For this, the percentages, D50, maximum and minimum levels of fine sediment granulometries and box-plot graphs are used to understand the temporal variability. May and October 2013 have the D50 both to the north and south of the mouth in fine silt granulometry, already in July 2013 and January 2014 the D50 is represented by medium silt in the northern sector and fine silt in the southern sector. December 2015 is the campaign that represents the arrival of tailings at the mouth of the Rio Doce, and the D50 to the north and south is made of thick clay and very fine silt respectively. February 2016 has the northern sector represented by the D50 in granulometry fine silt and the south with D50 calculated very fine silt, December 2016 medium silt and fine silt in due order and April 2017 with the D50 of both sectors being very fine silt. The graphs of temporal variation for mud content, despite showing great variation between campaigns, do not show a trend or pattern, whereas the graphs of clay content and D50 clearly show that the arrival of the tailings, increasing the amount of clay and decreasing the D50 of the months studied. The ore input in the coastal and marine region changed the size of the seabed particles and, consequently, their sedimentary dynamics, since the resuspension and transport behavior is directly linked to the particle size. The importance of further detailing the physical forces is also highlighted, as these are also directly related to the dynamics of the seabed. The change in the size, composition and behavior of the particles is evident and leads to a series of changes in the environment, with longer residence in the water column, greater resuspension potential and availability to the environment, directly affecting the habitats there.

Keywords: continental shelf, sedimentary dynamics, clay.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições de fluxo do Rio Doce adaptado de Oliveira e Quaresma (2017).	17
Tabela 2: Pontos por campanha e resultado de granulometria em porcentagem .	20
Tabela 3: Resultado por campanha, dividido em setor, para forçantes físicas, teor de lama e D50.	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Caracterização da área de estudos.....	16
Figura 2: Mapa de pontos com todas as campanhas utilizadas neste estudo.....	19
Figura 3: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de abril/13, 30 dias antes da coleta de Maio/13.	24
Figura 4: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Maio/13.	25
Figura 5: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Maio/13, com o referentes valores de teores de areia e lama. D50 em micrômetros.	26
Figura 6: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Julho/13.	27
Figura 7: Variação temporal da direção e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Julho/13.	27
Figura 8: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Julho/13, com o referentes valores de teores de areia e lama.	28
Figura 9: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Outubro/13.	29
Figura 10: Variação temporal da direção e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Outubro/13.	29
Figura 11: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Outubro/13, com o referentes valores de teores de areia e lama.	30
Figura 12: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Janeiro/14.	31
Figura 13: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Janeiro/14.	31

Figura 14: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Janeiro/14, com o referentes valores de teores de areia e lama.	32
Figura 15: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/15.	33
Figura 16: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/15.	33
Figura 17: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Dezembro/15, com o referentes valores de teores de areia e lama.	34
Figura 18: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Fevereiro/16.	35
Figura 19: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Fevereiro/16.	35
Figura 20: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Fevereiro/16, com o referentes valores de teores de areia e lama.	36
Figura 21: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/16.	37
Figura 22: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/16.	37
Figura 23: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Dezembro/16, com o referentes valores de teores de areia e lama.	38
Figura 24: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Abril/17.	39
Figura 25: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Abril/17.	39
Figura 26: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Abril/17, com o referentes valores de teores de areia e lama.	40
Figura 27: Box Plot da distribuição do teor de lama de todas as amostras coletadas em cada campanha.	41
Figura 28: Box Plot da distribuição do teor de argila de todas as amostras coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem.	42

Figura 29: Box Plot da distribuição do teor de argila de nas amostras do setor sul coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem.	43
Figura 30: Box Plot da distribuição do teor de argila de nas amostras do setor norte coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem.	43
Figura 31: Box Plot da distribuição do conjunto de D50 de todas as amostras coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal do D50, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem, marcado pela campanha de dez/15.....	44
Figura 32:Box Plot da distribuição do conjunto de D50 das amostras coletadas no setor ao sul da foz do Rio Doce, em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal do D50, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem, marcado pela campanha de dez/15.....	45
Figura 33: Box Plot da distribuição do conjunto de D50 das amostras coletadas no setor ao norte da foz do Rio Doce, em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal do D50, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem, marcado pela campanha de dez/15.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 ÁREA DE ESTUDO	15
3 METODOLOGIA.....	18
3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	18
3.2 HIDROLOGIA E METEO-OCEANOGRAFIA.....	22
4 RESULTADOS	22
4.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DAS FORÇANTES FÍSICAS E ESPACIAL DA GRANULOMETRIA.....	23
4.2 VARIABILIDADE TEMPORAL DE SEDIMENTO FINO.....	40
6 DISCUSSÃO	46
7 CONCLUSÃO.....	49
8 REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

Considerado o maior desastre ambiental do Brasil, e o maior com barragem de rejeitos do mundo, no dia 05 de novembro de 2015 houve o rompimento da barragem de rejeitos de exploração de minério de ferro em Fundão (MG) e parte da de Santarém, ambas pertencentes à Samarco, grupo controlado pelas empresas BHP Billiton Brasil LTDA e Vale S.A, despejando aproximadamente 39 milhões de m³/s de material lamoso. Esse rejeito se espalhou pelas cidades e distritos próximos sendo responsável pelo desaparecimento de 19 pessoas, no qual um total de 10,5 milhões de m³ de rejeitos (de acordo com a própria Samarco) se diluiu no Rio Doce onde percorreu e se espalhou por aproximadamente 680 km até chegar na foz em Regência, Linhares (ES) no dia 21 de novembro de 2015. (IBAMA, 2015 ; SAMARCO, 2016)

A chegada do material na foz trouxe um grande aporte de sedimentos com características mineralógicas e quimicamente diferentes das comumente encontradas para a região com grandes quantidades de minerais e metais pesados, grãos mais finos e cores alaranjadas (BASTOS et al., 2017). De acordo com Santos e Brandao (2003), a mineração de Itabirito (quartzo e hematita de granulometria fina) que gerava o rejeito das barragens danificadas, contém extensiva presença de goetita intragranular e intergranular (óxido de ferro hidratado) apresentando uma grande quantidade de material poroso fino.

Um aporte de origem antrópica destas proporções na bacia hidrográfica impacta diretamente o comportamento sedimentar por todo o trajeto percorrido e conseqüentemente o regime hidrográfico e sedimentar na foz como discutido por muitos autores (Oliveira e Quaresma, 2017; Yang et al., 2005; Syvitski, 2003). Sabe-se assim que muitas mudanças foram impostas nos sistemas ligados ao Rio Doce. Grilo et al. (2018), por exemplo, descreve mudanças nos padrões de floculação de sedimentos e conseqüentemente no comportamento deles, concluindo que entre as amostras estudadas, a de rejeito tem partículas com menor velocidade de decantação e parte desse sedimento não decanta, aumentando o tempo de permanência na coluna d'água tornando-os mais propensos a dispersão por corrente e ondas.

Relatórios gerados pela UFES para as instituições ICMBio e Fundação Renova demonstram que nos primeiros dias após a chegada da lama na plataforma continental (PC) o número de material particulado em suspensão (MPS) atingiu suas maiores concentrações, em torno de 9000 mg/L e apontam para formação de um fluxo de alta concentração. Destaca-se ainda uma taxa de acúmulo de rejeito na área, que chega a 5cm em uma semana. Este aporte é ainda caracterizado por uma alta ocorrência de argila junto ao MPS (BASTOS et al., 2017), o que não é naturalmente típico de aporte fluvial cujo é caracterizado pela predominância de partículas na fração silte (NITTROUER et al., 2007b).

A partir das observações feitas acima, fica caracterizado que o aporte de rejeito oriundo do rompimento da barragem criou um evento sedimentar distinto do processo natural de aporte do rio Doce, considerando a concentração de MPS e o tamanho das partículas sedimentares. Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa é investigar o efeito do aporte deste material de rejeito na granulometria do depósito sedimentar na plataforma interna adjacente à foz do Rio Doce e na dinâmica de dispersão do sedimento. Esta análise foi desenvolvida a partir da comparação de diferentes momentos de coleta antes e depois do evento de rompimento da barragem, tanto ao sul, quanto ao norte da foz do rio.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área estudada localiza-se na plataforma interna adjacente à foz do Rio Doce, em Regência- Linhares/Espírito Santo, abrangendo os limites nas coordenadas UTM 392535/7803603 e 444791/7848507 (24S) e entre as cotas batimétricas de 10 e 30 metros (Fig. 1).

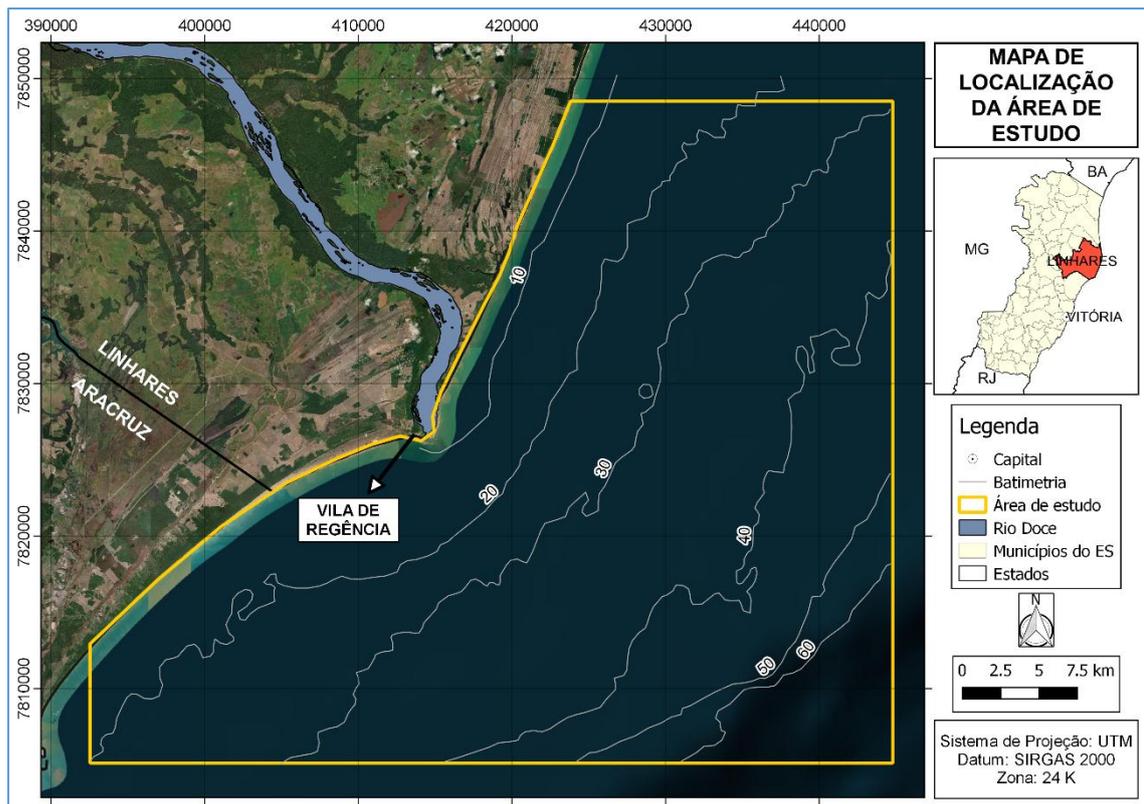


Figura 1: Caracterização da área de estudos

De acordo com Dominguez (2009) sob um aspecto que aborda variáveis como taxa de variação do nível do mar, fluxo disponível para o transporte do sedimento, taxa de suprimento, tamanho dos grãos e histórico geológico, a costa leste brasileira apresenta quatro exemplos clássicos de deltas dominados por onda: Paraíba do Sul, Doce, Jequitinhonha e São Francisco.

Os deltas da costa leste brasileira são resultantes da combinação de grandes bacias de drenagem com altos relevos intrabasinais, que acabam por gerar grandes quantidades de sedimento que os rios carregam em seu curso e, em geral, estas bacias são o principal vetor de suprimento sedimentar na costa leste brasileira, formando planícies deltaicas intercaladas por costas famintas de sedimentos marcadas por tabuleiros e falésias da Formação Barreiras (DOMINGUEZ, 2009).

A plataforma adjacente ao Rio Doce tem aproximadamente 50Km de largura, com a quebra do talude em torno de 60m de profundidade. É caracterizada por uma morfologia regular mostrando um lobo que representa um depósito deltaico regressivo, da desembocadura do rio em direção offshore, onde o fundo torna-se

mais plano com predomínio de fundo de rodolitos em águas mais profundas que 40m (BASTOS et al., 2015).

De maneira geral é de clima quente com chuvas no verão e inverno seco de acordo com a classificação climática de Köppen Geiger. De acordo com Oliveira e Quaresma (2017), essa variabilidade do volume de chuva nas escalas mensais e sazonais, principalmente nas estações chuvosas, entre outubro e março, estão fortemente relacionadas com a carga de sedimentos do Rio Doce e o consequente suprimento de sedimentos para o oceano que pode variar de 10×10^6 tons à 133×10^6 tons por estação.

Os ventos predominantes na região são associados ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) com direções de norte, nordeste e leste. Sistemas Transientes (ST) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) são responsáveis por mudanças na meteorologia trazendo ventos no quadrante sul (CAVALCANTI et al., 2009). Segundo Oliveira e Quaresma et al. (2018) é esperada uma assinatura diferente nos processos oceanográficos e sedimentares nos diferentes setores da costa adjacente a desembocadura do Rio Doce para os diferentes sistemas de circulação atmosférica.

A vazão do Rio Doce aumenta gradativamente com o avanço na bacia hidrográfica em direção jusante. Uma série de dados de vazão entre 1990 e 2012 foi estudada por Oliveira e Quaresma (2017) e o comportamento das condições de fluxo foram estabelecidas e aqui compiladas pelo quadro abaixo (Tab. 1). Os eventos de extrema seca e cheia considerados por vazões menores que $231 \text{ m}^3/\text{s}$ e maiores que $2379 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

m^3/s	baixo fluxo	condições de seca	condições normais	condições úmidas	alto fluxo
mínimo	231,0	276,4	459,4	646	1742,1
máximo	276,3	459,3	645,9	1742	2379,0

Tabela 1: Condições de fluxo do Rio Doce adaptado de Oliveira e Quaresma (2017).

De acordo com Bastos et al. (2015) a composição dos sedimentos varia de areia e lama terrígena e mista ao longo da costa, para cascalhos bioclásticos e rodolitos na plataforma média e externa, sendo a entrada de lamas fluviais modernas restrita até a isóbata de 30m. A plataforma interna, domínio terrígeno, é caracterizado por três fácies: lama terrígena que estende-se da linha de costa até

30m de profundidade, formando o prodelta e também para norte ao longo da costa; e fácies areia fina terrígena e areia grossa terrígena que são observadas tanto ao longo da costa quanto do prodelta em direção offshore (VIEIRA et al. 2019).

Quaresma et al. (2015) revela que os sedimentos fluviais finos são depositados imediatamente ao sul da foz do rio influenciados pela hidrodinâmica local – prevalência de ventos NE - em profundidade em torno de 10 a 15m, formando um depósito com mais de 12% de argila. As areias fluviais modernas são depositadas perto da desembocadura, podendo considerar as frações arenosas encontradas na plataforma média e externa como relictas, já que a carga de sedimento em suspensão que é transportada e depositada na plataforma durante os eventos de tempestade é composta essencialmente de frações finas.

Quanto ao sedimento superficial de fundo e a interpretação da dinâmica sedimentar local, de forma geral entende-se que o aporte de sedimento fino do Rio Doce tende a se depositar ao sul da foz, formando um depocentro mais lamoso. Esse sedimento fino, em função dos padrões meteoceanográficos, é resuspendido e transportado em direção norte (QUARESMA et al., 2015). Bastos et al. (2015) e Vieira et al. (2019) mostram a distribuição de lamas terrígenas junto à costa em direção norte, o que corrobora o transporte de material fino nessa direção, em uma escala temporal de médio e longo prazo.

3 METODOLOGIA

3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica foi feita a partir de um banco de amostras de sedimento superficiais de fundo coletadas desde 2013 até 2017. Os conjuntos de amostras foram separados por período de coleta, refletindo assim séries temporais que caracterizam os momentos pré e pós rompimento da barragem de rejeitos de mineração de ferro, e um conjunto que representa a semana de chegada do material na foz do Rio Doce (Fig. 2).

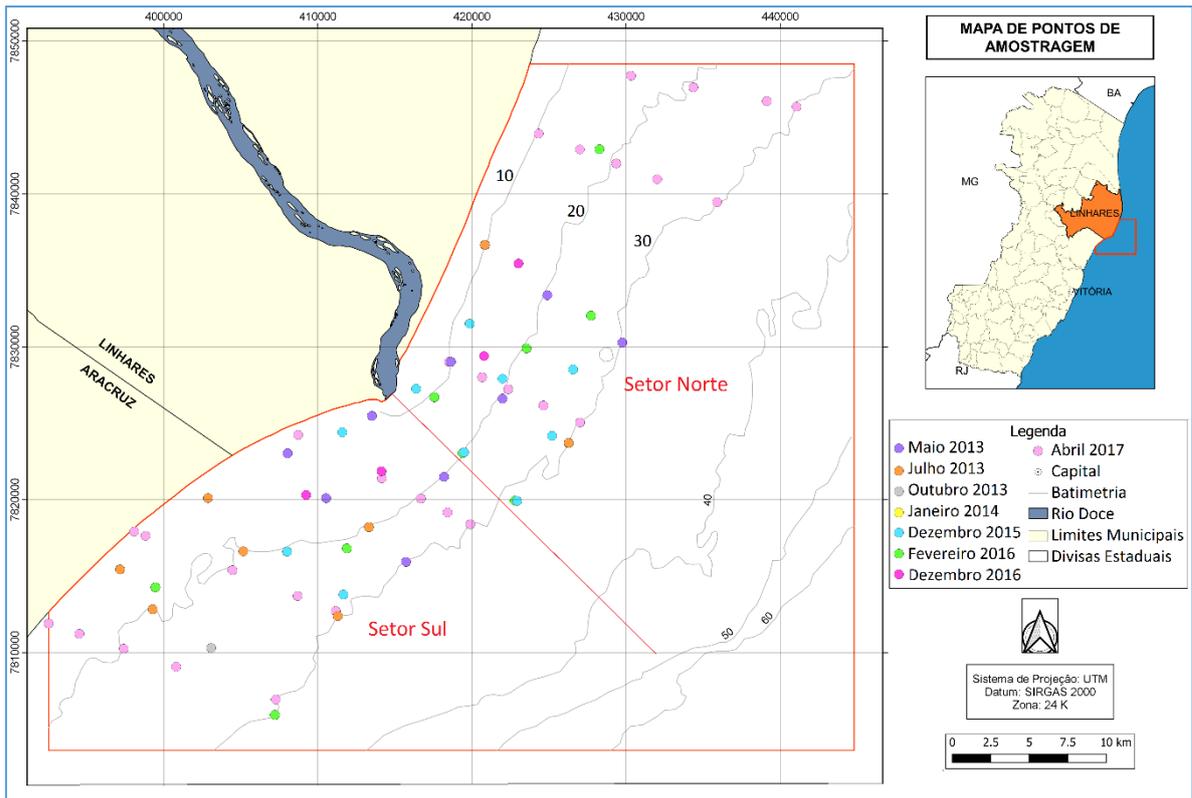


Figura 2: Mapa de pontos amostrais com todas as campanhas utilizadas neste estudo.

As campanhas pré rompimento aconteceram nos meses de Maio, Julho e Outubro de 2013 e Janeiro de 2014 e contam com 54 pontos amostrais. As campanhas pós rompimento são de Fevereiro e Dezembro de 2016, e Abril de 2017, além das amostras coletadas entre 27 de Novembro e 3 de Dezembro de 2015, que representam o momento da chegada do rejeito, contabilizando um total de 61 pontos amostrais (Tab. 2).

	Ponto	Leste	Norte	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	D50		Ponto	Leste	Norte	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	D50
mai/13	RD09	410534	7820103	1,0	79,3	19,7	11,7	dez/15	DOCE01	416371	7827253	92,9	6,3	0,9	21,5
	RD11	415718	7815931	8,3	75,8	16,0	12,4		DOCE02	419480	7823104	9,1	60,5	30,4	6,2
	RD14	413505	7825477	2,6	61,9	35,5	6,1		DOCE03	422924	7819926	62,2	27,4	9,4	8,1
	RD15	418183	7821494	26,4	51,6	22,0	7,6		DOCE08	426557	7828517	60,9	28,0	8,1	9,7
	RD19	418626	7829017	13,0	53,8	33,2	5,8		DOCE09	425192	7824179	36,4	50,4	12,9	11,2
	RD20	421976	7826615	46,4	41,5	12,1	10,6		DOCE17	419853	7831515	8,3	73,0	18,8	13,8
	RD25	424884	7833379	48,1	38,7	13,3	9,4		DOCE18	411583	7824412	4,8	71,3	23,8	9,5
	RD26	429752	7830282	51,3	36,1	12,6	8,6		DOCE19	421971	7827914	41,4	13,6	44,2	1,5
	RD31	408034	7823034	2,5	68,1	29,4	8,5		DOCE21	411655	7813791	4,5	24,7	70,9	1,8
jul/13	RD01	399281	7812833	12,5	66,7	20,9	10,1	DOCE22	408006	7816609	5,4	22,0	72,6	1,5	
	RD05	405160	7816626	4,8	73,7	21,5	10,7	dez/16	SD1	417559	7826708	65,1	4,6	30,2	0,9
	RD06	411292	7812391	33,0	45,2	21,8	7,0		SD2	419393	7823040	7,0	59,9	32,7	6,5
	RD09	410534	7820103	4,0	66,1	29,8	7,9		SD3	422769	7819938	94,6	0,3	0,1	9,2
	RD10	413315	7818207	11,4	71,4	17,2	13,1		SDN13	428269	7842924	14,8	71,6	13,6	22,9
	RD11	415718	7815931	30,3	48,6	21,0	7,8		SDN20	423533	7829898	57,4	30,0	12,3	10,1
	RD14	413505	7825477	40,9	47,1	12,0	13,1		SDN30	427722	7832036	18,3	57,7	23,6	9,4
	RD15	418183	7821494	37,4	48,9	13,7	11,6		SDS13	399459	7814269	22,4	51,2	26,2	7,2
	RD19	418626	7829017	53,4	38,9	7,7	16,0		SDS20	411879	7816813	1,5	71,3	27,0	11,5
	RD20	421976	7826615	20,4	67,0	12,6	15,7		SDS30	407209	7805922	67,5	17,5	11,5	5,4
	RD21	426275	7823707	80,3	16,0	3,7	12,6		Ponto	Leste	Norte	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	D50
	RD24	420838	7836667	25,4	62,5	12,1	16,9		DRPS1-13,5	409210	7820272	0,2	76,6	23,2	11,1
	RD25	424884	7833379	16,9	61,7	21,4	9,6		DR2-15	420784	7829399	11,6	69,2	19,2	13,4
RD29	397166	7815441	5,3	69,6	25,0	9,6	DR3-15		414127	7821863	6,3	75,7	18,0	16,3	
RD30	402873	7820106	2,0	83,5	14,5	16,0	DRPN1-13,5	423013	7835449	21,3	36,6	17,9	6,1		
RD31	408034	7823034	3,8	74,2	22,0	9,5	DSD1	417559	7826708	73,4	21,5	5,1	18,1		
out/13	RD02	403074	7810304	6,2	72,8	21,1	10,9	DSD2	419393	7823040	12,5	70,1	17,4	14,7	
	RD05	405160	7816626	5,9	74,1	20,0	11,0	DSD3	422769	7819938	36,2	47,4	16,2	9,2	
	RD06	411292	7812391	76,8	17,5	5,7	10,0	DSDN13	428269	7842924	3,1	78,8	18,1	16,5	
	RD09	410534	7820103	91,0	7,3	1,7	12,5	DSDN20	423533	7829898	34,9	54,0	11,1	18,0	
	RD10	413315	7818207	11,6	68,2	20,2	10,5	DSDN30	427722	7832036	29,8	58,3	11,9	18,1	
	RD15	418183	7821494	33,7	48,8	17,5	9,0	DSDS13	399459	7814269	81,4	13,1	5,0	8,2	
	RD16	421344	7818965	66,0	27,9	6,2	15,1	DSDS20	411879	7816813	0,9	77,2	21,8	13,2	
	RD19	418626	7829017	19,5	66,4	14,1	13,3	DSDS30	407209	7805922	84,3	8,3	4,0	6,5	
	RD20	421976	7826615	89,1	8,8	2,1	13,2	Ponto	Leste	Norte	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	D50	
	RD21	426275	7823707	27,9	62,8	9,3	19,5	SCRD 510	392535	7811900	99,8	0,1	0,1	5,7	
	RD24	420838	7836667	17,5	65,7	16,8	12,2	SCRD 511	394525	7811229	39,8	40,6	17,2	7,5	
	RD25	424884	7833379	90,6	7,8	1,6	14,2	SCRD 512	397403	7810258	99,4	0,4	0,2	6,9	
	RD29	397166	7815441	6,3	77,8	15,8	13,8	SCRD 513	400806	7809071	71,0	18,5	7,9	7,7	
RD30	402873	7820106	1,1	77,9	21,0	10,2	SCRD 514	407267	7806932	99,0	0,4	0,4	4,9		
RD31	408034	7823034	1,7	82,8	15,5	16,5	SCRD 519	398080	7817917	99,9	0,0	0,0	15,6		
jan/14	RD01	399281	7812833	41,3	45,9	12,8	11,1	SCRD 520	398817	7817642	98,4	0,1	0,0	7,9	
	RD05	405160	7816626	5,3	81,9	12,8	17,8	SCRD 521	404464	7815389	12,4	66,8	15,3	11,0	
	RD06	411292	7812391	43,8	40,8	15,5	8,3	SCRD 522	408685	7813704	4,0	61,9	21,2	12,4	
	RD09	410534	7820103	0,4	73,2	26,4	8,6	SCRD 523	411158	7812718	12,9	56,9	24,2	8,2	
	RD10	413315	7818207	12,4	77,0	10,6	19,7	SCRD 528	408715	7824239	2,2	71,9	21,4	12,5	
	RD14	413505	7825477	78,4	18,9	2,7	26,8	SCRD 529	414151	7821397	4,9	70,4	14,8	17,6	
	RD15	418183	7821494	84,1	13,4	2,5	15,9	SCRD 530	416685	7820072	14,4	55,2	16,2	13,0	
	RD19	418626	7829017	68,9	27,0	4,1	18,7	SCRD 531	418416	7819167	7,6	64,4	19,9	12,4	
	RD21	426275	7823707	78,7	16,4	4,8	10,5	SCRD 532	419894	7818394	27,7	49,2	18,1	10,6	
	RD24	420838	7836667	43,1	48,5	8,4	18,1	SCRD 537	418516	7829015	70,4	14,5	2,6	22,6	
	RD25	424884	7833379	21,7	65,2	13,1	13,4	SCRD 538	420665	7828012	70,7	15,4	4,7	13,0	
	RD26	429752	7830282	93,3	5,6	1,1	16,0	SCRD 539	422352	7827226	32,3	44,6	14,5	11,3	
	RD30	402873	7820106	1,5	78,5	19,9	12,9	SCRD 540	424634	7826161	76,5	3,2	1,5	8,4	
RD31	408034	7823034	4,1	76,1	19,8	10,1	SCRD 541	427010	7825053	99,0	0,4	0,2	6,7		
abr/17								SCRD 555	424322	7843942	4,9	69,8	14,9	17,3	
								SCRD 556	426998	7842907	11,1	63,3	13,2	18,5	
								SCRD 557	429360	7841993	25,9	50,2	12,6	17,3	
								SCRD 558	432014	7840966	19,8	54,6	13,6	17,0	
								SCRD 559	435900	7839462	68,1	22,2	7,6	12,0	
								SCRD 565	430313	7847737	55,3	13,7	2,4	27,0	
								SCRD 566	434354	7846973	19,6	48,9	12,1	18,0	
								SCRD 567	439124	7846071	6,2	67,6	16,4	18,1	
								SCRD 568	441064	7845705	12,3	60,7	16,7	13,9	

Tabela 2: Pontos por campanha e resultado de granulometria em porcentagem

A base da análise desenvolvida neste trabalho foi desenvolvida segundo os resultados de Grilo et al. (2018). Esses autores descrevem que o sedimento da barragem de rejeitos tem uma grande abundância de partículas na fração silte, mais de 73%, sendo que as amostras na plataforma continental antes e depois do rompimento apontam para um aumento na abundância de partículas finas, principalmente em argilas finas e muito finas. Este resultado é baseado em estudos de decantação de partículas em laboratório e refletem uma caracterização do padrão comparativo de decantação do rejeito de minério, de amostras ao longo do Rio Doce e de amostras da plataforma, antes e depois do rompimento da barragem.

Desta maneira, a análise desenvolvida neste trabalho, para alcançar os objetivos definidos, é baseada na variabilidade temporal e espacial do D50 (mediana) de cada amostra, calculado apenas para as frações silte e argila, além dos valores mínimos e máximos. Segundo Muehe (1994), a mediana é o parâmetro que melhor caracteriza, dentre as outras medidas de tendência central, os depósitos sedimentares, e por isso será o parâmetro aqui utilizado para caracterização dos sedimentos lamosos ($< 63 \mu\text{m}$). O D50 é usado para distribuições distorcidas onde as amostras não apresentam uma variação regular, tanto espacial quanto temporal, trazendo assim uma melhor ideia de valor típico principalmente com a presença de *outliers*.

A análise sedimentológica foi realizada inicialmente a partir do processamento via úmido para separar as frações lamosas ($< 63\mu\text{m}$) e arenosas. A distribuição granulométrica da fração fina, objeto do estudo, foi obtida a partir da leitura em granulômetro à laser (Malvern Mastersizer 2000), em intervalos de 1Φ em 1Φ , baseado na escala de tamanho proposta por Wentworth (1922). Antes da leitura no granulômetro a laser, o sedimento foi lavado e tratado com Peróxido de Hidrogênio para queima de matéria orgânica, evitando o processo de floculação e agregação de partículas. A amostra lida no granulômetro é tratada por via úmida e o volume usado na análise não passa de 1 a 2 ml. O resultado do granulômetro é dado pela distribuição granulométrica das partículas.

Análises descritivas estatísticas da distribuição granulométrica foram realizadas utilizando o Gradistat V.8 que é uma extensão livre do software Microsoft Excel. Para representar a variabilidade temporal do sedimento fino nas estações

adjacentes à foz do Rio Doce, o D50 (mediana) dos sedimentos lamosos determinados para cada estação foi agrupado por campanha e por setor (norte e sul), e apresentado em gráficos no modelo box plot, assim como os teores de argila. Para avaliar a variabilidade espaço-temporal, ou seja, o comportamento distinto da dinâmica sedimentar, o D50 e o teor de argila das amostras foram agrupados para as estações ao norte e ao sul da foz do Rio Doce, seguindo a divisão proposta por Quaresma et al. (2015) e também discutida por Oliveira e Quaresma (2018).

3.2 HIDROLOGIA E METEO-OCEANOGRRAFIA

Visando caracterizar as forçantes hidrológicas e meteoceanográficas para cada período de coleta de sedimento, foram usadas base de dados existentes de vazão fluvial e ventos na costa.

Para a caracterização hidrológica foram usados os dados de vazão da estação fluviométrica 56994500, localizada no município de Colatina/ES a aproximadamente 100km da foz do RD, disponibilizadas no banco de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Para caracterizar o período de coleta, foram analisados os 30 dias anteriores à campanha, cujo gráficos estão apresentados junto aos resultados.

A caracterização das condições da forçante vento foram obtidas através do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), usando o ponto de LATITUDE: -19,72742 e LONGITUDE: -39,8864. Os dados foram tratados no software MATLAB para geração das séries temporais de magnitude e direção e apresentados junto aos resultados com notação oceanográfica.

4 RESULTADOS

Os resultados serão inicialmente apresentados por campanha de coleta, caracterizando os regimes hidrológicos, meteoceanográficos e a distribuição de sedimento na plataforma interna adjacente à foz do Rio Doce (Tab. 3).

	vazão			vento					
	m ³ /s			magnitude m/s			direção		
	mediana	mínimo	máximo	mediana	mínimo	máximo	mediana	mínimo	máximo
mai/13	732	456	1426	4	1	10	179	9	358
jul/13	420	350	620	3	1	9	167	2	349
out/13	231	199	281	5	0	10	86	1	359
jan/14	3168	784	10716	5	1	11	67	0	359
dez/15	345	260	771	5	1	10	66	1	359
fev/16	718	436	3531	4	0	8	70	1	359
dez/16	875	599	2550	5	0	10	115	0	359
abr/17	280	251	453	4	0	11	174	9	356

	teor de lama						D50					
	norte			sul			norte			sul		
	mediana	mínimo	máximo	mediana	mínimo	máximo	mediana	mínimo	máximo	mediana	mínimo	máximo
mai/13	53	49	87	97	74	99	9	6	11	8	6	12
jul/13	75	20	83	89	59	98	16	10	19	10	7	16
out/13	72	11	83	94	9	99	14	12	20	11	9	17
jan/14	31	7	78	88	16	100	16	10	19	13	8	27
dez/15	58	7	92	95	37	96	2	1	21	4	1	9
fev/16	64	0	94	60	2	99	12	1	28	7	5	17
dez/16	79	27	97	95	12	100	17	6	18	10	7	16
abr/17	59	1	85	67	0	93	6	3	7	7	6	8

Tabela 3: Resultado por campanha, dividido em setor, para forçantes físicas, teor de lama e D50.

4.1 VARIAÇÃO TEMPORAL DAS FORÇANTES FÍSICAS E ESPACIAL DA GRANULOMETRIA

Maio 2013

Quando se observa a vazão do Rio Doce, a campanha de maio de 2013 apresenta seus trinta dias anteriores caracterizados por uma vazão com mediana de 732 m³/s e valores máximo e mínimo de 1426 m³/s e 456 m³/s, respectivamente (Fig.3). Os ventos predominantes e a mediana do período foram de sul, atingindo sua intensidade máxima em 10 m/s, enquanto a mediana é de 4m/s. Pequenos intervalos de ventos de baixa magnitude no quadrante norte/nordeste foram observados com valores em torno de 1 m/s (fig.4).

Ao analisar as amostras deste mês, observa-se que o teor de lama ao sul da foz do RD variava de 74% a 99%, com mediana de 97%, enquanto ao norte os teores aparecem mais baixos, entre 49% e 87% e mediana de 53% de lama. A granulometria para sedimentos finos mostrou a presença de amostras com D50 desde 5,83 µm - silte muito fino (RD19), até a fração silte fino, com o máximo de 12,43 µm (RD11). O cálculo do D50 para o conteúdo lamoso das amostras ao sul e à norte da desembocadura do rio resultam, respectivamente em um valor máximo de 12 µm (RD11) e 11 µm (RD20), e as medianas dos D50 para cada setor também

na fração silte fino, 8 μm e 9 μm na devida ordem. Evidencia-se também que as amostras com menores granulometrias são as dos pontos mais próximos à foz (fig. 5).

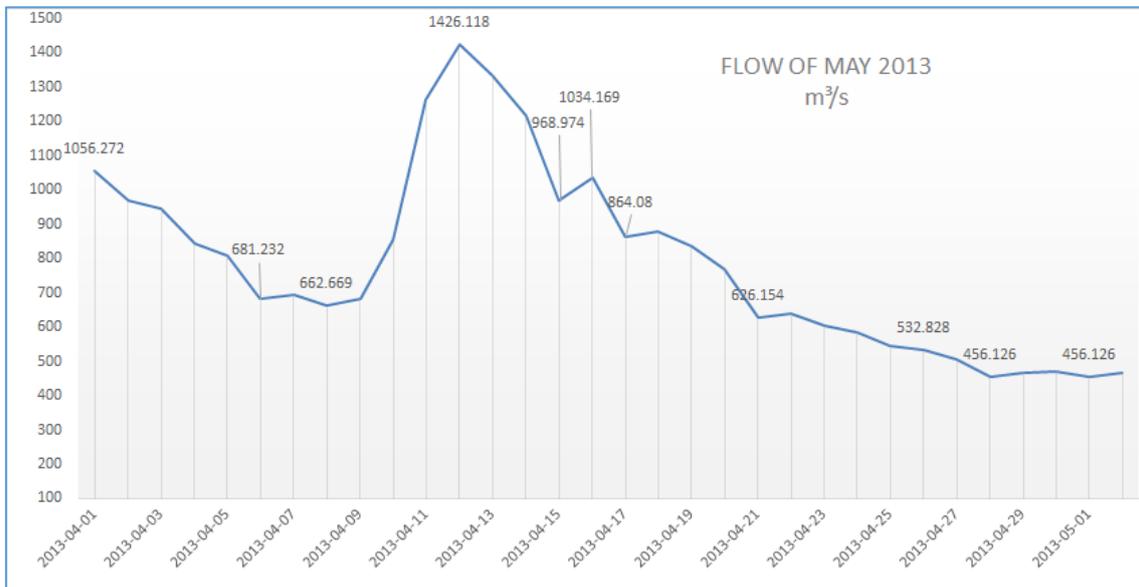


Figura 3: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de abril/13, 30 dias antes da coleta de Maio/13.

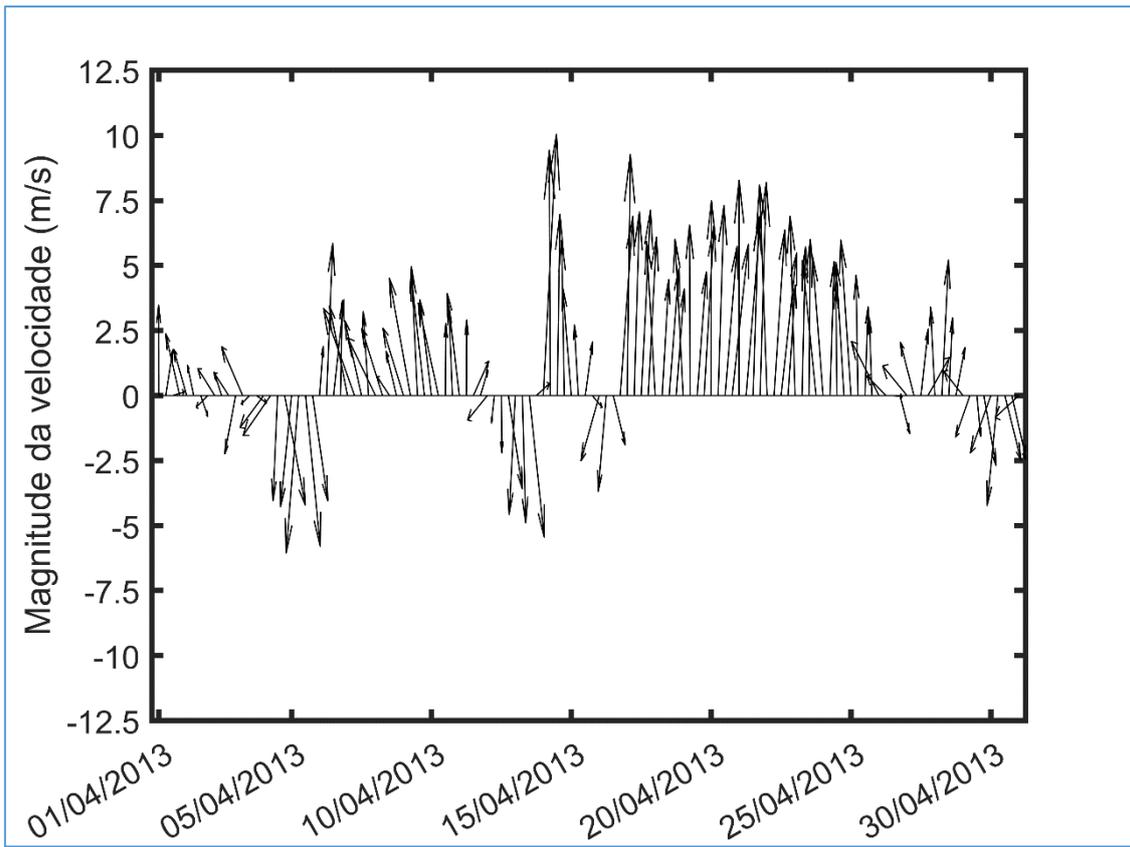


Figura 4: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Maio/13.

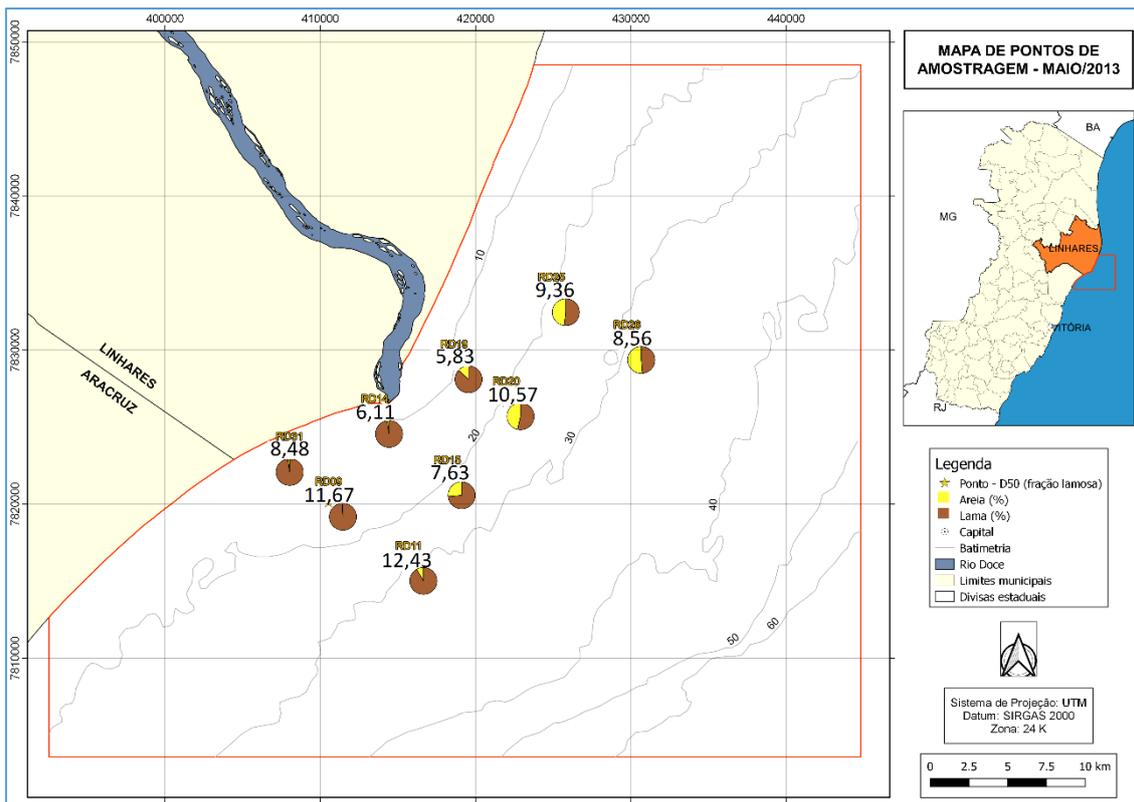


Figura 5: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Maio/13, com o referentes valores de teores de areia e lama. D50 em micrômetros.

Julho 2013

As coletas de julho de 2013 são caracterizadas por vazão mediana de 420 m³/s com máximo de 620 m³/s e mínimo de 350 m³/s (fig. 6). Para as condições de vento a mediana das direções é no quadrante que indica entrada de frentes de vento S/SE, com a maior velocidade sendo 9 m/s. Os ventos de menores intensidades, com magnitude perto de 1 m/s são vindos de norte/nordeste, enquanto a mediana das magnitudes é de 4m/s (fig.7).

O teor de lama dos pontos desta campanha no setor sul dá área apresenta uma mediana de 89%, e no setor norte de 75%. São encontrados teores de lama acima de 20% no setor sul e de 59% de no setor norte. O valor mínimo entre o D50 de sedimentos finos das amostras do sul é 7 µm (RD06), silte muito fino e o máximo D50 entre elas é de 16 µm - fração silte médio, com a mediana das medianas de 10 µm na fração silte fino. Quando observados nesta mesma coleta as amostras à norte da desembocadura do RD, o menor e maior D50 dos sedimentos lamosos respectivamente, são 10 µm (RD25) e 17 µm – silte médio (RD24), sendo a mediana entre os pontos 16 µm – silte médio (fig. 8).

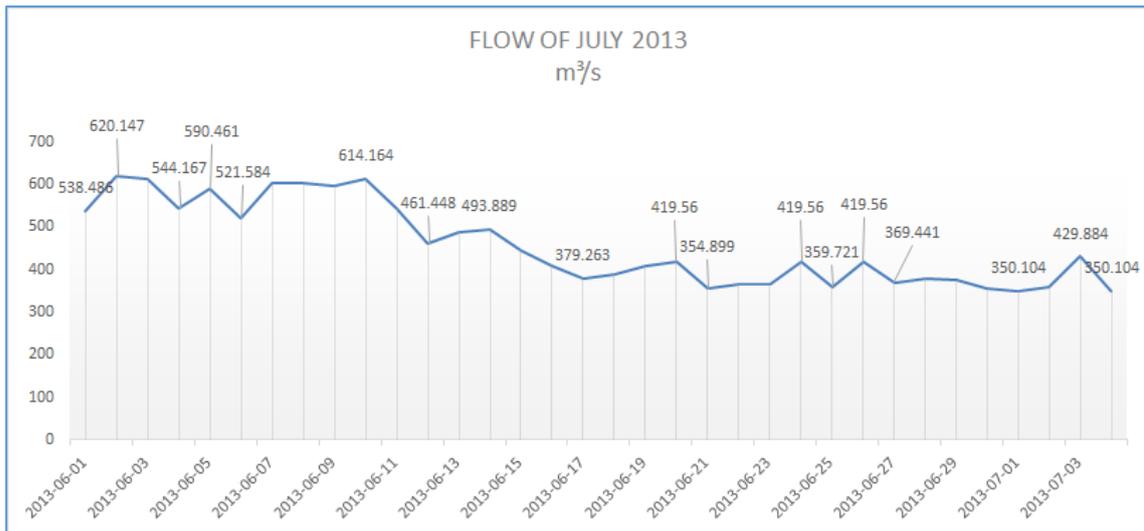


Figura 6:Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Julho/13.

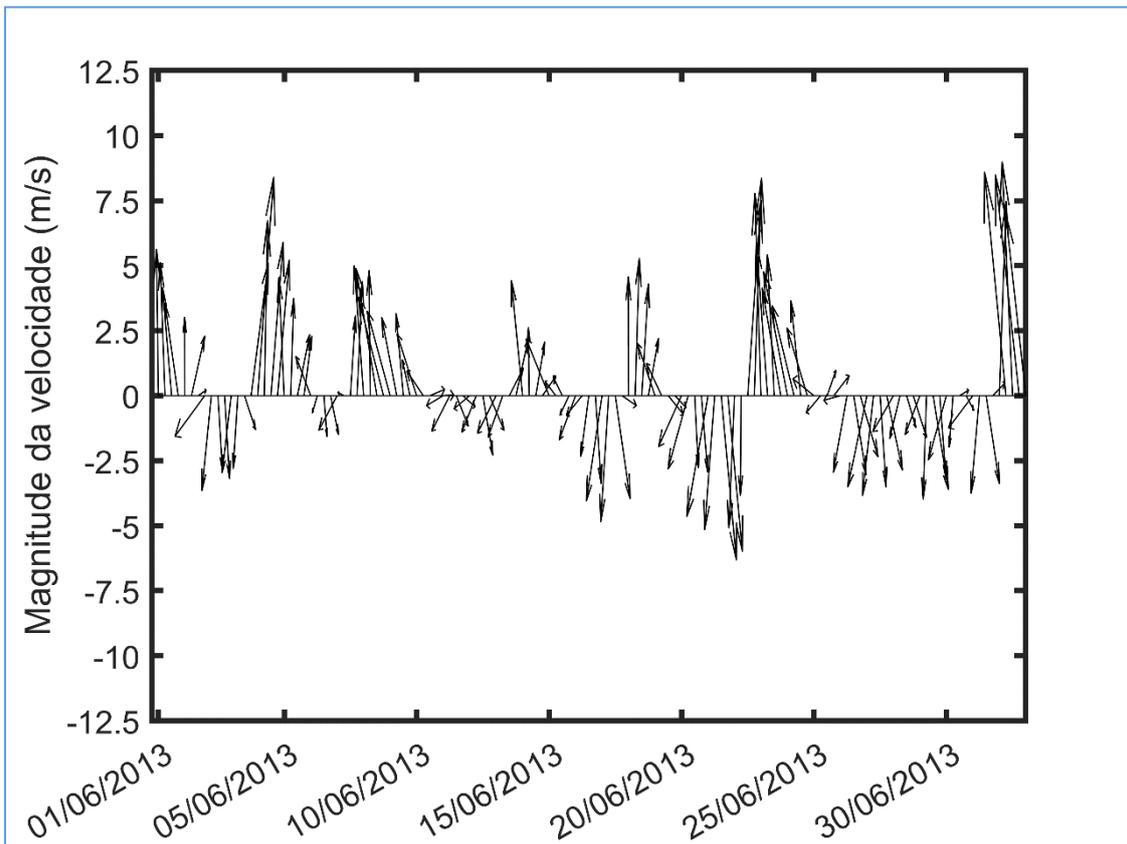


Figura 7:Variação temporal da direção e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Julho/13.

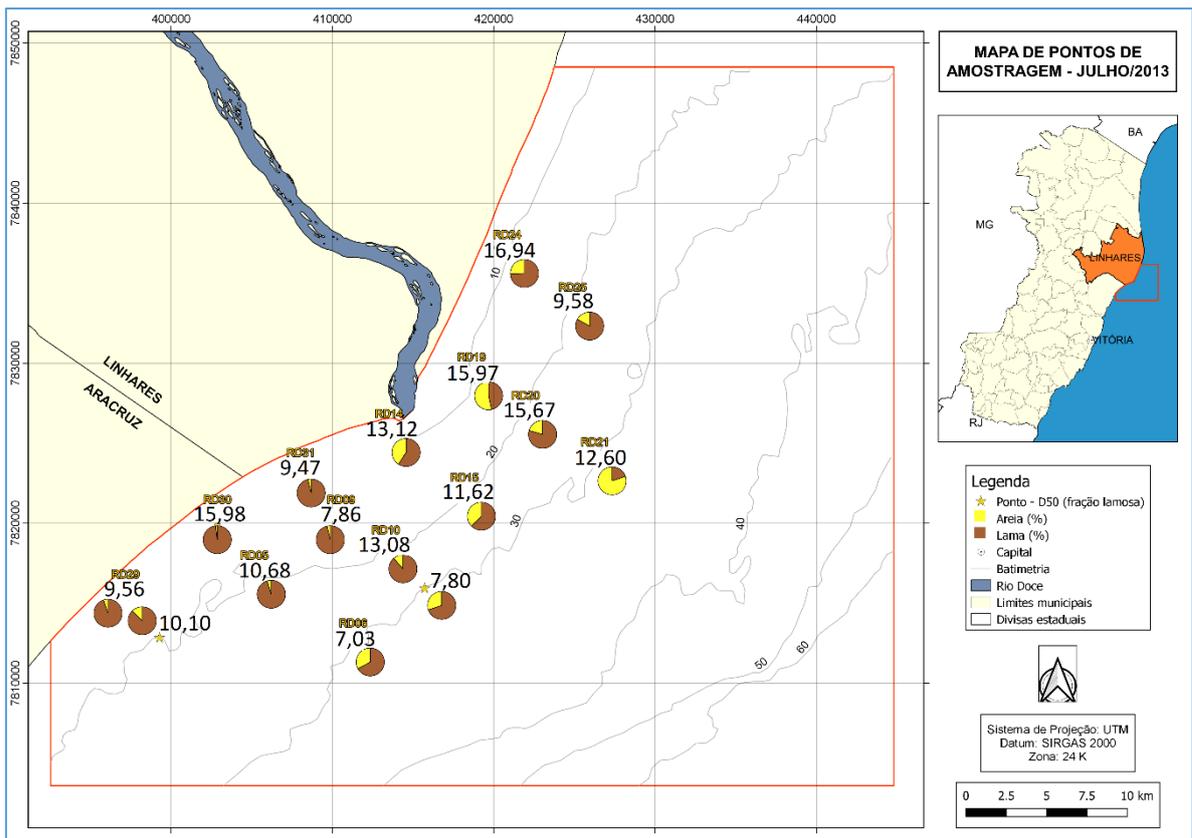


Figura 8: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Julho/13, com o referentes valores de teores de areia e lama.

Outubro de 2013

Em outubro de 2013 as condições de vazão apresentaram uma mediana de 231 m³/s, com pequena variação entre as vazões mínima e máxima, de 199 m³/s a 281 m³/s (Fig. 9). Os ventos pré-coleta mostraram dois períodos de vento sul entre os ventos nordeste, com a mediana das direções no quadrante NE/N e magnitude mediana de 5 m/s. As menores magnitudes são as de vento N/NE com mínimo próximo de 0, e a máxima foi de 10 m/s em vento vindo do quadrante S/SE (Fig. 10).

Esse período amostral apresenta o teor de sedimentos lamosos com os máximo e mínimo no setor sul, sendo 9% (RD09) e 99% (RD30) e mediana entre eles de 94%, e ao norte da foz com teores de 11% (RD21) a 83% (RD25) com mediana de 72%. A análise de D50 entre os sedimentos de granulometria fina mostra uma variação entre silte fino e silte médio. As amostras do sul são representadas por frações desde 9 µm – silte fino (RD15) até 17 µm – silte médio

(RD31) e do norte por 12 μm – silte fino (RD25) a 20 μm – silte médio (RD24), e em ambos setores os valores do D50 são maiores em direção à linha de costa (fig. 11).

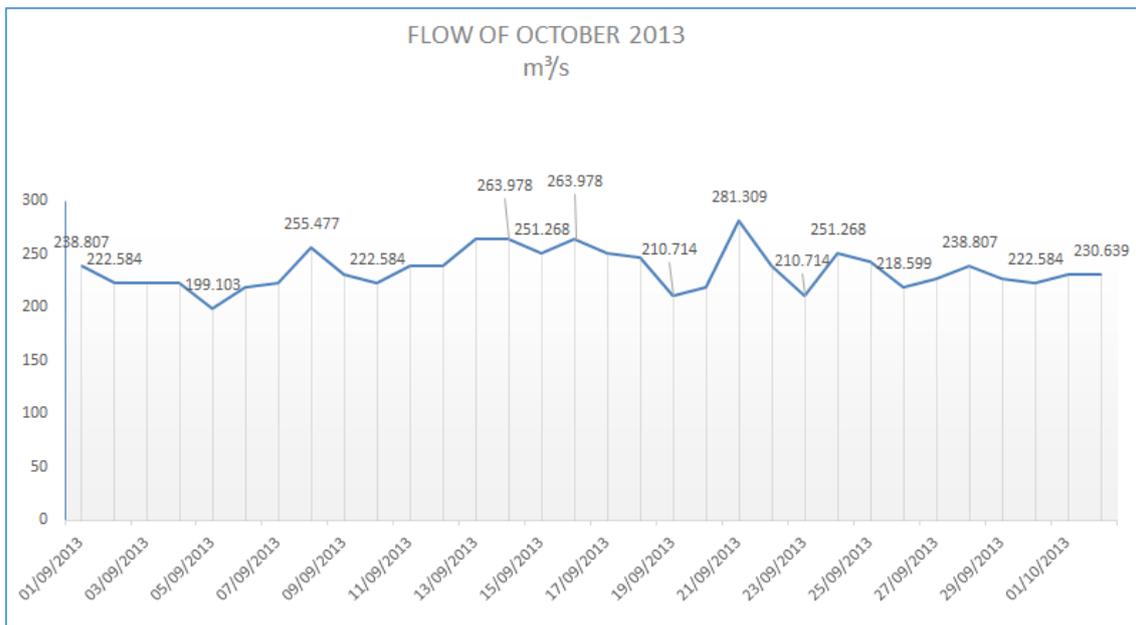


Figura 9: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Outubro/13.

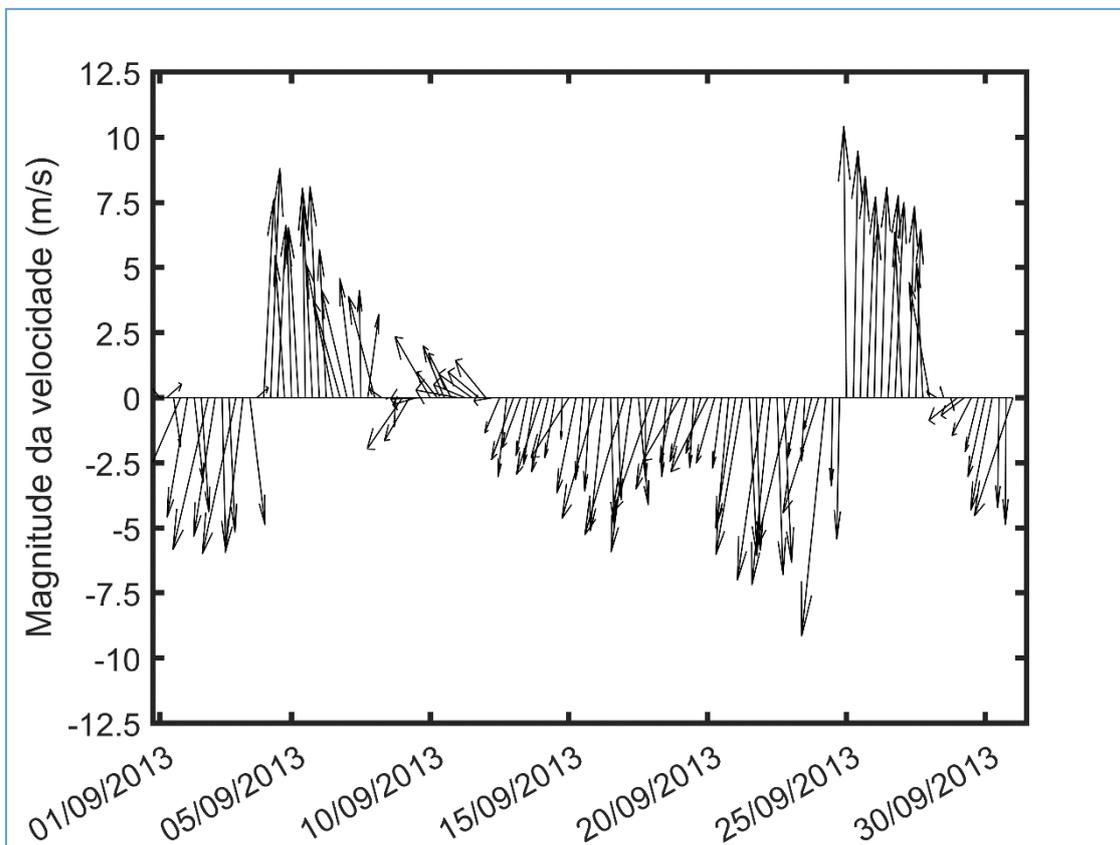


Figura 10: Variação temporal da direção e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Outubro/13.

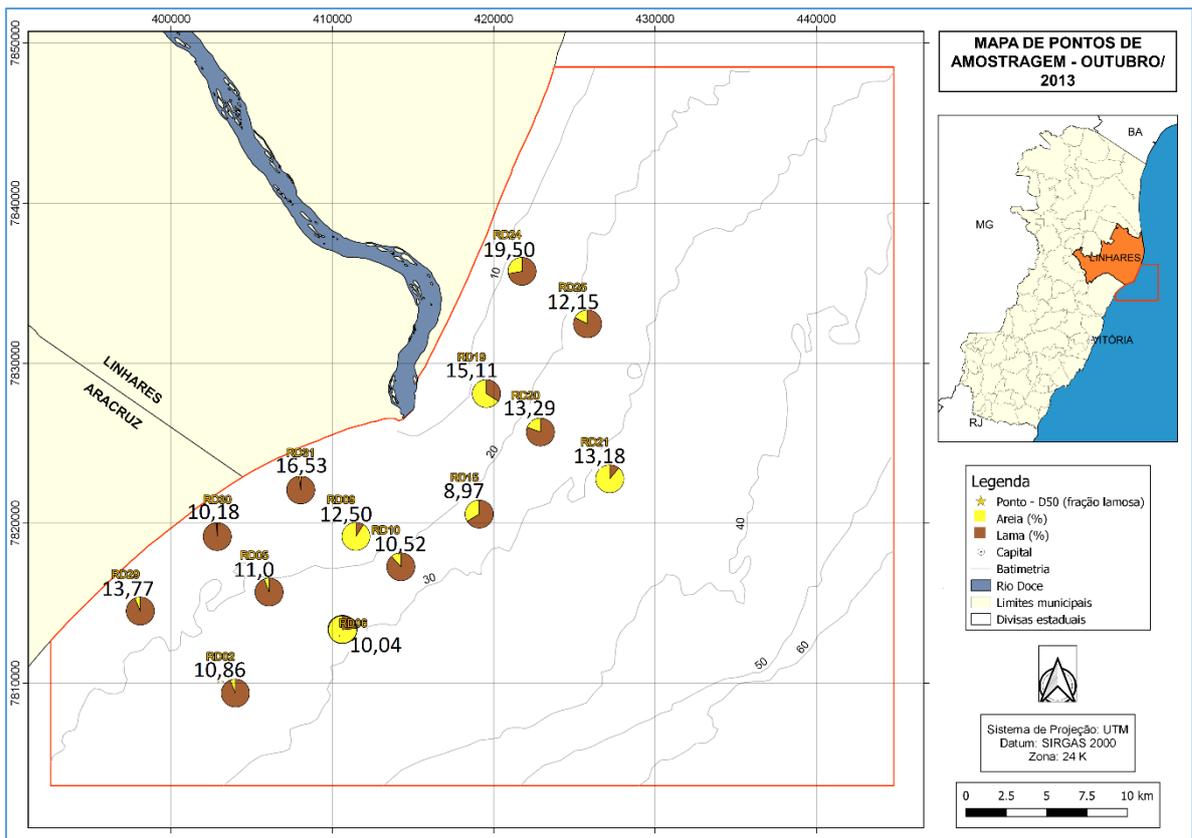


Figura 11: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Outubro/13, com o referentes valores de teores de areia e lama.

Janeiro de 2014

Os 30 dias anteriores à campanha de janeiro de 2014 apresentaram uma vazão mediana de 3168 m³/s, variando entre 784 m³/s e 10716 m³/s os seus valores máximos e mínimos medidos (Fig. 12). As condições de vento apresentam a mediana das direções no quadrante N/NE, com a intensidade mínima e máxima medidas para vento também neste quadrante, respectivamente em 1 m/s e 11 m/s (Fig. 13).

O resultado das amostras deste mês apresenta para o setor sul da foz do RD uma mediana dos teores de lama em 88% e amostras com quase 100%. Em contrapartida, à norte da foz tem a mediana de 31% de sedimentos finos em suas amostras, com o máximo de 78%. Os teores mínimos medidos foram de 16% ao sul e 7% ao norte da área. A mediana do D50 de sedimentos lamosos no setor sul é de 13 µm - silte fino e no norte de 16 µm – silte médio, e a variação entre mínimos e máximos para estes setores, na devida ordem, são de 8 µm – silte fino (RD06) a 27 µm – silte médio (RD14) e 10 µm – silte fino (RD21) a 19 µm – silte médio (RD19).

O maior D50 desta campanha é também o ponto mais próximo à desembocadura, RD14 (fig. 14).

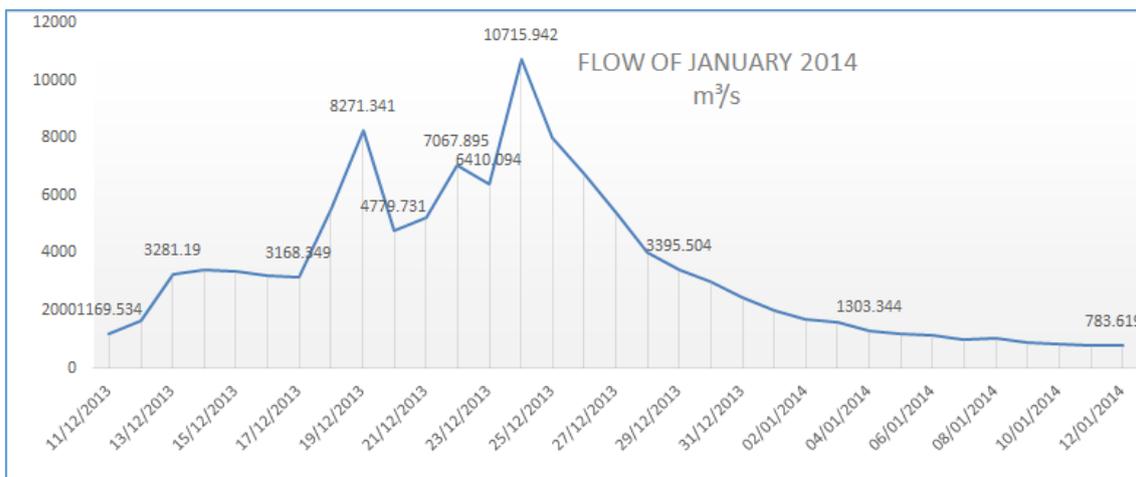


Figura 12: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Janeiro/14.

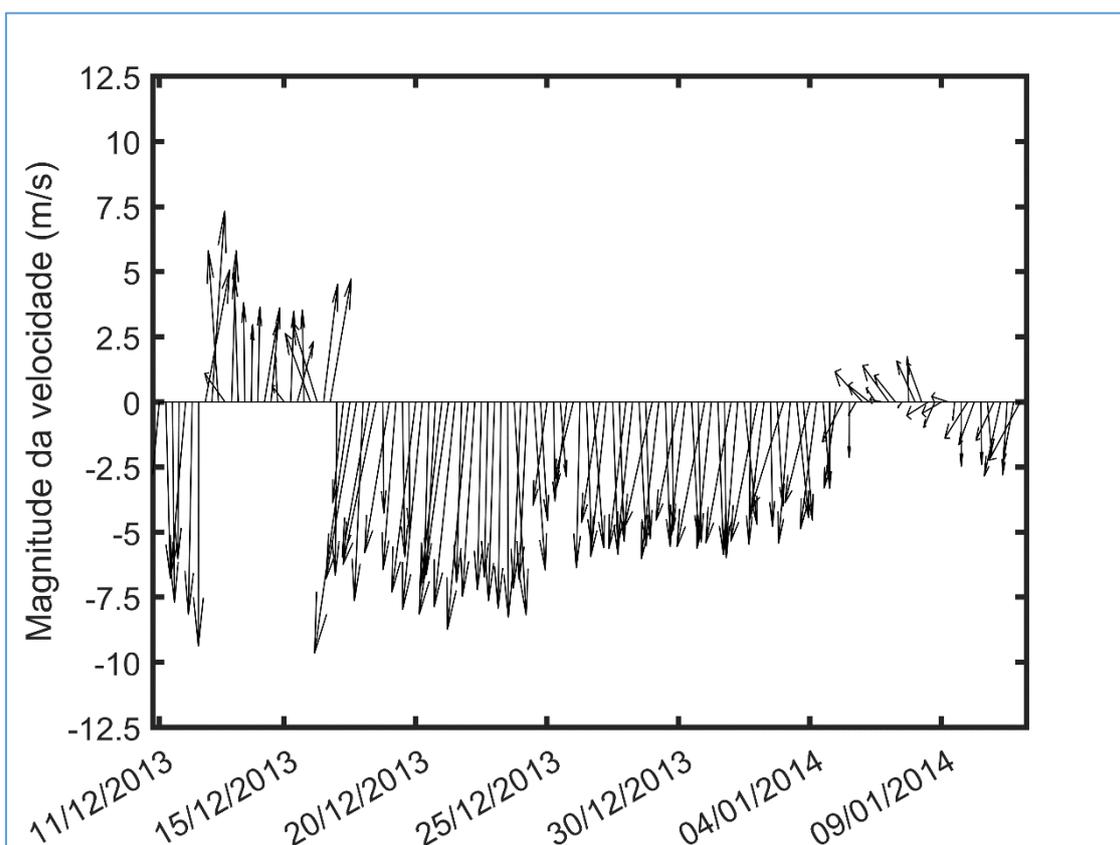


Figura 13: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Janeiro/14.

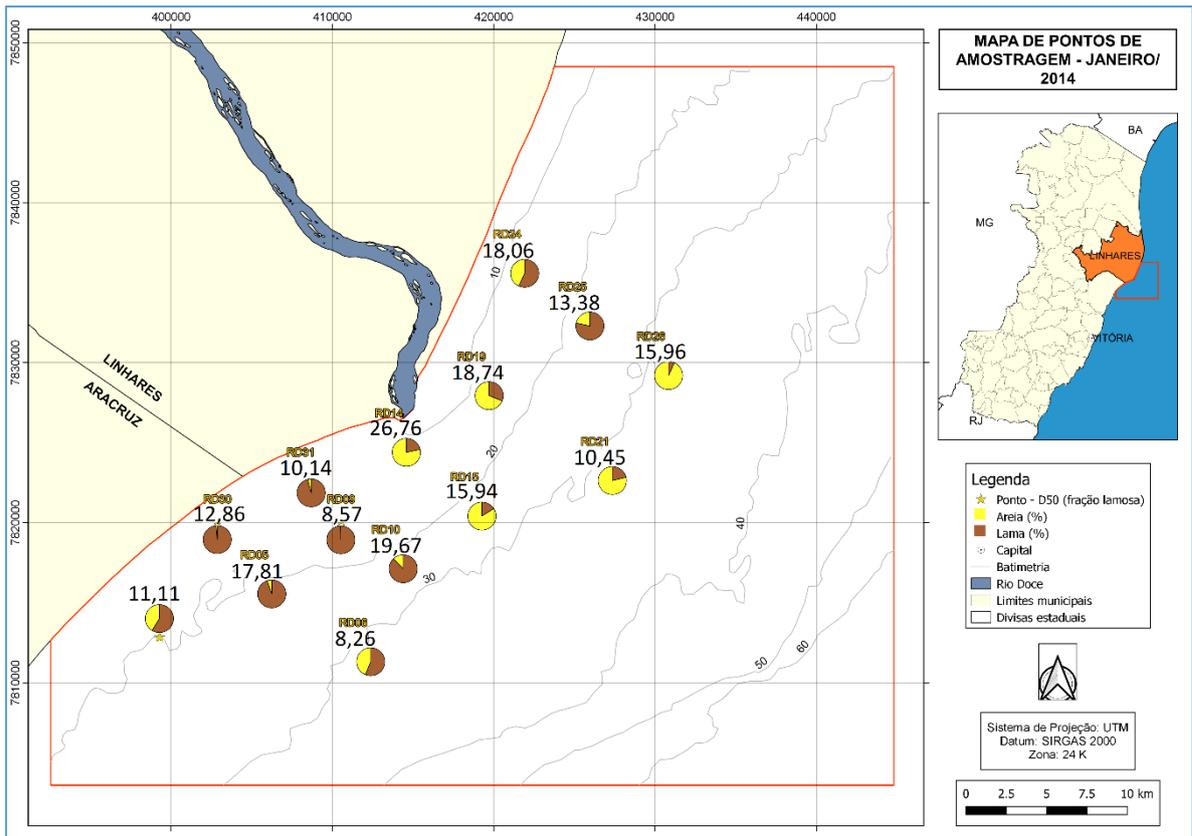


Figura 14: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Janeiro/14, com o referentes valores de teores de areia e lama.

Dezembro de 2015

A primeira coleta feita após a chegada da lama de rejeitos na plataforma foi a de dezembro de 2015, onde a vazão obteve mediana de 345 m³/s, com o valor mínimo medido sendo 260 m³/s e o máximo, registrado no último dia de coleta, 771 m³/s (Fig.15). Os ventos foram predominantes e com mediana no quadrante N/NE, com rajadas de vento no quadrante S/SE de até 10 m/s de magnitude. Intensidades mínima e mediana de 1m/s e 5 m/s na devida ordem (Fig. 16).

Os teores de lama em porcentagem para o setor ao sul da foz do RD tem o mínimo de 37% e máximo de 96% com mediana de 95%, já o setor norte o teor permanece acima 7% nesta campanha com o máximo de 92% e mediana em 58%. As frações granulométricas finas representadas pelo D50 tem seu valor mínimo de 1 µm – argila média tanto para o setor sul quanto para o norte, já os valores máximos variam de 9 µm – silte fino à 21 µm – silte médio na respectiva ordem. Dentre os valores de D50 medidos para Dezembro de 2015, os menores são das amostras no sul da área (Fig17).

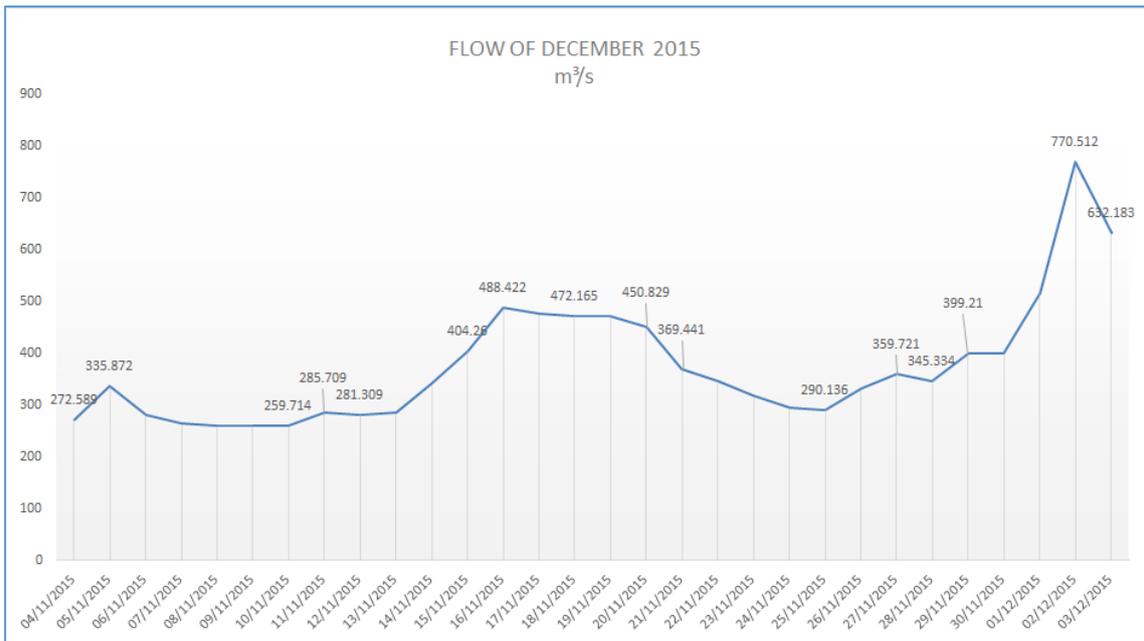


Figura 15: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/15.

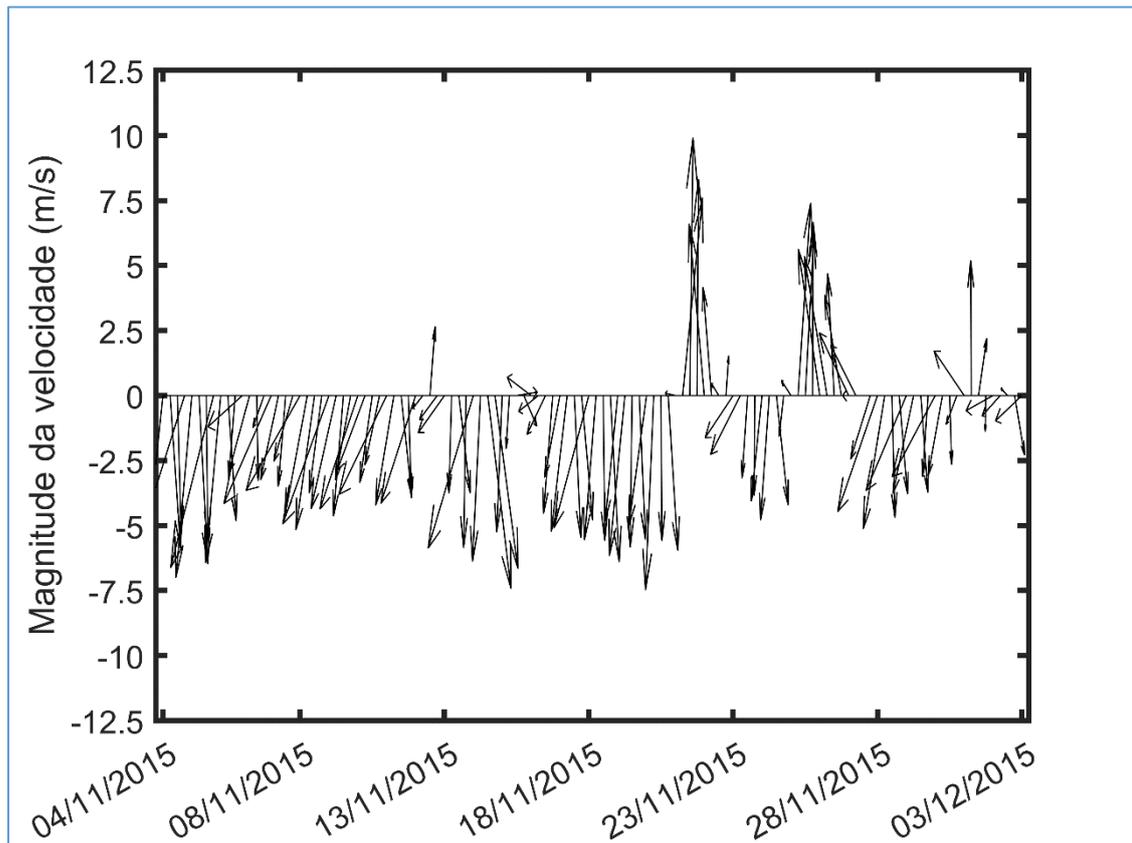


Figura 16: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/15.

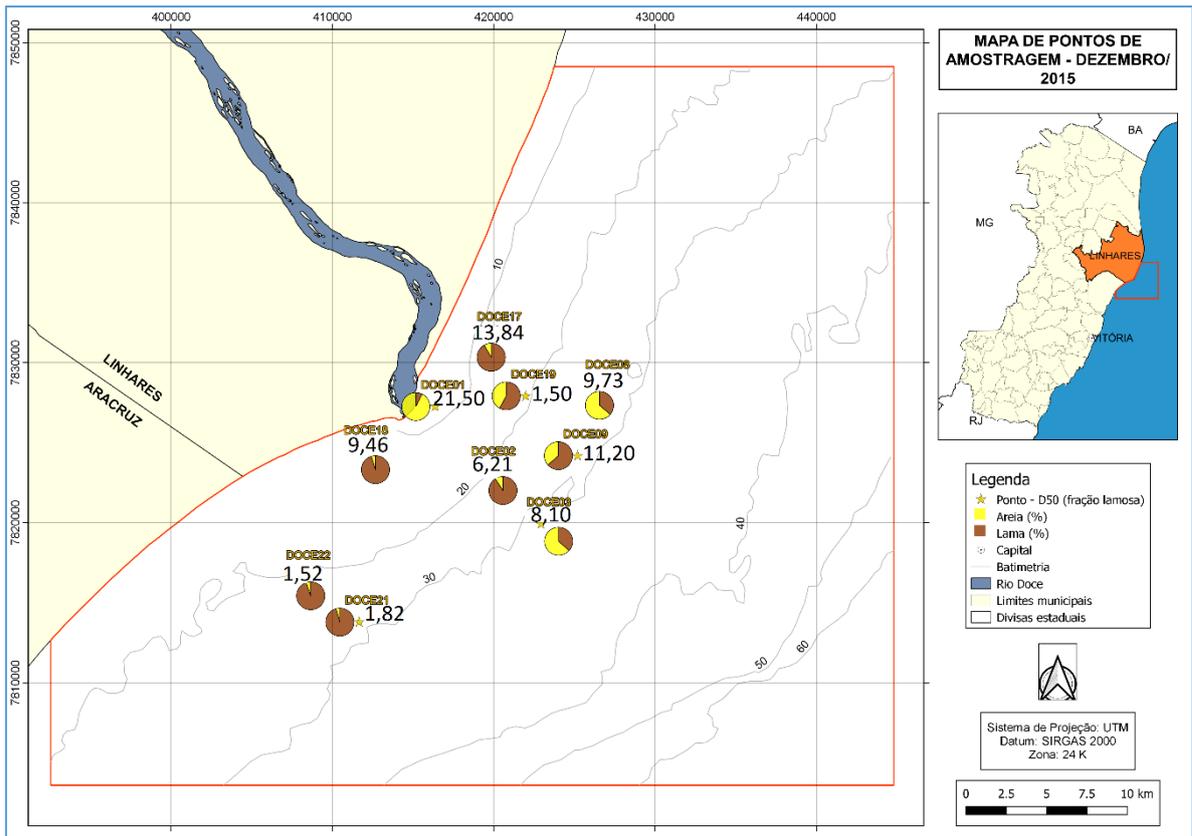


Figura 17: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Dezembro/15, com o referentes valores de teores de areia e lama.

Fevereiro de 2016

A campanha de fevereiro de 2016 tem uma vazão mediana de 718 m³/s, e os máximos e mínimos entre 436 m³/s a 3531 m³/s (fig. 18). As condições de vento para os 30 dias anteriores à coleta apresentam a maior parte dos dias sob influência de ventos N/NE assim como a mediana das medidas de direção. A menor e maior magnitudes foram em ventos também de N/NE, nesta ordem, 0,31 m/s e 8 m/s (fig. 19).

Os valores de teor de sedimento fino variam de 0% até 99% e apresenta a mediana para o setor sul com 60% de lama e para o norte com 64%. O D50 calculado para o sedimento lamoso das amostras no setor sul desta campanha tem o mínimo de 5 µm – silte muito fino (ANTDS13) e máximo de 17 µm – silte médio (ANTDS5) enquanto para o norte, o mínimo calculado entre os D50 neste mês é de 1 µm – argila média (SD1) e o máximo de 28 µm – silte médio (RF). As medianas entre o D50 para sul e norte são respectivamente silte muito fino e silte fino. Perto

da foz do RD os valores do D50 de sedimentos finos estão relativamente altos em relação aos outros pontos da mesma campanha (fig 20).

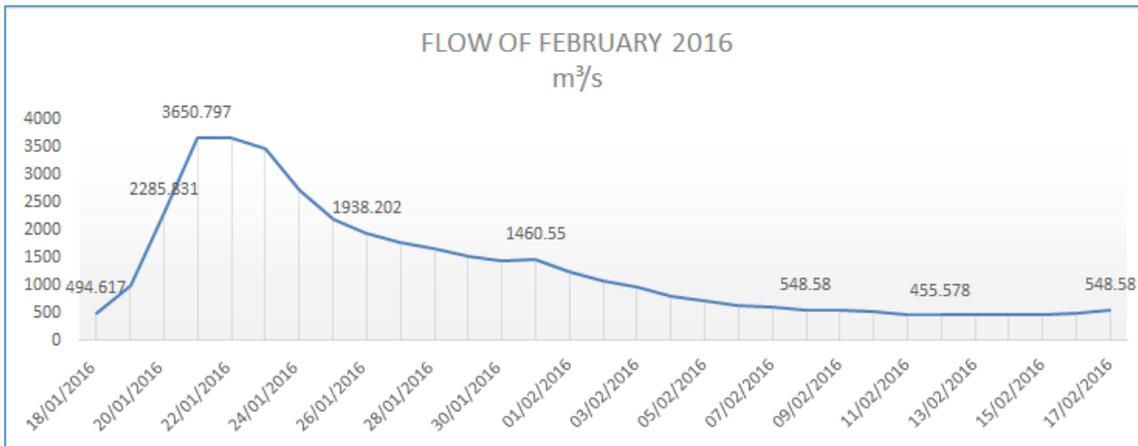


Figura 18: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Fevereiro/16.

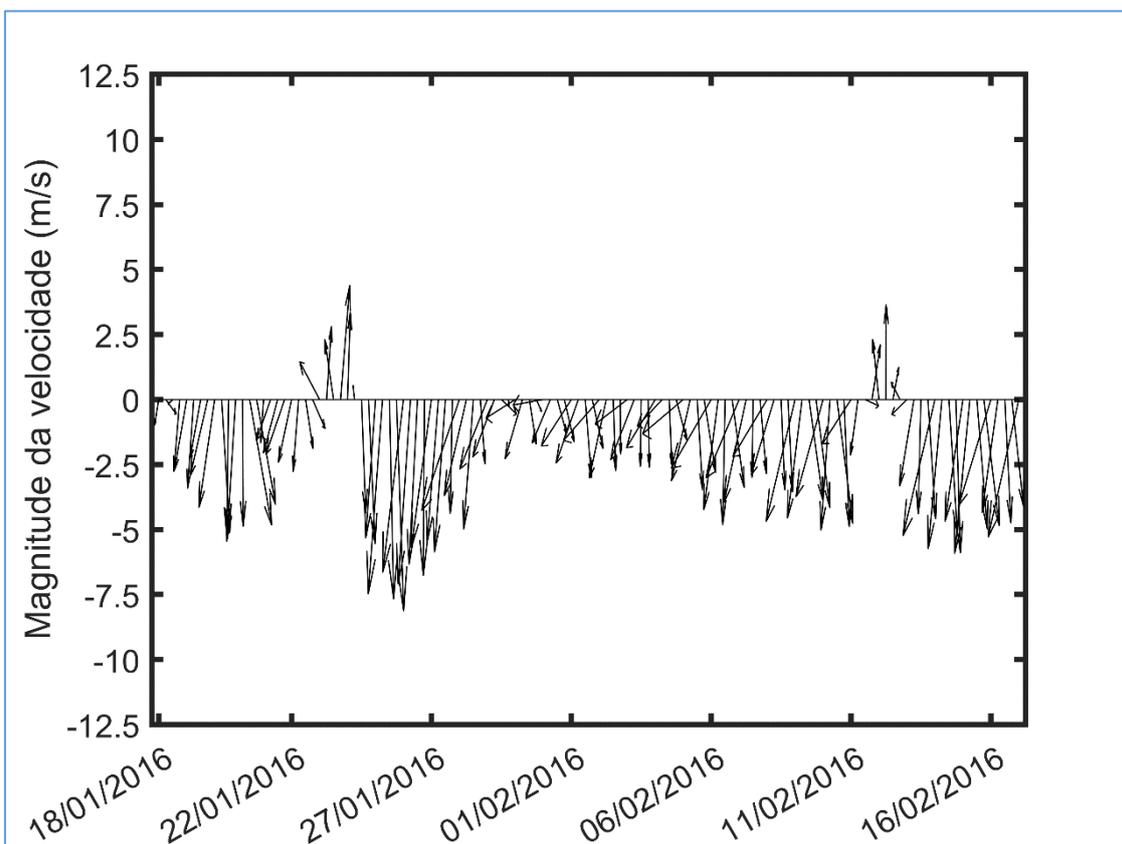


Figura 19: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Fevereiro/16.

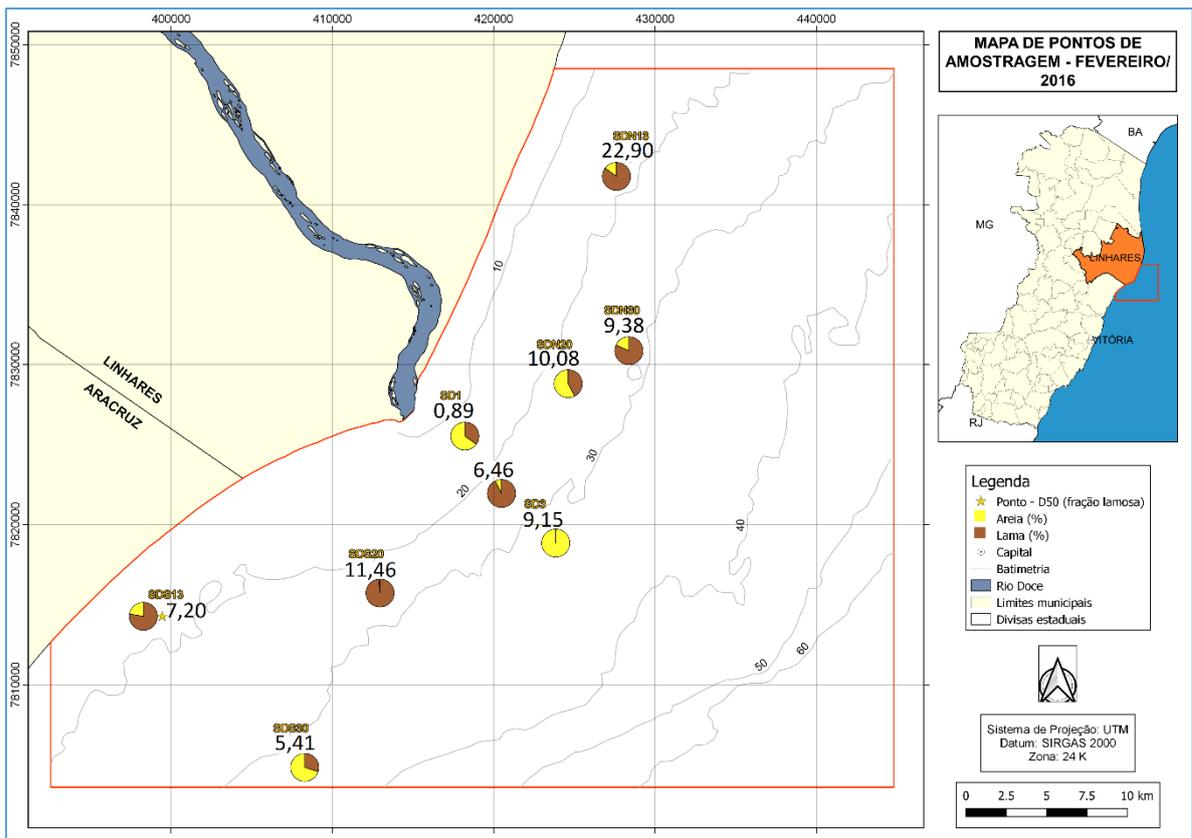


Figura 20: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Fevereiro/16, com o referentes valores de teores de areia e lama.

Dezembro de 2016

Em dezembro de 2016 as condições de vazão apresentaram uma mediana de 875 m³/s e com máximos e mínimos entre 599 m³/s e 2549 m³/s (Fig. 21). Os ventos pré coleta mostraram três intervalos de ventos no quadrante S/SE em meio a ventos de direção N/NE, sendo a direção mediana no quadrante sudeste. Quanto as magnitudes, os mínimos e máximos foram atingidos pelos ventos S/SW sendo 0,21 m/s a menor magnitude e 10 m/s a maior (Fig. 22).

Os valores de lama para amostra total deste mês apresentam para o sul da área estudada uma variação entre 12% e 100% enquanto à norte são encontradas apenas amostras com mais de 27% de conteúdo de finos até 97%. Os valores de D50 dos sedimentos finos calculados para a região sul da foz do RD em Dezembro de 2016 estão entre 7 µm – silte muito fino (DSDS30) e 16 µm – silte médio (DR3-15), e mediana entre eles na fração silte fino, e os valores de D50 para a parte lamosa calculados para o norte, entre 6 µm – silte muito fino (DRPN1-13,5) e 18 µm – silte médio (DSDN30) sendo a mediana na fração silte médio (Fig. 23).

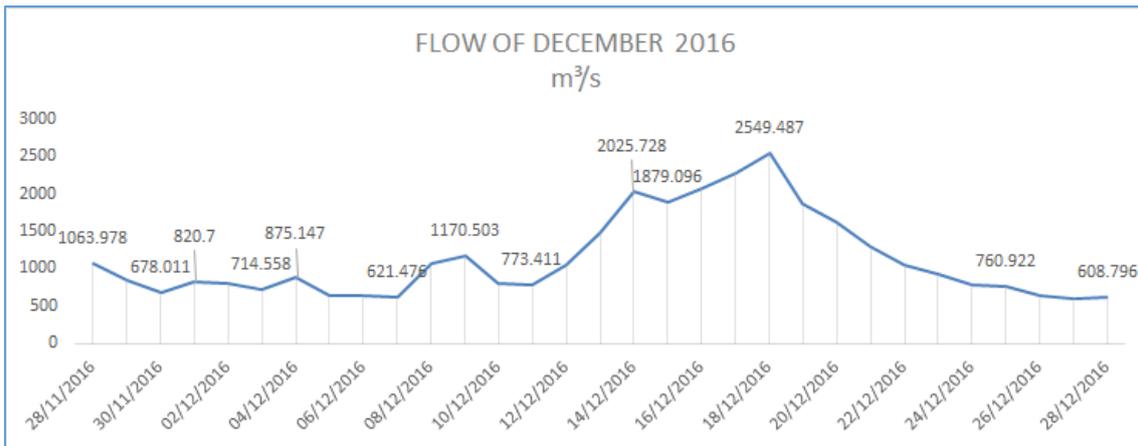


Figura 21: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/16.

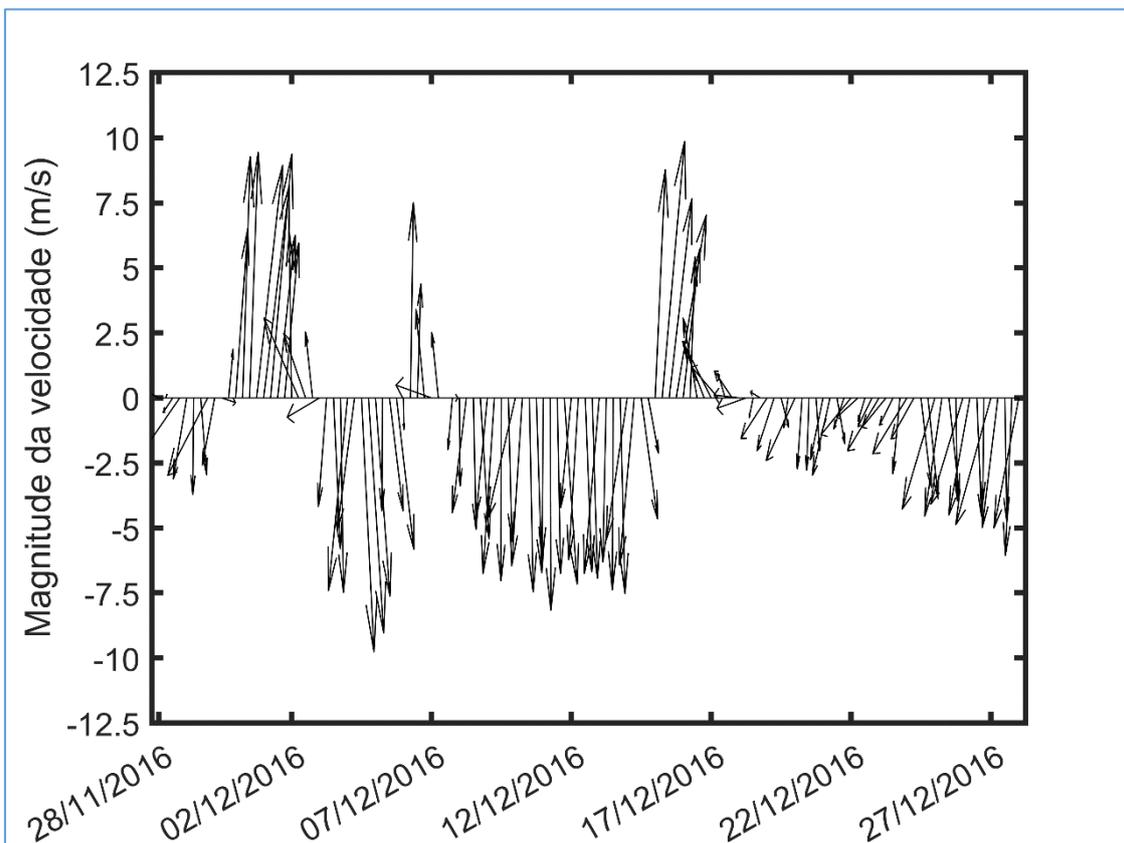


Figura 22: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Dezembro/16.

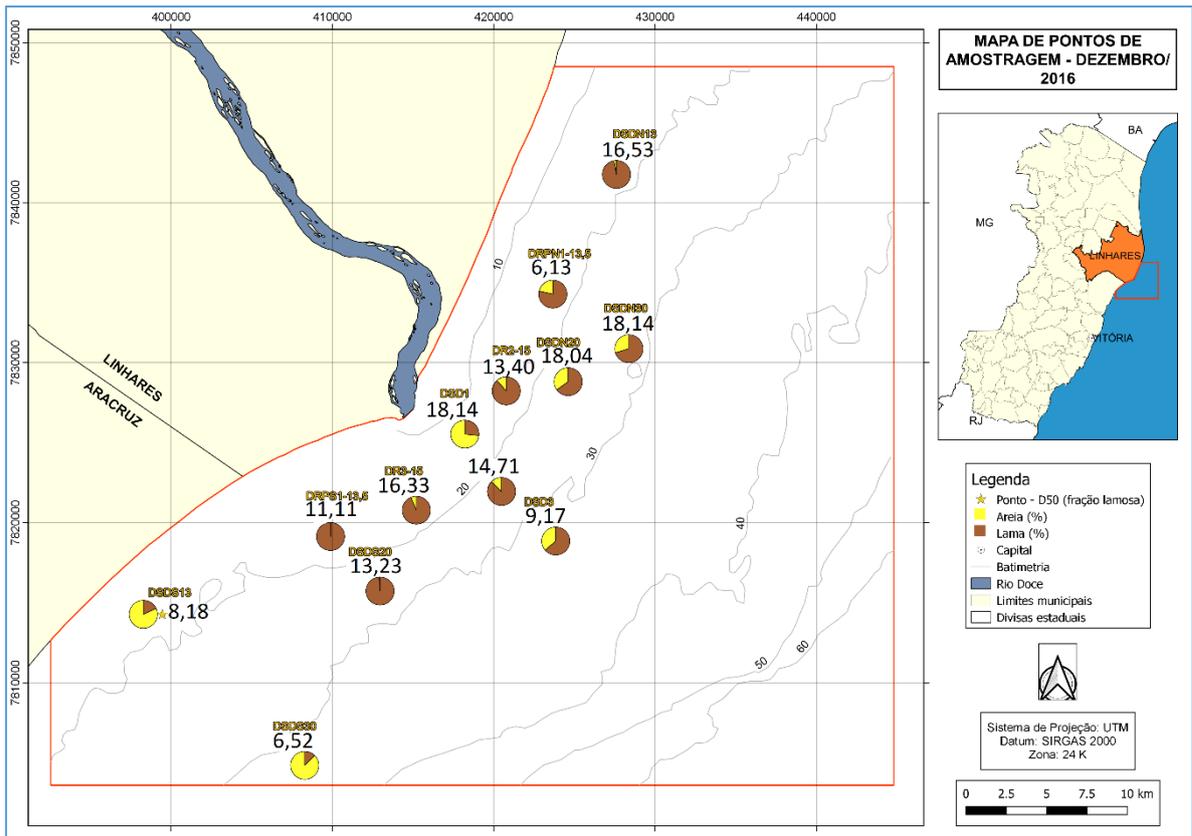


Figura 23: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Dezembro/16, com o referentes valores de teores de areia e lama.

Abril de 2017

A última campanha estudada é a de abril de 2017 e apresenta uma vazão mediana de 280 m³/s, sendo a menor registrada para esta data em 251 m³/s e a maior 453 m³/s (Fig. 24). Quanto as condições de vento a predominância e mediana de direção são no quadrante S/SE, e os valores de intensidade variando de próximo a 0 a 11 m/s, sendo a mediana de 4 m/s (Fig. 25).

O conteúdo lamoso apresenta-se com um teor variando de menos de 1% até 93% no setor sul, e de 1% até 85% ao norte da foz do RD. A resultado do D50 de sedimentos finos mostra que tanto para as amostras do sul quanto as do norte a mediana dos D50 é definida como silte muito fino, com os mínimos e máximos respectivamente para cada setor sendo, 6 µm – silte muito fino (SCRD510) e 8 µm (SCRD513) silte fino para o sul, e , 3 µm – argila grossa e 7 µm – silte muito fino para o norte (Fig 26).

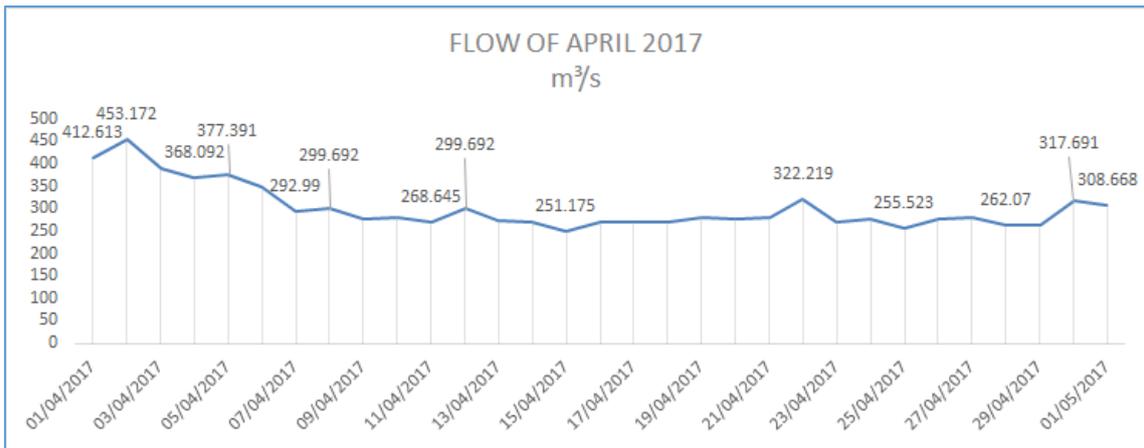


Figura 24: Variação temporal da vazão do Rio Doce para o período de 30 dias antes da coleta de Abril/17.

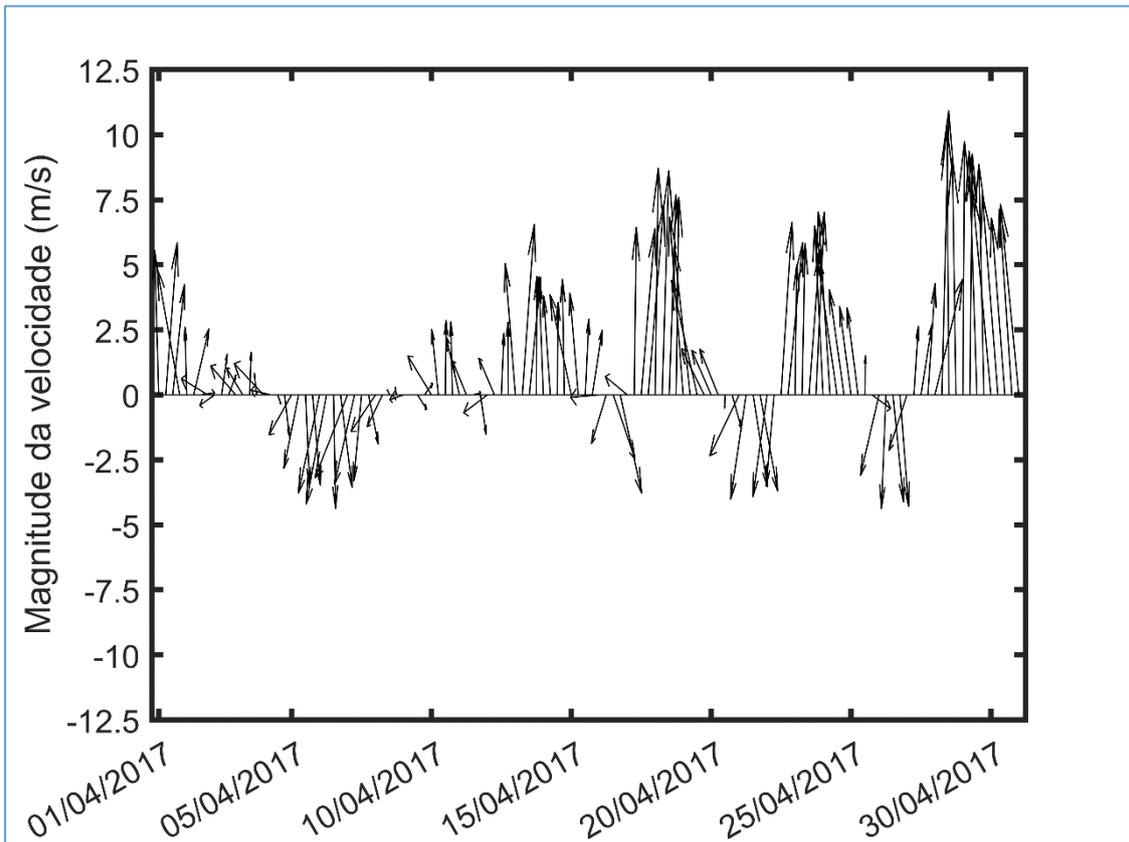


Figura 25: Variação temporal da intensidade e magnitude do vento para o período de 30 dias antes da coleta de Abril/17.

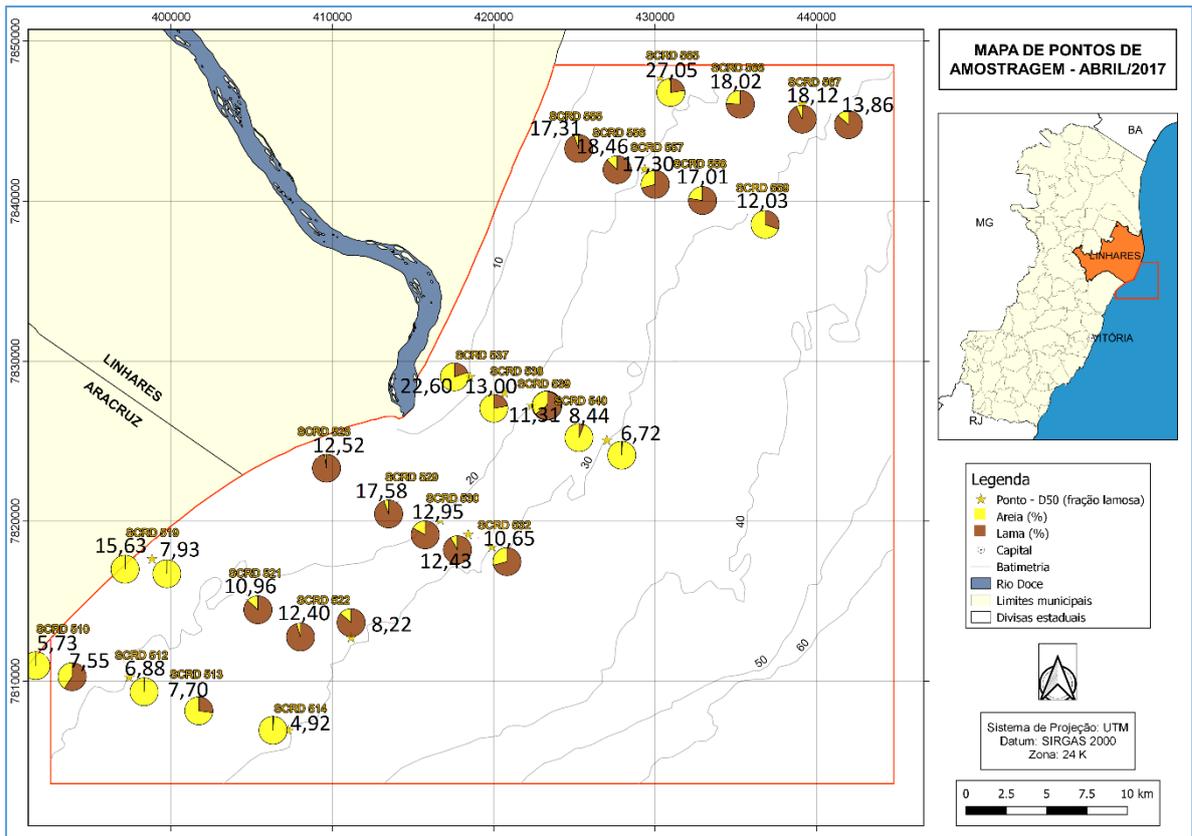


Figura 26: Mapa da distribuição das amostras coletadas em Abril/17, com o referentes valores de teores de areia e lama.

4.2 VARIABILIDADE TEMPORAL DE SEDIMENTO FINO

A Figura 27 apresenta a variabilidade dos teores de lama ao longo de todas as estações, considerando cada campanha amostral. O gráfico mostra uma grande variação dos teores de lama em cada campanha, mas não indica nenhuma tendência que apresente uma mudança de padrão ou de teores, considerando o evento de novembro de 2015.

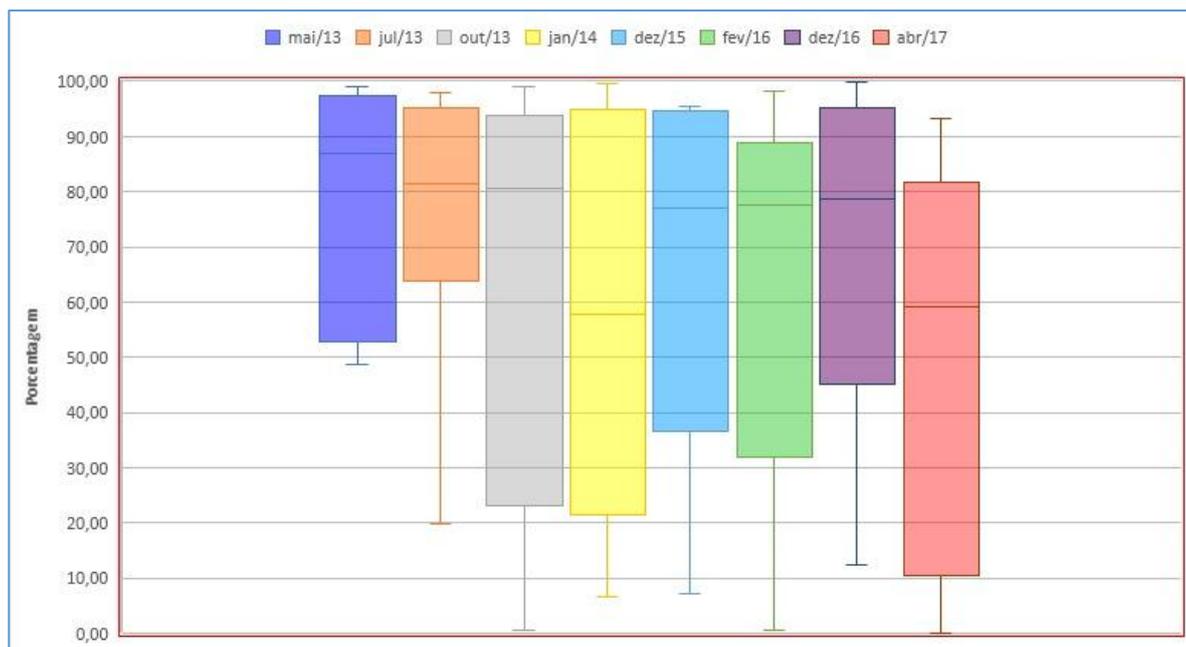


Figura 27: Box Plot da distribuição do teor de lama de todas as amostras coletadas em cada campanha.

A variação temporal dos teores de argila nas estações em cada campanha é ilustrada na Fig. 28. O gráfico mostra que a campanha de dezembro de 2015 apresenta os maiores valores de teor de argila, que chegam, no quartil superior, a valores em torno de 50%, com um máximo de 72%. Importante destacar que nas campanhas antes e depois de dezembro de 2015, os valores máximos encontrados não ultrapassam 35%, sendo que o limite do quartil superior para todas essas campanhas estão abaixo de 30%.

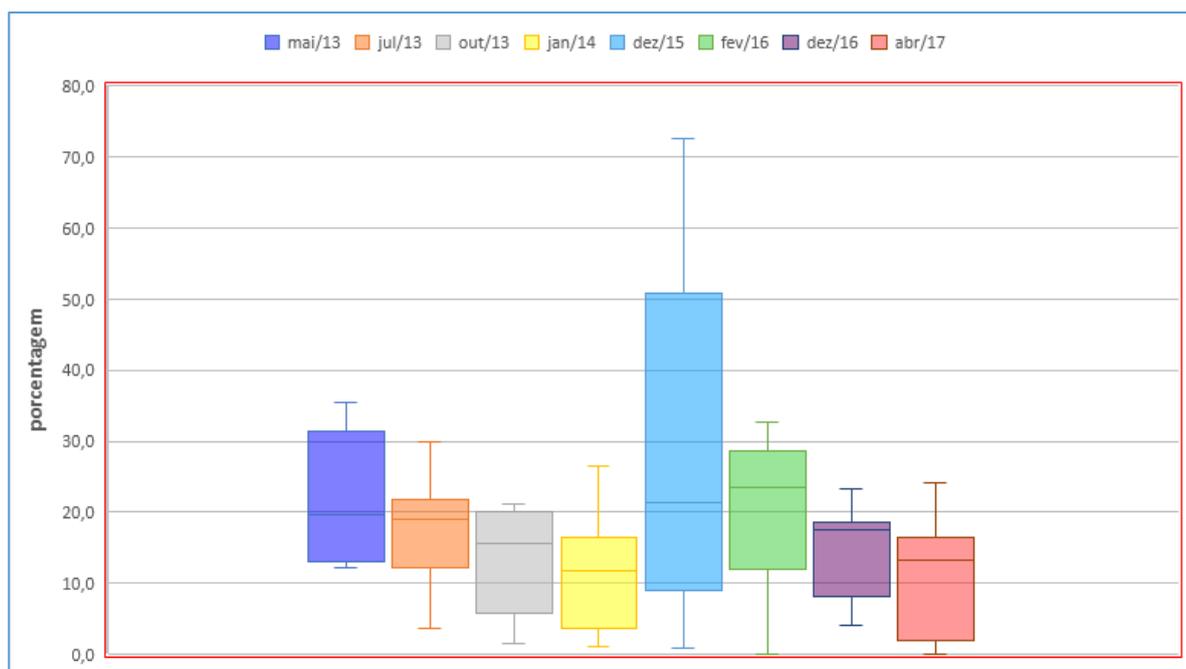


Figura 28: Box Plot da distribuição do teor de argila de todas as amostras coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem.

Os resultados por setor são mostrados nas figuras 29 e 30. No setor sul, observa-se que uma tendência muito similar ao do padrão que engloba os dois setores. A campanha de dezembro de 2015 apresenta valores de teor de argila bem mais elevados (~72%) do que as demais campanhas. Já no setor norte, observa-se que valores máximos de teor de argila são inferiores aos do setor sul, ficando em torno de 30 a 35% e observados nas campanhas de maio 2013, dezembro 2015 e fevereiro 2016.

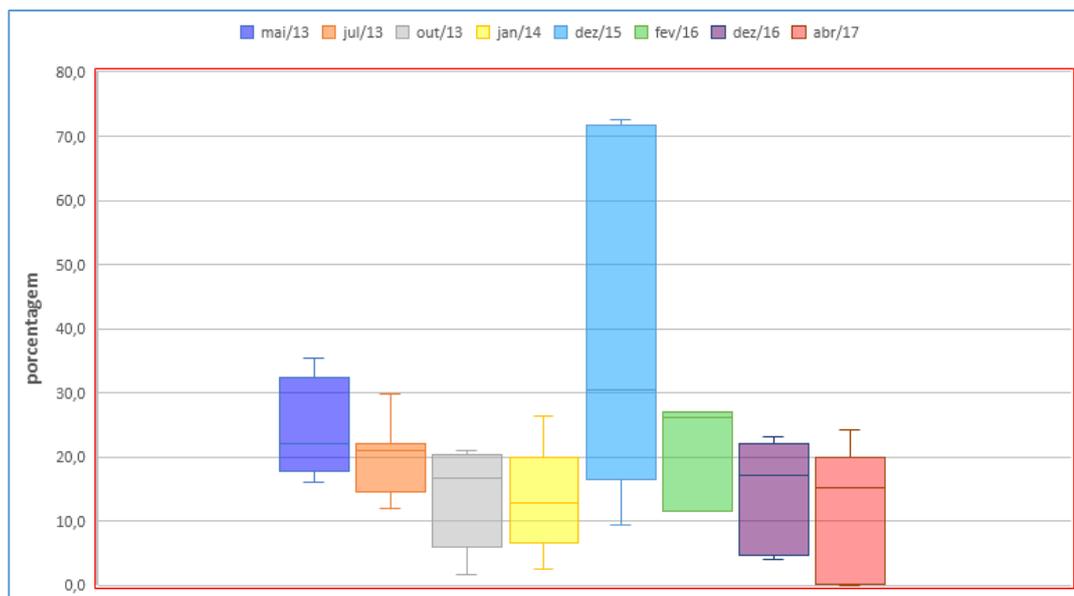


Figura 29: Box Plot da distribuição do teor de argila de nas amostras do setor sul coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem.

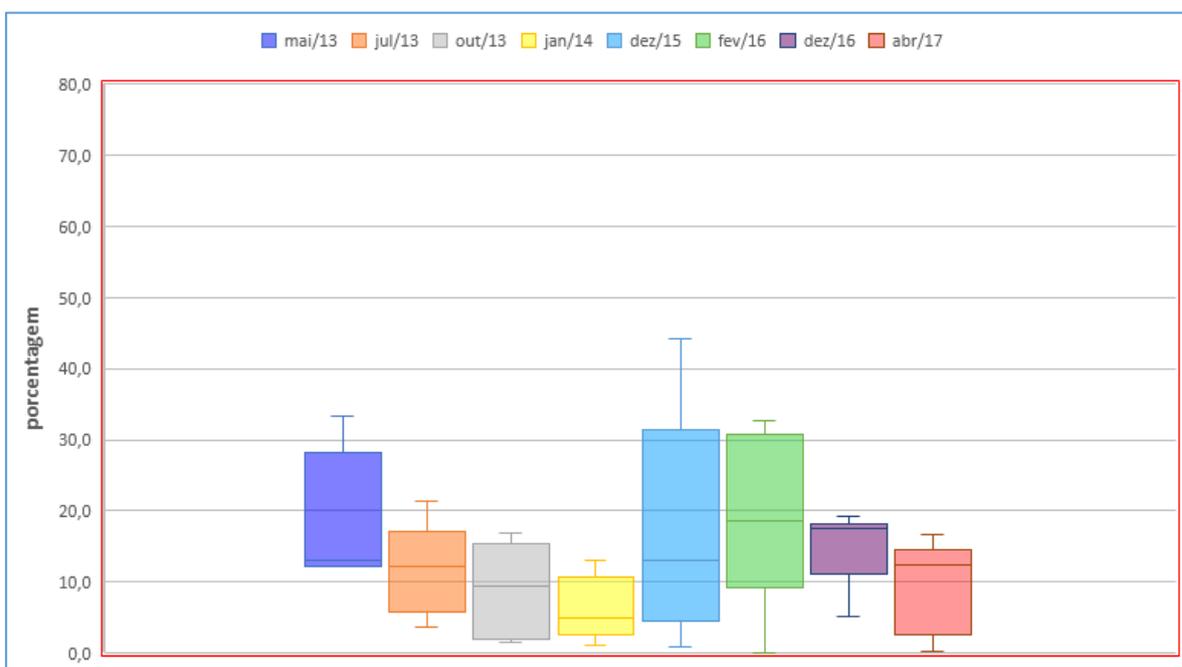


Figura 30: Box Plot da distribuição do teor de argila de nas amostras do setor norte coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem.

Os resultados mostrando a variabilidade da granulometria dos sedimentos finos, expresso no D50, nas campanhas analisadas estão mostrados ilustrada nas

Figuras 31, 32 e 33. Vale ressaltar que os valores plotados correspondem ao D50 da fração fina, calculado para todas as amostras coletadas por campanha amostral.

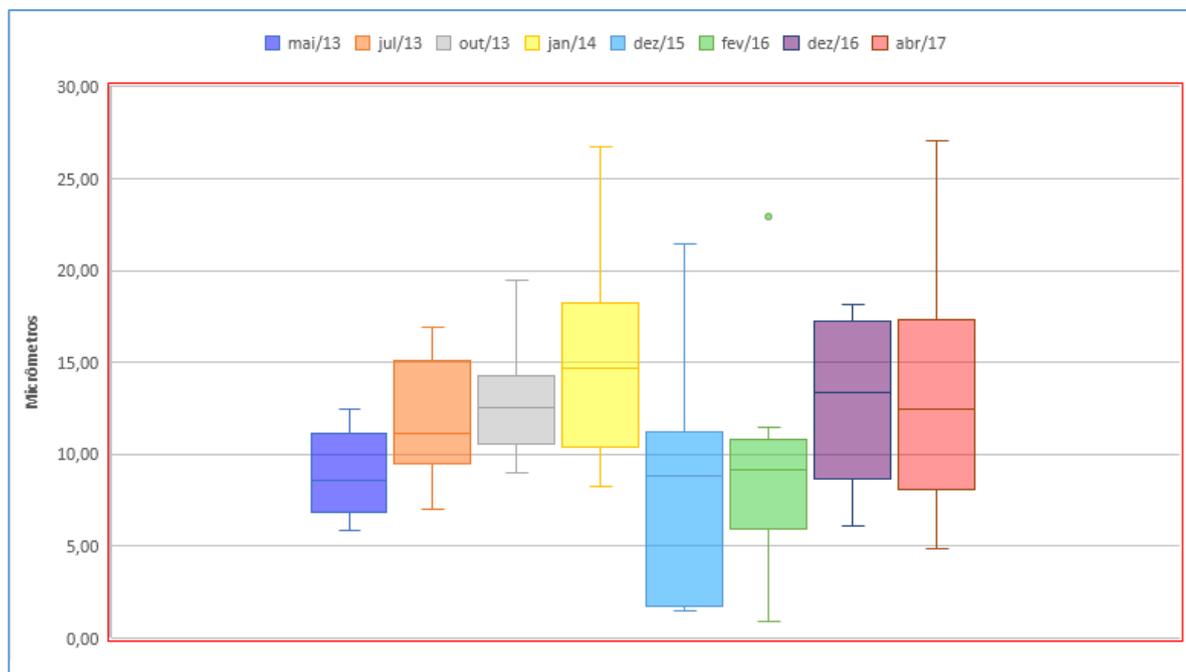


Figura 31: Box Plot da distribuição do conjunto de D50 de todas as amostras coletadas em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal do D50, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem, marcado pela campanha de dez/15.

A distribuição dos box plot por campanha mostra que há uma mudança clara na distribuição do D50 na campanha de Dezembro 2015. Essa campanha apresenta uma distribuição de D50 na fração argila, o que não é observado em outras campanhas, com exceção da campanha de Fevereiro 2016, que tem um valor de D50 mínimo na fração argila fina, mas que está fora do range entre o primeiro e terceiro quartis da distribuição.

A Figura 32 representa a variação temporal do D50 para as amostras coletas apenas no setor sul à foz do RD.

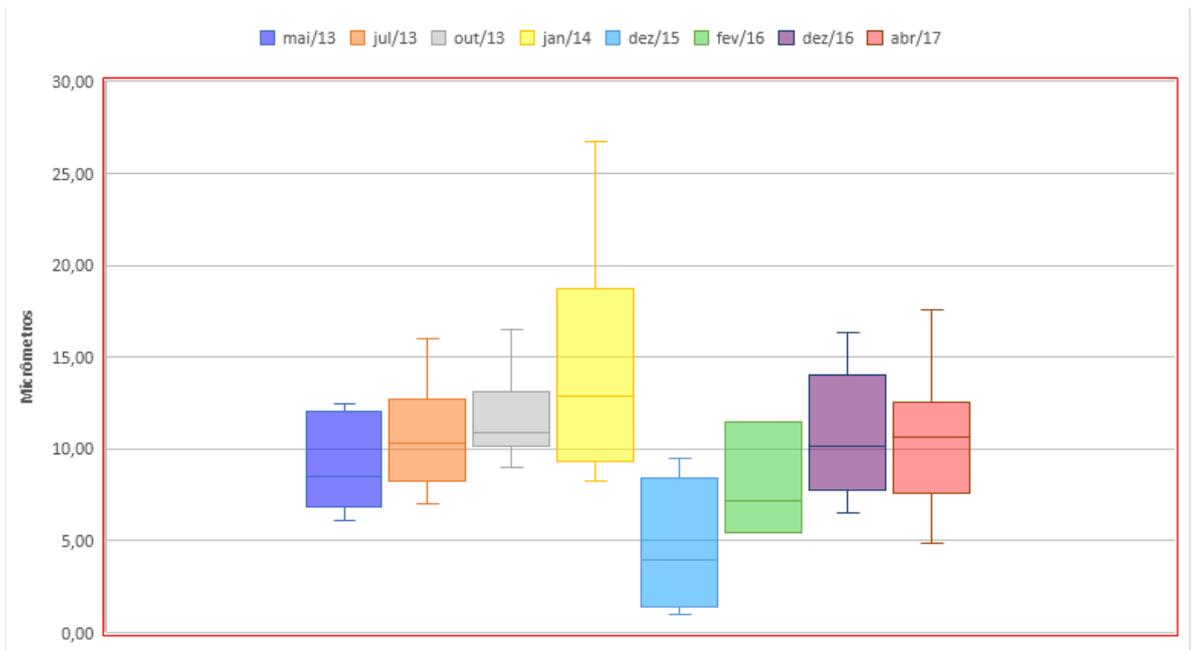


Figura 32: Box Plot da distribuição do conjunto de D50 das amostras coletadas no setor ao sul da foz do Rio Doce, em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal do D50, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem, marcado pela campanha de dez/15.

Pode-se dizer que, de uma maneira geral, a distribuição do D50 no setor sul segue um padrão de pouca variação, com exceção para as campanhas de Janeiro 2014 e Dezembro 2015. A campanha de Janeiro 2014 é a única que apresenta D50 na fração silte grosso, e a distribuição dos valores de D50 é a maior de todo o setor sul (9 e 19 µm). Por outro lado, a campanha de Dezembro de 2015 é o único conjunto de dados que apresenta amostra com D50 inferior a 4 µm, ou seja, fração argila. As demais campanhas possuem uma distribuição de D50 entre 6 e 14 µm.

A Figura 33 representa a variação temporal do D50 para as amostras coletas apenas no setor norte à foz do RD.



Figura 33: Box Plot da distribuição do conjunto de D50 das amostras coletadas no setor ao norte da foz do Rio Doce, em cada campanha. O gráfico ilustra a variação temporal do D50, mostrando um valor de máximos, mínimos e mediana dessa distribuição, antes e depois do rompimento da barragem, marcado pela campanha de dez/15

Diferente do setor sul, a região norte à desembocadura do RD apresenta maior variação na dispersão nos valores de D50, bem como uma tendência de valores mais elevados. Assim como para o setor sul e para o gráfico da Figura 31, a campanha de Dezembro 2015 é a única que apresenta valores de D50 inferiores a 4 µm, estando os mesmos na fração argila. Com exceção da campanha de maior 2013 e Dezembro de 2015, as demais campanhas tendem a apresentar D50 maiores do que no setor sul, com valor mais baixo em torno de 10µm. A campanha de Fevereiro 2016 também é bastante distinta do padrão do setor sul, com D50 em frações mais grossas de silte.

6 DISCUSSÃO

Em geral, o sedimento transportado por rios, e que aporta no ambiente costeiro/marinho é predominantemente silte (NITTROUER et al., 2007). O rompimento da barragem de Fundão em Marina, MG, aportou no sistema fluvial da bacia do rio Doce cerca de 40 milhões de m³ de rejeito de mineiro de ferro. A análise granulométrica do rejeito na barragem de Fundão mostra 73,6% de partícula silte, com um D50 de 22µm (Grilo et al., 2018). Os mesmos autores mostram que ao

longo do rio Doce, após o desastre, um D50 para finos de 4,6 μm e um teor de argila em torno de 56%.

Antes da chegada do rejeito na plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce, a granulometria do sedimento na plataforma continental interna era marcada por uma variação entre silte muito fino e silte médio (5,8 μm a 26 μm). Os resultados mostram que mesmo com toda a variabilidade temporal (sazonal) no aporte de sedimento fino na foz do rio Doce antes do desastre, o teor de argila não era superior a 34%. No rompimento da barragem esses valores alcançaram mais de 70% de teor de argila nos sedimentos da foz, apontando uma mediana de 4 μm no setor sul. Mesmo após o rompimento, observa-se uma nova alteração na composição granulométrica das amostras da foz, que voltam a apresentar teores de argila em torno de 15 a 30%.

Dessa forma fica evidenciado que o rompimento da barragem de Fundão e o aporte de minério na região costeira e marinha alterou o tamanho das partículas do fundo marinho, elevando os teores de argilas, o que potencialmente altera a dinâmica do sedimento de fundo. Vale ainda destacar que essa afirmação só é possível a partir da análise combinada de teores de argila e a mediana de sedimentos finos. Observa-se que o teor de lama não é necessariamente alterado a ponto de mostrar um padrão referente ao aporte de rejeito na foz.

Uma vez caracterizado o aporte e deposição de grandes teores de argila na plataforma continental interna, dispersão de sedimento fino na região pode e deve ser alterada, considerando que os teores de argila alteram as propriedades físicas do depósito sedimentar, bem como o seu potencial de mobilização e resuspensão (CHANG, 2007; DYER, 1986; WHITEHOUSE et al., 2000). Passaremos a discutir, à luz da variabilidade temporal e espacial da granulometria de finos, como esse aporte de argila alterou a dinâmica sedimentar na foz do rio Doce, comparando a dinâmica entre os setores sul ao norte.

Quaresma et al. (2015) discute que os sedimentos trazidos pelo RD, em primeiro momento, são depositados no setor sul devido influências dos ventos predominantes na região vindos do quadrante N/NE, que os levam para esta região, permitindo que o MPS e as partículas precipitadas a partir da diferença de pH entre a água doce e salobra ali permaneçam e decantem. Corrobora-se com esse fato a

análise do teor de lama na região sul, em que antes do desastre as medianas sempre se encontram acima de 88%, tendo amostras com até 100% de lama. A análise de D50 dos finos, também vai de encontro a esta afirmação uma vez que a mediana dos sedimentos é de silte fino nas quatro campanhas.

Em contrapartida, o setor norte é marcado por apresentar D50 de sedimentos finos chegando à silte médio, com maior teor de lama encontrado sendo 87% e medianas acima de 31%. Grande parte dos sedimentos ali encontrados são relíquias, sendo assim com granulometria mais grossa devido ao maior potencial de remobilização dos mais finos. Os com menor granulometria, em equilíbrio com as condições dinâmicas atuais, ali encontrados são transportados por influência das forçantes meteocenográficas em condições de tempestade - ventos vindos do quadrante sul.

Após o rompimento da barragem, foi possível notar de forma clara alterações na granulometria dos depósitos. A primeira coleta, ocorrida em Dezembro de 2015 junto a chegada do rejeito à foz, apresentou sedimentos com granulometria de 1 μ m, identificado como argila média em ambos os setores, além do aumento notável em amostras com silte muito fino a fino, proporcionando D50 variando de argila grossa a silte médio nas 4 últimas campanhas analisadas.

O comportamento de partículas finas (<63 μ m) no decurso do seu transporte é bastante diferente e muito mais complicada do que a de areia (CHANG 2007). Os sedimentos finos suspensos são compostos de duas populações distintas em seu comportamento hidráulico, siltes não coesivos (sortable silt) e siltes/argilas coesivas (aggregate silt/clay) (CHANG, 2007; DYER, 1986; WHITEHOUSE et al., 2000; VAN LEDENN et al., 2004). Mckee et. al. (2004) descrevem que partículas finas podem seguir uma trajetória simples e um fluxo vertical para depositar no fundo do mar, ou sofrer vários ciclos de ressuspensão e transporte antes de chegar ao local final. Segundo McCave et al. (1995) os siltes com maior granulometria são transportados e selecionados na forma não coesiva (sortable silt) e as argilas coesivas nos processos de transporte e deposição estão sujeitas a floculação e agregação (Van Leussen, 1988; Esima 1993).

A falha na barragem de mineração a montante do RD, além de ter acarretado a mudança no comportamento das partículas devido ao considerável aumento de

material particulado argiloso, segundo Grillo et al. (2018), o padrão de flocculação também foi alterado, pois este sedimento contém revestimento metálico devido ao ferro hidratado contido junto ao rejeito, portanto, o tempo de permanência das partículas na coluna d'água aumentou, sendo assim, mais suscetível ao transporte e consequente dispersão proporcionado pelas forças físicas. Assim explica-se o fato do setor norte, após o evento, apresentar mais teor de lama com partículas de menor espessuras que as 4 primeiras campanhas analisadas.

A importância do estudo das forças físicas é alto, uma vez que está diretamente ligado aos processos de deposição, ressuspensão e transporte dos sedimentos, porém observa-se aqui que, independente das condições apresentadas a chegada do grande volume de lama e rejeito na plataforma continental foi um evento marcante com modificações nos padrões até então observados junto ao sedimento superficial de fundo.

7 CONCLUSÃO

A ruptura da barragem de rejeitos associada a uma condição de baixo fluxo do Rio Doce elevaram a concentração de lama aportadas no ambiente marinho costeiro. Os resultados do *box-plot* mostram claramente uma mudança temporal do sedimento fino e no D50 deste.

A deposição do rejeito aumentou a quantidade de lama para mais de 60% na campanha que representa a chegada deste conteúdo no mar além de ser a primeira coleta a mostrar medianas inferiores a 3,9 μm (argila) com um aumento significativo de silte muito fino. As campanhas posteriores à 2015 apesar de normalizarem o conteúdo lamoso, indicam uma clara diminuição no tamanho das partículas.

O novo conteúdo sedimentar encontrado tem um maior potencial de ressuspensão por correntes e ondas podendo então alterar a dispersão de sedimentos da região e a dinâmica do fundo, assim como pode influenciar na velocidade de decantação das partículas e na formação do depósito do sedimento de fundo.

8 REFERÊNCIAS

Bastos, A.C., Oliveria, K.S.S., Fernandes, L.F., Pereira, J.B., Demoner, L.E., Neto, R.R., Costa, E.S., Sá, F., Silva, C.A., Lerhback, B.D., Dias Jr., C., Quaresma, V.S., Orlando, M.T.D., Turbay, C.V.G., LopeS, B.A., Leite, M.D., Ghisolfi, R.D., Lemos, A.T., Piva, T.R.M., Lázaro, G.C.S., Conceição, J.R., Lemos, K.N., Zen, C.M., Bonecker, A.C.T., Castro, M.S., Quintas, M.C., Cavaggioni, L., Oliveira, E.M.C., 2017. 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.

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., 2015. Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: a synthesis from a mixed siliciclastic–carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. *J. South Am. Earth Sci.* 63, 125–136.

Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Dias, M. A. F.; Justi da Silva, M. G. A. (Organizadores). 2009. *Tempo e Clima no Brasil*. Editora: Oficina de Textos. 1ª edição.

Chakrapani, G.J., 2005. Factors controlling variations in river sediment loads. *Current Science*, 88, 4, 569–575.

Chang, T. S.; Flemming, B. W., Bartholomä. A. 2007. Distinction between sortable silts and aggregated particles in muddy intertidal sediments of the East Frisian Wadden Sea, southern North Sea. *Sedimentary Geology*. 202, 453-463.

Dominguez, J.M.L. 2009. The coastal zone of Brazil. In: Dillenburg, S., Hesp, P.A., *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Springer. Heidelberg, 17-51.

Dyer, K.R. 1986. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. Wiley & Sons, Chichester, 342p.

Grilo, C. F., Quaresma, V. S., Amorim, G. F. L., Bastos, A. C. 2018. Changes in flocculation patterns of cohesive sediments after an iron ore mining dam failure. *Marine Geology*, 400, p. 1–11.

IBAMA, 2015. Laudo técnico preliminar. Impactos sociais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. [http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticiasambientais/laudotecnico preliminar .pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticiasambientais/laudotecnico preliminar.pdf)

McCave, I. N.; Manigueti, B.; Robinson, S. G. 1995. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: Parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography. *Paleoceanography*. 10, 593-610.

Muehe, D. Geomorfologia costeira. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Orgs). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos* (cap. 6). Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1994. p. 253-308.

Nittrouer C.A., Austin Jr. J.A., Field M.E., Kravitz J.H., Syvitski J.P.M., Wiberg P.L. 2007. Writing a Rosetta stone: insights into continental-margin sedimentary processes and strata. In: Nittrouer C.A., Austin Jr. J.A., Field M.E., Kravitz J.H., Syvitski J.P.M., Wiberg P.L. Continental margin sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy. Special Publication 37, International Association of Sedimentologists, Blackwell Scientific Publications.

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

Oliveira, K. S. S., Quaresma, V. S. 2018. Condições típicas de vento sobre a região marinha adjacente à costa do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Climatologia*. V.22.

Quaresma, V.S., Catabriga, G.M., Bourguignon, S.C., Godinho, E., Bastos, A. C., 2015. Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. *Brazilian Journal of Geology*, 45, 635-644.

Samarco, 2016. Processo Produtivo. 2017 Samarco Mineração S.A. Available at: <http://relatoweb.com.br/samarco/www/pt/processo-produtivo.html>.

Santos, L.D., Brandao, P.R.G., 2003. Morphological varieties of goethite in iron ores from Minas Gerais, Brazil. *Miner. Eng.* 16 (11), 1285–1289

Syvitski, J.P.M., 2003 Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century. *Glob. Planet. Change* 10.

Van Ledden, M.; Van Kesteren, W. G. M.; Winterwerp, J.C. 2004. A conceptual framework for the erosion behavior of sand-mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 24, 1-11.

Vieira F. V., Bastos A. C., Quaresma V. S., Leite M. D., Costa Jr. A., Oliveira K. S.S., Dalvia C. F., Bahia R. G., Holz V. L., Moura R. L., Amado Filho G. M., 2019. Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research*, 187, 1-12.

Ward, A. D., Trimble, S. W., 1995. *Environmental hydrology*. 2 ed. New York: Lewis Publishers, 475p.

Wentworth, C. A scale of grade and class term clastic sediment. *Journal of Geology*, [S.I.], v. 30, p. 377-392, 1922.

Whitehouse, R.J.S., Soulsby, R., Roberts, W. and Mitchener, H.J. 2000. *Dynamics of Estuarine Muds*. Thomas Telford Publications, London, 232p.

Yang, S.L., Zhang, J., Zhu, J., Smith, J.P., Dai, S.B., Gao, A., Li, P., 2005. Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response. *Journal of Geophysical Reserach* 110, 12.