



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS

**DINÂMICA DA SEDIMENTAÇÃO ATRAVÉS DE
DERIVADORES E IMAGENS DE SENSORIAMENTO
REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO: IMPLICAÇÕES PARA A
RECUPERAÇÃO DO RIO DOCE**

MAÍSA MELLO RIBEIRO

ITAJUBÁ, MG, BRASIL

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS

**DINÂMICA DA SEDIMENTAÇÃO ATRAVÉS DE
DERIVADORES E IMAGENS DE SENSORIAMENTO
REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO: IMPLICAÇÕES PARA A
RECUPERAÇÃO DO RIO DOCE**

MAÍSA MELLO RIBEIRO

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte das exigências obrigatórias para obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador: Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu

Coorientador: Dra. Samara Calçado de Azevedo

ITAJUBÁ, MG, BRASIL

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e oportunidade de aprendizado de cada dia.

À minha família, em especial minha mãe Claudina e minha irmã Laura, que me apoiaram e ajudaram a manter a determinação para finalizar este trabalho. Ao meu pai Martinho, que apesar de não estar mais presente, estará sempre comigo em minhas lembranças, com seu sorriso carinhoso e amor à vida.

Ao professor Arcilan Trevenzoli Assireu pelos ensinamentos e pela oportunidade especial de fazer parte do projeto de pesquisa “Derivadores Rastreados por Satélite e Monitoramento Automático de Parâmetros Ambientais Aplicados ao Entendimento da Contribuição dos Afluentes para o Restabelecimento do Rio Doce – RENOVA/FAPEMIG” e do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

A coordenadora Samara Azevedo, pela paciência, pelas ideias, críticas e sugestões no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Colegiado, que deferiu prorrogação de prazo de defesa, garantindo que dificuldades encontradas não comprometessem a conclusão deste curso.

A Fundação RENOVA e seu colaborador Leandro, pela disponibilidade dos materiais e por responder a todos os questionamentos necessários para o trabalho.

À FAPEMIG pela bolsa de mestrado concedida.

Não podemos mudar o passado,
mas com a atitude correta
podemos recuperar no futuro
mais do que perdemos no passado.

RESUMO

Em termos de impacto ambiental, o pior acidente de rompimento de barragens de resíduos de minério que ocorreu no Brasil nas últimas décadas é conhecido como desastre de Mariana, afetando significativamente o curso principal do rio Doce. O rio Doce tem origem na confluência entre o Rio do Carmo, diretamente afetado pelo acidente, e o Rio Piranga, indiretamente afetado. O estudo de confluências permite entender o papel dos afluentes para o restabelecimento dos rios afetados por esse tipo de desastre. O monitoramento e entendimento do comportamento espaço-temporal na confluência é indispensável, pois nela ocorrem importantes processos de mistura, transporte e deposição de sedimentos. Neste estudo, foi observada a hidrodinâmica e os parâmetros físicos do escoamento, por meio de derivadores rastreados por satélite, para encontrar as áreas mais frequentes para deposição de sedimentos, denominadas de barras lateral e central. Ferramentas de geoprocessamento e os índices espectrais, NDWI e BSI, foram aplicados às imagens de satélite e ARPs anteriores e posteriores ao evento, para a análise dessas barras ao longo do tempo. A barra central foi local de grande sedimentação para a lama de Mariana e para a cheia ocorrida em 2022, já a barra lateral apresentou evolução variada, com menor desenvolvimento pelos resíduos da lama e maior crescimento com a cheia de 2022. Através das imagens foram feitas análises das assinaturas espectrais da água dos rios estudados, que mostraram o grande impacto do desastre no rio do Carmo e sua recuperação nos anos seguintes. Enquanto o rio Piranga mostrou aumento na presença de sedimentos principalmente na cheia ocorrida em 2022. Os resultados auxiliaram a compreensão da influência dos rios do Carmo e Piranga nos processos hidrodinâmicos ocorridos na confluência, e a localização e evolução de importantes zonas de sedimentação, produzindo informações que podem ser úteis para projetos de recuperação desse e de outros rios e áreas degradadas.

Palavras-chave: Desastre de Mariana, Zona de confluência, Bancos de sedimentos, Monitoramento Remoto.

ABSTRACT

In terms of environmental impact, the worst mining tailings dam collapse accident that has occurred in Brazil in recent decades is known as the Mariana disaster, which significantly affected the main course of the Doce River. The Doce River originates at the confluence of the Carmo River, directly affected by the accident, and the Piranga River, indirectly affected. Studying confluences allows us to understand the role of tributaries in restoring rivers affected by this type of disaster. Monitoring and understanding the spatiotemporal behavior at the confluence is essential, since important processes of mixing, transport and deposition of sediments occur there. In this study, the hydrodynamics and physical parameters of the flow were observed using satellite-tracked drifters to find the most frequent areas for sediment deposition, called lateral and central bars. Geoprocessing tools and spectral indices, NDWI and BSI, were applied to satellite images and ARPs before and after the event, to analyze these bars over time. The central bar was a site of great sedimentation for the Mariana mud and for the flood that occurred in 2022, while the lateral bar showed varied evolution, with less development by the mud residues and greater growth with the 2022 flood. Through the images, analyses of water spectral signatures of the studied rivers were made, which showed the great impact of the disaster on the Carmo River and its recovery in the following years. While the Piranga River showed an increase in the presence of sediments mainly in the flood that occurred in 2022. The results helped to understand the influence of Carmo and Piranga rivers on the hydrodynamic processes that occurred at the confluence, and the location and evolution of important sedimentation zones, producing information that can be useful for recovery projects of this and other rivers and degraded areas.

Keywords: Mariana Disaster, Confluence, Sediments bar, Remote monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Confluência do Rio do Carmo e rio Piranga - 6 dias depois do rompimento da barragem.....	24
Figura 2 – Modelo de confluência assimétrica.....	26
Figura 3 – Modelo de confluência simétrica	29
Figura 4 – Curva espectral dos objetos (vegetação, solo e água)	33
Figura 5 – Fluxograma das etapas da metodologia	38
Figura 6 – Bacia do rio Doce e área da confluência estudada	39
Figura 7 – Tipos de ramificações na confluência formadora do rio Doce	41
Figura 8 – Formações características da confluência e possíveis locais de sedimentação da confluência	44
Figura 9 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo	48
Figura 10 – Exemplo de derivadores utilizados	50
Figura 11 – Locais de lançamento dos derivadores no dia 12/12/2021.....	51
Figura 12 – Locais de lançamento dos derivadores no dia 26/09/2023	52
Figura 13 – Pontos iniciais e final considerados nesta análise	52
Figura 14 – ARP Ebee utilizado pela equipe Geopixel para obtenção de imagens	55
Figura 15 – Exemplo de imagens de ARP realizada em 2022	55
Figura 16 – Esquema de um SIG	56
Figura 17 – Localização das amostras para assinatura espectral	59
Figura 18 – Exemplo de imagens de satélite (T0), Spot à esquerda e Geoeye à direita, feitas em 2015 mostrando variações no brilho	61
Figura 19 – Fluxograma da metodologia aplicada para poligonização dos bancos de sedimentos internos	63
Figura 20 – Exemplificação da poligonização dos bancos de sedimentos internos	64
Figura 21 – Fluxograma da metodologia aplicada para poligonização dos bancos de sedimentos marginais	66
Figura 22 – Exemplificação da poligonização dos bancos de sedimentos marginais ..	67
Figura 23 – Vazão do rio do Carmo (SRC) e rio Piranga (estação ERP), entre 2013 e maio de 2023	69
Figura 24 – Vazão do rio Doce, SRD e ERD2016, entre 2013 e 2023 (Zoom no período do acidente e na cheia de 2022	71

Figura 25 – Cota x Vazão do rio Doce - ERD2016 (curva-chave), entre 2016 e 2023	73
Figura 26 – Assinatura espectral dos rios do Carmo, Piranga e Doce – T08/2015 e T05/2016	76
Figura 27 – Assinatura espectral dos rios do Carmo, Piranga e Doce, para cada imagem coletada	78
Figura 28 – Assinatura espectral para cada rio entre 06/2017, 04/2021, 04/2022 e 08/2022	82
Figura 29 – Comportamento dos derivadores no lançamento realizado dia 12/12/2022	86
Figura 30 – Comportamento dos derivadores durante experimento realizado dia 26/09/2023	90
Figura 31 – Área de deposição de sedimentos na confluência do rio do Carmo e rio Piranga	93
Figura 32 – Velocidade encontrada por Marciano et. al. (2024) através de simulação hidrodinâmica na confluência do rio do Carmo e rio Piranga	94
Figura 33 – Área de deposição encontrada por Marciano et. al. (2024) através de simulação hidrodinâmica na confluência do rio do Carmo e rio Piranga	95
Figura 34 – Locais de sedimentação para análise de evolução	96
Figura 35 – Evolução da Barra Central entre 2015 e 2022	97
Figura 36 – Área x Cota da Barra Central de 2015, 2016, 2017, 2021 a 2022	99
Figura 37 – Evolução da barra central – 08/2015 (verde), 05/2016 (rosa) e 06/2017 (azul claro)	101
Figura 38 – Barra central – 04/2021 (preto) e 08/2022 (azul)	102
Figura 39 – Barra central – 08/2015 (verde) e 08/2022 (azul)	103
Figura 40 – Evolução da Barra Lateral entre 2015 e 2022	104
Figura 41 – Área x Cota da barra lateral de 2015, 2016, 2017, 2021 a 2022	107
Figura 42 – Atuação do rio Piranga na confluência do rio Doce após o desastre de Mariana	107
Figura 43 – Barra lateral – 01/2015 (verde) e 05/2016 (rosa)	108
Figura 44 – Barra lateral – 04/2021 (preto) e 08/2022 (azul)	108
Figura 45 – Barra lateral – 05/2016 (rosa) e 08/2022 (azul)	109
Figura 46 – Barra lateral – 01/2015 (verde) e 08/2022 (azul)	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estações fluviométricas utilizadas	48
Tabela 2 – Características das imagens fornecidas pela Fundação RENOVA	53
Tabela 3 – Vazão dos rios do Carmo e Piranga nos dias de coleta das imagens	70
Tabela 4 – Vazão e cota calculada para SRD	74
Tabela 5 – Vazão do rio do Carmo e rio Piranga na entrada da confluência	75
Tabela 6 – Principais bandas espectrais utilizadas e respectivos comprimentos de onda	76
Tabela 7 – Áreas de erosão e deposição indicados pelos derivadores em época chuvosa	87
Tabela 8 – Áreas de erosão e deposição indicados pelos derivadores em época seca.....	91
Tabela 9 – Cota calculada para SRD e área dos bancos de sedimentos da barra central.....	98
Tabela 10 – Cota calculada para SRD e área dos bancos de sedimentos da barra lateral	105
Tabela 11 – Análise da evolução da sedimentação dos bancos de sedimentos	111

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

µm	Micrómetro
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ARP	Aeronaves Remotamente Pilotadas
BC	Barra Central
BHRD	Bacia Hidrográfica do Rio Doce
BL	Barra Lateral Direita
BSI	Índice de Solo Exposto
CBH DOCE	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce
CPRM	Cia de Pesquisa de Recursos Minerais
ESA	Agência Espacial Européia
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ND	Número Digital
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada
NIR	Infravermelho
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
QGIS	Quantum Gis
SCP	<i>Semi Automatic Classification</i>
SISEMA	Sistema Estadual do Meio Ambiente
RGB	Vermelho (Red), Verde (Green) e Azul (Blue)
RC	Rio do Carmo
RD	Rio Doce
RP	Rio Piranga
TTAC	Termo de Transação e Ajustamento de Conduta
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
ZCH	Zona de confluência Hidrodinâmica

SUMÁRIO

1.	Introdução	13
1.1.	Hipótese	15
1.2.	Objetivo Geral	15
1.3.	Objetivos Específicos.....	16
2.	Fundamentação teórica	17
2.1.	Rompimentos de barragens no mundo.....	17
2.2.	Desastre de Mariana.....	21
2.3.	Sedimentos contaminados.....	22
2.4.	Zona de confluência.....	24
2.4.1	Confluência assimétrica	26
2.4.2	Confluência simétrica.....	28
2.4.3	Caracterização da zona de confluência do rio do Carmo e Piranga	40
2.5.	Imagens digitais e seu processamento.....	30
2.6.	Geoprocessamento	56
2.6.1.	<i>Software</i> QGIS.....	57
2.7.	Assinatura Espectral	32
2.8.	Índices espectrais.....	34
2.9.	Limiarização Binária e vetorização	36
3.	Metodologia	37
3.1	Área de estudo - confluência do Rio Doce.....	38
3.1.1.	Rio Piranga	44
3.1.2.	Rio do Carmo.....	45
3.2.	Dados das estações de monitoramento de água.....	47
3.2.1.	Dados das estações fluviométricas.....	47
3.3.	Levantamento dos parâmetros físicos de escoamento e deposição de sedimentos .	49
3.4.	Imagens de satélite e ARP	53
3.5.	Assinatura espectral.....	58
3.6.	Vetorização dos bancos de sedimentos utilizando imagens de satélite e ARP	60
3.6.1.	Vetorização dos bancos de sedimentos internos	62
3.6.2.	Vetorização dos bancos de sedimentos marginais	65
4.	Resultados e discussão.....	68
4.1.	Dados de vazão.....	68

4.2.	Dados de cota	72
4.3.	Análise espectral relativa dos rios em estudo.....	75
4.3.1.	Análise espectral relativa dos rios em cada imagem	77
4.3.2.	Análise espectral temporal comparativa dos rios	81
4.3.3.	Considerações sobre as análises espectrais	84
4.4.	Análise da hidrodinâmica fluvial por meio de derivadores.....	85
4.4.1.	Lançamento de derivadores em época chuvosa	85
4.4.2.	Lançamento de derivadores em época seca.....	88
4.4.3.	Considerações sobre a hidrodinâmica da confluência.....	92
4.5.	Análise da evolução temporal dos bancos de sedimentos através de imagens de satélite e ARP	96
4.5.1.	Análise qualitativa da evolução temporal – Barra central.....	97
4.5.2.	Análise qualitativa da evolução temporal – Barra lateral direita (BL)	104
4.5.3.	Análise quantitativa da evolução temporal relativa entre as barras central e lateral 110	
4.5.4.	Considerações sobre a evolução dos bancos de sedimentos.....	112
5.	Conclusão	114
6.	Referências bibliográficas	117

1. INTRODUÇÃO

Rompimentos de barragens tem causado danos ambientais, sociais e econômicos de grandes proporções em diversas regiões do mundo. Quando acontecem em barragens de rejeitos as consequências são ainda mais severas, devido à presença de resíduos oriundos de atividades de mineração. No Brasil ocorreram dois casos mais recentes, com grande repercussão nacional, de falhas em barragens que resultaram em desastres ambientais; o desastre de Mariana e o desastre de Brumadinho, em 2015 e 2019, respectivamente.

Em Mariana, o rompimento ocorreu na chamada barragem do Fundão, pertencente à Samarco, e proporcionou a descarga de altíssima carga de sedimentos em suspensão que foi transportada ao longo do rio Doce. Este acidente resultou no colapso da fauna e flora da região, na destruição da Vila de Bento Rodrigues e em extensos danos socioeconômicos e ambientais na bacia do rio Doce, sendo, portanto, considerado o pior e o maior desastre ambiental relacionado à exploração da mineração no Brasil (Foesch, 2017).

Os efeitos dessa destruição ainda são reportados até hoje, quase 9 anos após o acidente. Zanotelli (2024) encontrou efeitos permanentes do rompimento da barragem sobre a planície costeira do Rio Doce. No Relatório Anual do PMBA/Fest (2024) foi observado que na foz e na margem norte do rio Doce, foram encontrados os maiores teores de lama e da concentração de elementos químicos associados, sendo o alcance do desastre persistente; foi reportado também a contaminação e bioacumulação destes elementos em animais de níveis trópicos mais elevados, principalmente na foz do Rio Doce. Vieira, Silva e Zanotelli (2024) relataram a presença de peixes com mutações genéticas nas águas do Rio Doce em cidades do Espírito Santo. Impactos socioambientais também se mostraram persistentes, como a redução de recursos pesqueiros e efeitos adversos na sustentabilidade da pesca (Augustinho e Freitas, 2024).

Segundo estudos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2015), cerca de 50 milhões de m³ de lama se alastraram por toda a extensão, de mais de 663 quilômetros, do local de ruptura até a foz do Rio Doce. Em estimativa realizada pela Cia de Pesquisa de Recursos Minerais

- CPRM (2015), 16 milhões de m³ de rejeitos permaneceram acumulados na área próxima ao local, e cerca de 80% desse material ficou retido ao longo dos primeiros 100 km, com aproximadamente 32 milhões de m³ extravasados, abrangendo diversos rios e confluências como os rios Gualaxo do Norte, do Carmo, Piranga e Doce até a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves.

Esses diferentes encontros de águas, denominados confluências, entre o rio Doce e seus afluentes podem auxiliar na recuperação ambiental da bacia do Rio Doce. A confluência das águas produz complexas hidrodinâmicas e morfodinâmicas ambientais que são de grande importância para a circulação fluvial, o transporte de sedimentos e poluentes, e a evolução do leito (Zhang; Feng e Chen, 2020).

Por isso é de suma importância o entendimento dos processos que ocorrem na confluência entre o rio principal e seus afluentes, a fim de fornecer subsídios para o conhecimento acerca de sua efetiva contribuição para a dinâmica e o restabelecimento de rios degradados.

Derivadores ou flutuadores vêm sendo amplamente utilizados em estudos oceânicos, de grandes lagos, reservatórios e rios, tanto para estudos sobre fundamentos da dinâmica de fluidos, como estudos sobre correntes oceânicas (Assireu, 2017), quanto para problemas ambientais, como sua utilidade na investigação de dispersão e acúmulo de manchas de petróleo (Novelli, 2018). Foram também, utilizados para estudos fluviais, de transportes de macronutrientes (Iwata, 2020) e transporte e deposição de sedimentos (Ribeiro, 2023).

Os dados gerados por estes instrumentos são particularmente relevantes para observações acerca da estrutura espacial do escoamento. O uso de derivadores permite também estimativas sobre coeficientes de difusão de forma mais realista do que a partir de correntômetros. Esta capacidade é importante para investigações ecológicas, por exemplo, dispersão de poluentes, florescimento de algas ou dispersão de larvas (Johnson et al. 2002). A aplicação destes derivadores para estudos sobre “rota” de sedimentos é realizado, pela primeira vez, neste trabalho.

Em conjunto com o uso de derivadores foram utilizadas imagens de satélites e ARP (Aeronaves Remotamente Pilotadas) para análise de assinaturas espectrais da água como realizado nos estudos de Jensen (2009) e Chelotti (2017), enfocando

amostras de água dos rios Piranga, do Carmo e Doce para análise de turbidez. Foram utilizadas as imagens também para localização e análise da evolução de bancos de sedimentos encontrados na confluência do rio Doce, como em estudos similares sobre depósitos de sedimentos realizados por Resende, Carvalho e Guerra (2015) em Barra de Guaratiba, Brasil; Long et. al. (2021) para o rio Yangtze, China; Samir et. al (2022) para depósitos no rio Nilo, Egito; Rademann et. al., (2023) em Areal do Limeira, Brasil; e Marciano et al. (2024) na confluência formadora do rio Doce.

Utilizando essas ferramentas buscou-se investigar o desenvolvimento e o processo de recuperação da confluência do rio Doce após a descarga de sedimentos resultante do rompimento da barragem de Mariana.

1.1. Hipótese

No presente estudo considera-se que por meio de análise hidrodinâmica e espaço-temporal de depósitos de sedimentos é possível indicar a influência dos afluentes na recuperação do Rio Doce. Assim, a hidrodinâmica da confluência pode indicar possíveis pontos de acúmulos de sedimentos contaminados com resíduos de mineração.

1.2. Objetivo Geral

Estudar a confluência formadora do rio Doce, formada pela junção do rio Piranga com o rio do Carmo, por meio de sensoriamento remoto e processos hidrodinâmicos medidos por derivadores, tendo em vista a geração de subsídios para o entendimento acerca da evolução temporal dos rios, das áreas de deposição de sedimentos e conseqüente da recuperação do rio Doce à jusante da confluência.

1.3. Objetivos Específicos

- (I) - Comparar as zonas de convergência do escoamento configuradoras de zonas de sedimentação indicadas pelos derivadores com as previstas na literatura;
- (II) - Investigar como a hidrodinâmica medida pelos derivadores nas confluências influencia a evolução espaço-temporal da deposição de sedimento;
- (III) - Localizar zonas de sedimentação e mensurar sua evolução temporal através de métodos de geoprocessamento de imagens;
- (IV) - Investigar a assinatura espectral dos rios do Carmo, Piranga e Doce considerando a quantidade de sedimentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Macklin et. al. (1996), metais podem ser liberados no meio ambiente naturalmente através de processos de intemperismo. Contudo, a mineração de metais tanto básicos quanto preciosos pode acarretar elevadas concentrações de metais em meios fluviais, através, da liberação de lamas residuais contendo solutos e metais particulados, da erosão de depósitos de resíduos e planícies aluviais contaminadas, além de falhas em barragens de rejeitos de minas (Bird et. al., 2005).

Apesar da presença de mineração produzir uma entrada semicontínua de metais nos sistemas fluviais (Hatje et al., 2017), de acordo com Macklin et al. (2006) as falhas nas barragens de rejeitos promovem uma liberação rápida de grandes volumes de água e sedimentos contaminados e podem causar perturbações na geomorfologia e geoquímica dos sistemas fluviais receptores.

Ao longo das últimas quatro décadas os rompimentos de barragens de minério ocorreram com maior frequência, sendo casos de destaque apresentados no próximo tópico; a falha da barragem de Porco na Bolívia em 1996, o desastre de Aznalcóllar em 1998, na Espanha, a falha em Maramureş County, Romênia em 2000, além dos casos brasileiros ocorridos em Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, no estado de Minas Gerais.

2.1. Rompimentos de barragens no mundo

O caso dos rompimentos da barragem de rejeitos da mina de El Porco na Bolívia, a 50 km de Potosí, liberou 400.000 toneladas de rejeitos, com parte destes atingindo o Rio Pilcomayo (Smolders, 2003). A falha ocorreu em 19 de agosto e 1º de setembro de 1996, e a liberação dos rejeitos resultou em enorme mortandade de peixe rio abaixo (Hudson-Edwards, 2001).

Após a falha na barragem de El Porco (Bolívia), Macklin et al. (1996) observaram níveis de contaminação muito elevados no rio Pilcomayo e no afluente Pilaya. As coletas de água próximas ao rompimento da barragem apresentaram alta concentração de chumbo, ocorrendo a diminuição de sua concentração gradualmente

ao longo de 50 km. Smolders et. al. (2003) avaliaram os rios a jusante e encontraram menores concentrações de contaminantes, graças aos processos de sedimentação e forte diluição dos resíduos minerais por sedimentos mais “limpos” vindos dos afluentes (Hudson-Edwards, 2001, Smolders *et.al*, 2001). De acordo com Macklin (1996), no relatório do incidente produzido pela Subsecretaria de Meio Ambiente da Bolívia, nos primeiros 50 km ocorreu 87% da contaminação da água, sendo os dois primeiros quilômetros a jusante da barragem os mais prejudicados.

Segundo Kossoff et al. (2014), não houve operação de limpeza realizada após o acidente de El Porco (Bolívia), e apesar disso, a médio e longo prazo, o derramamento não demonstrou efeitos adversos claros e duradouros na qualidade da água.

Ao contrário do desastre de El Porco, o desastre ocorrido em Aznalcóllar, Espanha (1998) tornou-se ao longo dos anos um dos casos mais estudados de contaminação por rejeitos de barragem, principalmente pela campanha de limpeza realizada após o desastre.

Tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo, é considerado o maior acidente de poluição ambiental registado na história espanhola. Dentro dos locais impactos está o Parque Donana, a maior reserva de espécies de aves da Europa, declarado Reserva da Biosfera pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura - UNESCO (Grimalt et al., 1999, Kossoff et. al., 2014).

Em 25 de Abril de 1998, a barragem de rejeitos da mina de Aznalcóllar (localizada a cerca de 25 km a noroeste de Sevilha, sudoeste de Espanha) ruiu e inundou com 4hm³ de lama sulfurosas, os vales dos rios Agrio e Guadiamar (Domènech et al., 2002). Segundo López-Pamo et al. (1999) ao longo de 45km, uma camada de lama com espessura entre 5 cm e 1m, cobriu 2.600 ha de margens de rios e terras agrícolas adjacentes. Aproximadamente 2 milhões de m³ de lama tóxica, contendo grandes quantidades de metais pesados, e 4106 m³ de água ácida invadiram os canais e planícies aluviais destes rios. Por causa do tipo de resíduo contido na lama (pasta de pirita) havia grande possibilidade de solubilização progressiva dos metais por oxidação, sendo urgente a retirada da lama (Grimalt et al., 1999).

Após 4 meses do acidente a maior parte da lama já havia sido removida (Domènech et al., 2002). No entanto, de acordo com Benito et al. (2001) e Macklin et al. (2003), um sistema fluvial altamente instável foi criado, pois, operações de limpeza removeram além de resíduos e sedimentos, a vegetação dos canais e fundo do vale. Segundo Kossoff et al. (2014), este solo exposto resultou em margens e leito erodidos no alto do Rio Guadamar e em altas taxas de sedimentação na parte baixa desta bacia. Houve neste período, o aumento da contaminação da bacia hidrográfica por liberação de sedimentos contaminados por atividades mineiras históricas (pré-derramamento).

No entanto, em médio a longo prazo, o processo de limpeza teve efeito positivo e as concentrações de contaminantes metálicos nas águas superficiais diminuíram, e estão dentro dos limites aceitáveis da União Europeia (Turner, 2003, Kossoff *et. al.* 2014).

Outro rompimento de barragem de grande proporção ocorreu em 10 de março de 2000, em Maramureş County, Romênia. O rompimento aconteceu ao longo de 30 m e profundidade de 25 m da barragem, liberando no Rio Novaţ aproximadamente 100.000 m³ de água contaminada e 20.000 t de resíduos sólidos ricos em minerais (PNUMA, 2000, Macklin, 2003).

De acordo com Hatje (2017), o grau de operações de remediação pós-evento realizadas difere consideravelmente entre este e o acidente de Guadamar; onde houve um programa de limpeza extenso com remoção física dos rejeitos da área do derrame, o que facilitou a recuperação final do sistema fluvial; já no acidente de Novaţ-Roşu nenhuma operação deste tipo foi realizada e a recuperação do sistema foi o resultado de processos naturais. Porém, ao contrário do que aconteceu com o Rio Pilcomayo, não houve forte recuperação natural e a falta de intervenção antrópica inicial fez com que grandes quantidades de sedimentos contaminados permanecessem no Rio Novaţ podendo sofrer remobilização ao longo da bacia hidrográfica.

Contudo, após a reparação da barragem e a contínua diluição dos sedimentos realizada pela água não afetada pelo acidente vinda dos afluentes, não houve um

impacto a longo prazo na qualidade da água no Rio Viçeu que se recuperou do evento em aproximadamente 4 meses (Macklin, 2003; Hatje, 2017).

A recuperação da qualidade da água de rios que sofrem com desastres de rompimento de barragens de minério pode acontecer, portanto, com diferentes níveis de intervenção humana, tendo outros fatores influenciadores, como a diluição da contaminação por parte dos afluentes e a remoção e transporte dos sedimentos que são depositados nas margens e nos leitos. No caso dos desastres desse tipo no Brasil as intervenções antrópicas em forma de limpeza da lama não ocorreram de forma imediata (SISEMA, 2021; Mendes et. al. 2022).

Em Brumadinho, Minas Gerais, em 25 de janeiro de 2019, ocorreu a mais recente grande catástrofe com barragens de minérios brasileiras, provocada pelo rompimento da barragem de rejeitos B1 referente a mina Córrego do Feijão, de propriedade da Vale S.A. (Pissara, 2022). Segundo Mendes et. al. (2022), cerca de 11,7 Mm³ de rejeitos de ferro e manganês percorreram o fundo do córrego Ferro-Carvão até a confluência com o Rio Paraopeba (8,9 Mm³), com parte deste entrando no leito do Rio Paraopeba (2,8 Mm³).

De acordo com o Caderno das Ações de Recuperação da Bacia do Rio Paraopeba (SISEMA, 2021), foi previsto a dragagem do rio em 45km, partindo do Marco Zero até a Termoelétrica Igarapé. Entre 15/08/2019 e 25/11/2021, as operações de dragagem foram realizadas e removeram um total de 82.971 m³ de rejeito do rio Paraopeba. Ainda de acordo com o documento do Sistema Estadual do Meio Ambiente - SISEMA, em 2021, decorridos quase 3 anos do desastre, ainda foram observados neste rio valores acima do limite legal de turbidez (100 NTU) nos períodos chuvosos.

Mendes et. al (2022) em um estudo prognóstico acerca de concentração de sedimentos na água no rio Paroapeba fez uma projeção de 7 a 11 anos, para o retorno à condição pré-rompimento. Segundo Kossoff et. al. (2014), é muito difícil prever com precisão a recuperação dos sistemas fluviais após um derrame de rejeitos em grande escala, com ou sem remediação.

Além desse grande desastre ambiental, quatro anos antes, Minas Gerais havia sido assolada por outro acidente similar. No município de Mariana, ocorreu o desastre

da barragem do Fundão, onde as medidas de recuperação promovidas aconteceram de maneira ainda mais lenta (Palu, 2019).

2.2. Desastre de Mariana

O Laudo Técnico Preliminar do IBAMA (2016) classifica os desastres quanto à intensidade, evolução e origem. O desastre em Mariana, quanto à intensidade, classifica-se como Desastre de Nível IV, “desastre de muito grande porte”, conforme classificação da Defesa Civil Federal.

A barragem de rejeitos de Fundão, localizada em Mariana, Minas Gerais, possuía 120 m de altura e foi projetada para armazenar rejeitos da mineração de ferro. No dia 5 de novembro de 2015, houve o rompimento da Barragem de Fundão, com a liberação de 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos de ferro e manganês, classificados como não perigosos e não inertes conforme NBR 10.004 (IBAMA, 2016). Ainda segundo o laudo do IBAMA (2016), a grande concentração de sedimentos causou a morte de aproximadamente três toneladas de peixes e afetou cerca de 430 mil pessoas, causando 19 mortes (Palu, 2019).

A onda de inundação gerada ultrapassou a barragem de rejeitos a jusante, denominada Santarém, destruiu o distrito de Bento Rodrigues, e danificou cidades vizinhas (Botelha e Melo, 2019). A lama viajou por aproximadamente 670 km, sendo carregada através do Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce até sua foz no oceano Atlântico, passando em seu caminho por quatro reservatórios de usinas hidroelétricas (Marciano, 2024).

Segundo o IBAMA (2016), restavam 16 milhões de metros cúbicos que continuavam sendo carregados, aos poucos, para jusante e em direção ao mar, no estado do Espírito Santo, e que ainda poderiam afetar a recuperação do rio. Além deste desastre sem precedentes na bacia do rio Doce, há de se considerar também que ela já sofria degradação ambiental de diversos tipos, inclusive mineral, antes do desastre (IGAM, 2010).

O último laudo do ano de 2014 das barragens Germano e Fundão, informa que os rejeitos eram compostos basicamente por óxido de ferro e sílica (IBAMA, 2016). É

importante considerar que a exploração de minério de ferro pela empresa Samarco iniciou-se no ano de 1973 em Mariana/MG, e soma-se a esta a considerável presença de garimpo de ouro desenvolvido ao longo de séculos, que ainda que reduzida, a atividade ainda acontece no Rio do Carmo (atingido pela lama de rejeito de Fundão).

Segundo Costa (2001), ferro e manganês e os metais pesados porventura oriundos de atividades de extração apresentam riscos consideráveis de contaminação porque não se degradam e permanecem solubilizados nas águas ou precipitados nos sedimentos depositados. Ainda de acordo com o laudo do IBAMA (2016), a água do rio Doce ainda estaria sujeita as variações decorrentes da sedimentação dos rejeitos com aumentos da vazão, intervenções físicas abruptas no rio e outras ações antrópicas que produzam degradação e transporte de sedimentos acumulados na sua calha.

Os primeiros 80 quilômetros da bacia foram os mais impactados pelos rejeitos, nos trechos dos rios Gualaxo do Norte e Carmo (Botelha e Melo, 2019). Segundo Nogueira (2019) o rejeito do processo de beneficiamento do minério de ferro é composto por minério de ferro, areia e água, que quando agregado aos materiais diversos carregados pela lama, formou um “tecnossolo” instável, com distintos atributos químicos e profundidade variável, que foi depositado nas margens dos rios nas áreas degradadas.

É essencial que remoção, destinação e o tratamento *in situ* dos rejeitos e dos rios afetados sejam adequados, para restaurá-los o mais próximo possível aos padrões pré-desastre. Estima-se que a maioria desses sedimentos contaminados e rejeitos estejam depositados no leito e nas margens dos rios Gualaxo do Norte e Carmo (pertencente a confluência formadora do rio Doce) seguindo este último trecho até a UHE Risoleta Neves (IBAMA, 2016).

2.3. Sedimentos contaminados

Segundo Pyle et. al. (2022), as respostas geomórficas às alterações na carga e descarga de sedimentos que resultam de perturbações tanto antropogênicas quanto

naturais, estão conectadas à criação dos padrões geoquímicos e à remobilização de contaminantes ligados aos sedimentos (Macklin, 1996).

Apesar da ocorrência de diluição dos sedimentos, um derramamento de rejeitos como de Mariana gera efeitos agudos e graves. A médio e a longo prazo, as influências de um despejo de lama de minério na biota de uma bacia hidrográfica são agregadas as da contaminação continuada de menor intensidade (Macklin, 2003). É evidente, então, que os efeitos negativos deste tipo de desastre serão cumulativos com os originados pela contaminação crônica.

Em águas superficiais naturais, com condições de pH e Eh iguais as da maioria dos ambientes, as partículas de granulação fina têm capacidade de absorver metais pesados e outros contaminantes, e pode-se considerar que uma porção significativa da carga metálica total é transportada na fase particulada (Hudson-Edwards, 2001). Estes sedimentos e os metais interligados são depositados em planícies aluviais e zonas úmidas ribeirinhas durante o transporte, o que forma os sumidouros finais para a deposição e armazenamento de metais pesados nas bacias hidrográficas (Macklin et al., 1992).

Para Hudson-Edwards et al. (2003), a base científica concorda que os metais associados aos sedimentos seguem os caminhos de transporte de outros elementos, sendo previsível os seus padrões de deposição e armazenamento de acordo com a geomorfologia da planície de inundação e os estilos de sedimentação do canal.

Considerando a deposição de sedimentos em planícies aluviais, é provável que o material contaminado da planície de inundação seja uma importante fonte secundária de metais contaminantes por meio de processos de erosão fluvial, assim como margens de rios, podendo ser focos de processos de dragagens, ou outros tipos de tratamentos de recuperação do solo marginal e do rio afetado (Costa, 2001).

Kossoff et. al. (2014), observaram que concentrações significativas de resíduos contaminantes estavam presentes nos solos das planícies aluviais, e a localização destas áreas de depósitos de sedimentos e rejeitos ocorrem principalmente em locais onde a sinuosidade do rio aumentou e os gradientes dos rios diminuíram, por permitirem o depósito de partículas mais finas. Estas características são encontradas em confluências entre dois cursos d'água.

Como já citado anteriormente, o caminho da lama da barragem de Mariana percorreu o Rio do Carmo e atravessou a confluência entre este rio e o rio Piranga, formadores do Rio Doce, como mostrado na Figura 1. Nesta imagem também é possível observar que, ainda que o rio Piranga não tenha sido o curso de transporte da lama, esta adentrou cerca de 800m no rio Piranga em seis dias depois do acidente.

Figura 1 - Confluência do Rio do Carmo e rio Piranga - 6 dias depois do rompimento da barragem.



Fonte: Google Earth (2024).

Confluências fluviais são de fundamental importância e preocupação no campo da engenharia hídrica, sedimentologia ou geomorfologia devido à complexidade das interações de que ocorrem em seu fluxo, bem como à irregularidade na carga de sedimentos e no tamanho dos sedimentos do leito (Birjukova, 2014). É de se considerar, portanto, a influência desta confluência na recuperação do rio Doce.

2.4. Zona de confluência

De acordo com Dos Santos e Stevaux (2017), os estudos sobre processos geomorfológicos em confluências começaram na década passada, sendo o interesse

sobre o assunto decorrente da consciência de que as características da bacia hidrográfica a montante são resumidas nos processos fluviais e na morfologia das confluências, que conjuntamente, são agentes cruciais no controle das mudanças de circulação da água e sedimentos na rede de drenagem a jusante.

Na América do Sul estudos já foram realizados, na confluência do rio Paraná com o rio Paraguai, em Corrientes, Argentina (Parsons et al. 2007), assim como do lado brasileiro desta confluência (Paes, 2007; Stevaux, 2017). Outra confluência bastante estudada é a do rio Negro e Solimões, no Amazonas (Franzinelli, 2011). Mais recentemente, Marciano et. al (2024) realizou pesquisas sobre a hidrodinâmica, transportes de sedimentos e qualidade da água de confluência do rio Doce.

As zonas de confluência hidrodinâmica (ZCH), que ocorrem na região de encontro de águas entre o rio principal e seus afluentes, são essenciais para entender o funcionamento da dinâmica do sistema fluvial. Essas regiões são importantes locais em redes de drenagem onde, a hidrodinâmica, o transporte de sedimentos e a morfologia dos canais sofrem mudanças importantes que influenciam vários aspectos ecossistêmicos (Kenworthy e Rhoads, 1995). Essa interface de mistura pode percorrer vários quilômetros depois da confluência (Bouchez et al., 2010).

Segundo Assireu (2021), diversos trabalhos demonstram que a ZCH possui alta complexidade, sendo a razão de momento, a velocidade, o ângulo entre os canais confluentes e o tipo de variação batimétrica fundamentais no comportamento hidromorfológico do canal. A dinâmica da confluência é afetada diretamente pelo ângulo de junção e pela descarga de cada canal, ou seja, estas demonstram se é o canal principal ou o canal do tributário que está em dominância (Paes, 2007).

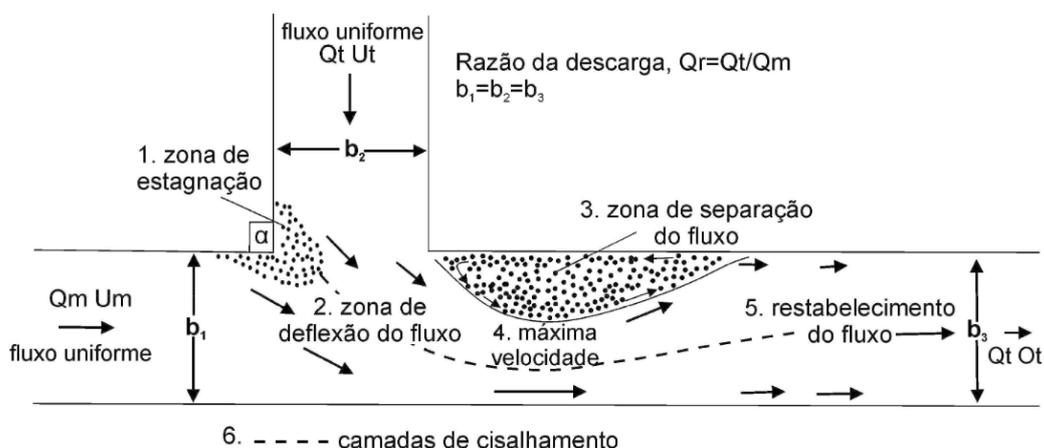
Existem dois tipos de confluências, a simétrica e a assimétrica, sendo as assimétricas as mais encontradas na natureza. Segundo Bradbrook, Lane e Richards et al. (2001), a diferença de curvatura plana é o motivo de distinção entre as junções, pois é o principal fator de controle que separa as confluências em Y (simétrica) das confluências assimétricas.

As confluências fluviais assimétricas, acontecem onde o canal pós-confluência forma uma extensão linear do canal principal a montante, enquanto em confluências em forma de Y, os dois afluentes são geometricamente simétricos (Paes, 2007).

2.4.1 Confluência assimétrica

Best (1987) formulou um modelo conceitual que distingue seis zonas hidrodinâmicas (Figura 2) que podem ser encontradas, zona de deflexão, estagnação, separação, máxima velocidade, de cisalhamento lateral (mistura) e zona de recuperação do escoamento.

Figura 2 – Modelo de confluência assimétrica.



Fonte: Assireu (2021).

A zona de deflexão acontece na entrada do tributário no canal principal o que provoca uma curvatura no escoamento, por isso, segundo Shakibainia et. al. (2010) tem como principal característica a variação na direção dos vetores de velocidade do fluxo e a elevação da superfície. O encontro entre os dois fluxos gera a formação de vórtices verticais característicos da camada de mistura (Best, 1987).

A zona de estagnação ocorre em efeito da deflexão de ambos os fluxos. O escoamento tributário age como um obstáculo para o escoamento vindo do canal principal (Birjukova, 2014). Isso produz o aumento da pressão e da profundidade conjuntamente a redução da velocidade do escoamento e da tensão de atrito (Best, 1987; Biron et al., 1996). Estas velocidades próximas de zero formam a área de deposição que é formada no canto da junção a montante.

A zona de separação é criada pela mudança na direção do fluxo, e forma-se na margem de entrada do tributário, a jusante da junção. Esta zona fornece área de fluido de baixa velocidade, de modo que o sedimento é depositado e forma uma barra (Best e Reid, 1987). Por sua localização, esta influencia na largura do canal pós-confluência, diminuindo a seção de fluxo. Por se tratar de uma zona de baixa pressão com recirculação do fluxo, normalmente é composta por sedimentos finos (dos Santos e Stevaux, 2017). Tanto o aumento do ângulo de confluência quanto o da razão de descarga entre o afluente e o canal principal relacionam-se ao aumento das dimensões da zona de separação (Best, 1988).

A zona de máxima velocidade forma-se entre a margem oposta ao tributário e a zona de separação do escoamento, sendo caracterizada por velocidades de escoamento elevadas (Baeta, 2018). É formada pela redução da área de escoamento provocada pelo aumento da largura da zona de separação (Best, 1987; Biron et al., 1996).

A zona de cisalhamento lateral ou camada de mistura é gerada pelo contato entre a zona de separação e a zona de velocidade máxima, e é caracterizada por maior intensidade de turbulência verticais e longitudinais, e por elevados gradientes de velocidade verticais (Biron et al., 1996). Nesta camada estão presentes diversos vórtices que atuam no crescimento das tensões de corte próximas ao leito, estas tensões e o aumento da velocidade do escoamento, causam erosão dos leitos dos rios (Best, 1987, Baeta, 2018), também conhecidas como zonas de escavação da confluência fluvial (Mosley, 1976). São depressões no canal principal oriundas da erosão do leito da qual a orientação é bissecta ao ângulo de confluência, e normalmente a profundidade está relacionada a ângulos de junção retos, com baixa relação em ângulos superiores a 100° (Kominecki, 2022).

A zona de recuperação do escoamento começa depois da zona de separação do escoamento e da zona de mistura (Best, 1987). A dinâmica da confluência perde gradualmente sua influência, e a intensidade turbulenta é reduzida, diminuindo também as velocidades transversais e verticais (Baeta, 2018).

2.4.2 Confluência simétrica

Em confluências simétricas, o ângulo de entrada dos dois canais é igual, e isso causa variações nas zonas hidrodinâmicas e em suas localizações. Mosley (1976) apresentou um modelo com as estruturas e zonas presentes em confluências do tipo simétrica (Figura 3). Nele pode ser observado a presença de uma zona de escavação, zona de sedimentação e zona de transporte de sedimentos.

A zona de escavação ocorre logo após o encontro entre os dois escoamentos, produzindo elevação da superfície da água, com alta pressão no centro do canal e baixa pressão nas margens (Mosley, 1976). A diferença de pressões que faz com que haja fluxo divergente no leito e fluxo convergente na superfície, produzindo uma camada de mistura vertical de células rotativas ou helicoidais (Parsons et. al., 2008).

Segundo Dos Santos e Stevaux (2017), podem existir células gêmeas rotativas que se movimentam em sentidos opostos ou uma única célula que gira no sentido horário, o tipo que será formado está relacionado à simetria e à discordância entre leitos (Bradbrock et al., 2000; Bradbrock et al., 2001).

É esperado que células gêmeas segreguem os fluxos dos dois rios e conseqüentemente suas cargas de sedimentos a jusante da confluência, o que reduz a mistura do fluxo (Biron et al., 1996), já em casos de uma única célula há ressurgência na camada de cisalhamento, o que aumenta a mistura (Best e Roy, 1991).

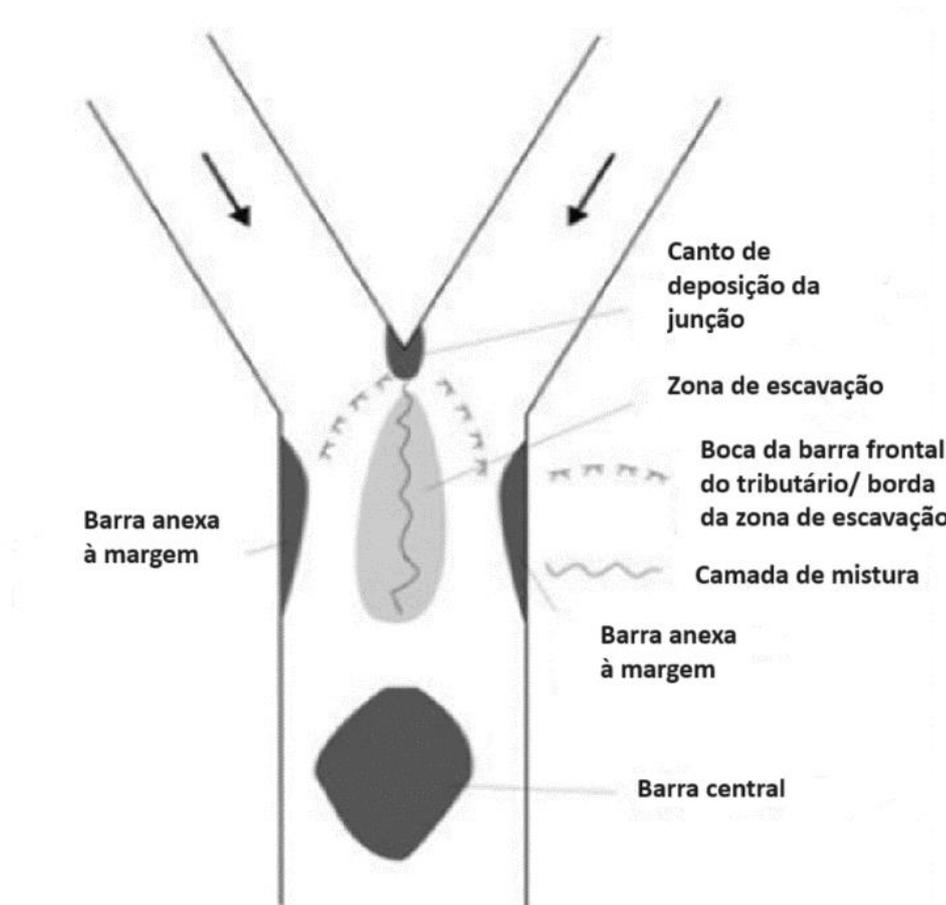
Segundo Ashmore et al., (1992), Bridge (1993) e Dos Santos et. al (2019) estas células são responsáveis pela formação de erosões no leito dos rios e ressurgência nas margens (Bradbrock et al., 2000).

A zona de sedimentação anexa a margem é causada, de acordo com Dos Santos e Carvalho (2018), pela relocação do material do fundo do canal para a superfície, devido aos movimentos helicoidais, resultando em erosão, transporte e deposição de parte destes sedimentos nas margens opostas e mais a jusante. Estas zonas serão chamadas nesse estudo de barras laterais, como em Silva et al., (2013).

Já a zona de sedimentação central é formada graças à convergência dos caminhos de transporte de sedimentos que acontecem a jusante da área de junção,

onde os sedimentos tendem a ser encaminhados no entorno, ao invés de atravessarem a área (Mosley, 1975; Best, 1985; Best e Rhoads, 2008), o que torna o centro uma área de baixa velocidade. Deste modo, em junções simétricas, depósitos centrais geralmente se formam no canal pós-confluência (Ashworth, 1996). Para facilitar o entendimento, será utilizada a mesma nomenclatura oferecida por Silva et al., (2013), sendo esta estrutura reconhecida por barra central.

Figura 3 – Modelo de confluência simétrica.



Fonte: Adaptado de Samir et. al. (2022).

Uma zona de transporte de sedimentos ou cisalhamento, ocorre em volta da barra central, causada pelo fluxo que é divergido, o que causa erosão das margens e aumento da largura do canal, e em alguns casos de variação das vazões, o fluxo pode ser direcionado mais para um lado do que do outro da barra central (Mosley, 1976).

Dentre essas zonas, são importantes para este estudo as zonas de estagnação e separação por serem áreas de acúmulo de sedimentos, locais onde os rejeitos da barragem do Fundão podem estar sedimentados e sofrerem recondução ao longo dos anos, podendo esta evolução ser observada através de imagens de alta resolução.

2.5. Imagens digitais e seu processamento

Gonzalez e Woods (2010) definem imagem monocromática como uma função bidimensional de intensidade luminosa, em que x e y são coordenadas espaciais, e a amplitude de sua função em qualquer par dessas coordenadas é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Quando uma imagem possui informações em distintas bandas de frequência, há uma função $f(x,y)$ para cada banda, como ocorre com imagens coloridas RGB, da banda do visível, que são formadas por dados de cores primárias, sendo respectivamente, R para vermelho (red), G para verde (green) e B para azul (blue) (Marques Filho e Vieira Neto, 1999).

Quando esses valores, assim como, x e y são quantidades finitas e discretas, tem-se uma imagem digital, sendo sua principal fonte de energia o espectro eletromagnético, do qual o uso das bandas do visível em conjunto com a banda infravermelha é o mais rotineiro nas atividades de processamento (Gonzalez e Woods, 2010), assim como realizado neste estudo.

Os instrumentos eletro-óptico capazes de obter imagens, desde o comprimento de onda da luz visível azul até a região termal, simultaneamente da superfície terrestre, são conhecidos como sensores imageadores multiespectrais, sendo a projeção destes estimulada pelo desenvolvimento e construção de satélites artificiais, para obtenção de informações sobre a Terra, a partir do espaço (Menezes e Almeida, 2012).

O processamento e a interpretação automática de imagens captadas por satélites auxiliam os trabalhos nas áreas de Geografia, Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento, Agricultura etc. (Marques Filho e Vieira Neto, 1999). Segundo Menezes e Almeida (2012), isso se deve ao fato de serem imagens digitais que podem ser obtidas de forma repetitiva ao longo dos anos e poderem ser obtidas em centenas

de bandas espectrais, de forma a serem incomparáveis para monitoramento dos eventos e mudanças ambientais.

No entanto, Gomes et. al (2021) expõem que uso do sensoriamento remoto por meio de imagens digitais pode ter algumas limitações, como a resolução espacial baixa de alguns sensores, a exemplo do AVHRR/NOAA e MODIS/Terra (Da Silva, 2016) e possível baixa periodicidade das imagens, como a série Landsat (Liesenberg et. al., 2007). Para suprir essas limitações podem ser oferecidos dados com melhor resolução, porém, estes geralmente não são gratuitos.

Outra alternativa utilizada atualmente são as imagens captadas por veículo aéreo não tripulado. As aeronaves remotamente pilotadas (ARP) ou drones, como popularmente são conhecidos, são aeronaves não tripuladas utilizadas para fins experimentais, comerciais ou institucionais (Taglirini, 2020). Novos sensores e plataformas desse tipo possibilitam a utilização de sensores de alta resolução, que podem extrair informações mais detalhadas da superfície terrestre com a resolução temporal desejada (Honkavaara et al., 2013; Dash, Pearse e Wantt, 2018).

Apesar do uso de ARP ser uma alternativa para a captura de imagens de altas resoluções com menores periodicidades quando comparado ao uso de satélite, alguns estudos propõem que seja realizado o uso integrado de ambas as plataformas (Gomes, 2021). Como no caso de desastres ambientais, em que sua imprevisibilidade e grande impacto faz jus a necessidade de combinar a constância das imagens digitais obtidas por satélite com a alta resolução e detalhismos das imagens de ARPs, oferecendo maior base de dados para seu processamento e geração de produtos de melhor qualidade.

O processamento de imagens tem a função básica de preparar uma imagem de alto contraste visual, a fim de que se possa explorar e otimizar a análise dos dados, de forma eficiente, diminuindo tempo e custo (Menezes e Almeida, 2012). O campo de aplicações do processamento digital é considerado bastante amplo, sendo observados diversos usos para os recursos disponíveis em imagens digitais.

As imagens digitais são compostas por um número finito de elementos, que possuem valores e localização específicos, mais conhecidos como pixel (Gonzalez e Woods, 2010). Os pixels podem ter seus dados trabalhados em função dos números

digitais (ND) de cada pixel individualmente, ou em conjuntos de pixel vizinhos (Menezes e Almeida, 2012).

Os procedimentos e tratamento desses dados normalmente são expressos sob forma algorítmica, logo a maioria das funções de processamento de imagens pode ser implementada via software (Marques Filho e Vieira Neto, 1999), como o ArcGis, AutoCad, Qgis, entre outros.

Segundo Menezes e Almeida (2012), o processamento de imagens disponibiliza para o usuário a aplicação de uma grande variedade de técnicas de processamento que trazem rapidez e robustez para a análise, dentre elas, são amplamente utilizadas técnicas de sensoriamento remoto e o geoprocessamento.

2.5.1. Assinatura Espectral

As diferenças de características biofísicas e químicas dos objetos presentes na superfície da terra produzem variações na absorção e transmissão de radiação eletromagnética em proporções que causam distinções nos comprimentos de onda (Cabral et al., 2003). Essa é a grande potencialidade do Sensoriamento Remoto, poder registrar os objetos em imagens e utilizar essas distinções espectrais para identificar e avaliar alterações em objetos estudados

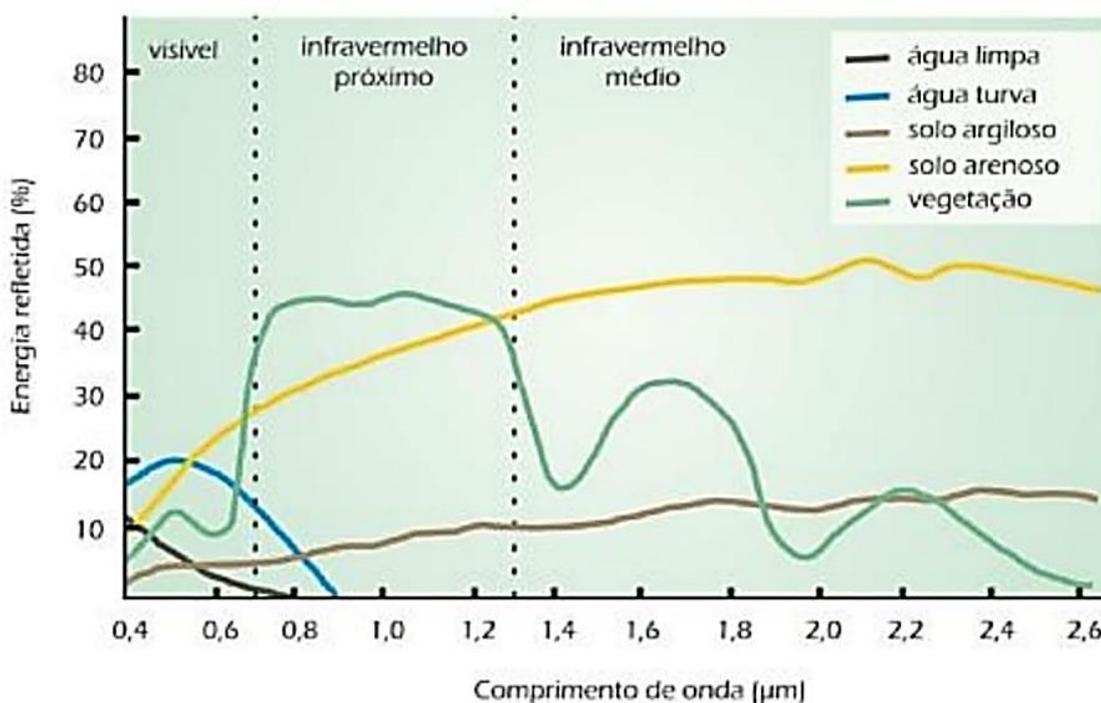
Segundo Florenzano (2011), o solo apresenta um comportamento mais uniforme ao longo do espectro, refletindo mais na região do infravermelho do que a água. Esta última, em estado puro, tem o comportamento de refletir pouca radiação no espectro do visível (0,4 – 0,7 μ m), e absorver praticamente toda a energia na região do infravermelho (0,7-1,3 μ m). Essas assinaturas espectrais podem ser vistas na Figura 4.

A presença de materiais diversos (organismos, partículas em suspensão e clorofila) em diferentes concentrações causam variações no espectro da água (Batista Ferreira e Pereira Filho, 2009).

De acordo com Breunig et. al (2007), quando há aumento da concentração de sólidos em suspensão na água, há um aumento da reflectância em direção aos

comprimentos de onda mais longos. A reflectância se eleva e se mantém consideravelmente constante na faixa entre 500 e 700nm em águas turvas. Já na região do infravermelho é observado a existência de reflectância, o que não acontece em águas puras (Novo, 2001). Segundo Barbosa et. al. (2019), considerando as características do desastre, pode-se perceber um relacionamento direto entre a descarga do rio Doce e a turbidez, pois grande quantidade de resíduo de minério foi adicionada aos rios e carreado para o oceano.

Figura 4 - Curva espectral dos objetos (vegetação, solo e água).



Fonte: Florenzano (2011).

Com a grande carga de minérios presentes nas águas da região estudada, a resposta espectral de sólidos suspensos e água turva passa a ser determinante para o entendimento dos rios da confluência.

Uma análise espectral foi realizada por Rudorff et al. (2018) na região da foz do rio Doce, em que a metodologia utilizada propunha quantificar o impacto do acidente utilizando imagens dos sensores Landsat-8/OLI e MODIS/Aqua. No estudo, os autores utilizaram um modelo de duas bandas para estimar os níveis de turbidez

dessa região entre 2013 e 2017, encontrando valores mais altos desde novembro até maio de 2017 indicando efeitos na água pós acidente.

Ainda neste trabalho, Rudorff et. al., (2018) constataram que em dezembro de 2013 havia ocorrido a maior pluma de turbidez, com grande vazão decorrente de eventos de chuva na região de foz do rio Doce, com descarga observada de 5.566 m³/s, cerca de 6 vezes maior do que a vazão máxima pós-acidente, de 960 m³/s.

2.5.2. Índices espectrais

Além da utilização de imagens digitais e assinaturas espectrais dos objetos para análise espectral, as diferenças entre essas assinaturas podem ser utilizadas em diferentes maneiras, com o uso de cálculos e equações. Como os chamados índices espectrais, que são combinações entre bandas usadas na discriminação de informações com outros alvos de semelhança espectral (Ponzoni et al., 2012).

O uso de sensoriamento remoto em pesquisas sobre a evolução de bancos de sedimentos já foi realizado por Silva et. al., (2013) que utilizaram imagens de satélite para vetorização das imagens em composição RGB; Resende, Carvalho e Guerra (2015) que utilizaram fotografias aéreas ortorretificadas e classificação supervisionada para a delimitação dos bancos de sedimentos; Wen et. al. (2020) que semelhante a este estudo, extraíram bancos de sedimentos através de imagens de Landsat com uso de NDWI, acrescentando o uso de histograma da água para classificação automática de barras centrais, Rademann (2023) em que usou imagens RapidEye e classificação manual supervisionada para extração dos depósitos de sedimentos; entre outros.

Dentre os índices espectrais, quando se trabalha com recursos hídricos, o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) é normalmente indicado para delinear corpos d'água e melhorar as características relacionadas com a água dentro das imagens de sensoriamento remoto (Gao et. al., 1996). O índice desenvolvido por McFeeters (1996), tem a intenção de maximizar a refletância das características da água com comprimentos de onda de luz verde, minimizar a baixa refletância do

infravermelho pela água e aproveitar o fato de que solo e vegetação têm alta refletância do NIR para aumentar a distinção visual.

Atualmente, é usado vastamente em aplicações de geoprocessamento, pesquisas científicas, e recursos hídricos (Pereira e Guimarães, 2018). Pode ser usado para detectar corpos de água (Özelkan, 2020), analisar áreas úmidas e inundadas (Pereira, 2018), ou em conjunto com outros índices (Vivek et. al., 2015; Szabo, Gácsi e Bertalan-Balazs, 2016; Zheng, Tang e Wang, 2021).

O NDWI é utilizado para destacar as características da água em imagens digitais, podendo ser usado também para identificação de bancos de sedimentos no interior do corpo d'água, uma vez que proporciona a distinção entre água e solo. Este é calculado através da combinação da banda do verde com a banda do infravermelho próximo, conforme Equação 1 proposta por McFeeters (1996).

$$\text{NDWI} = \frac{(\text{banda verde} - \text{banda infravermelho próximo})}{(\text{banda verde} + \text{banda infravermelho próximo})} \quad (1)$$

Um outro índice utilizado no sensoriamento remoto é o Índice de Solo Exposto (BSI), usado primeiramente por Rikimaru e Miyatake (1997). De acordo com Rouibah e Belabbas (2020), o índice facilita a percepção de áreas de solo exposto; diferenciando-as de outros tipos de cobertura do solo e de vegetações.

O BSI tem sido usado principalmente em pesquisas florestais para diferenciação entre solo exposto e vegetação (Rikimaru et al., 2002; Loi et. al., 2017), para estudos em agricultura (Diek et al., 2017; Tola et al., 2019), e para mapeamento e monitoramento de áreas de solo exposto (Chen et. al., 2004; Zhao e Chen, 2005), como os bancos de sedimentos próximos as mata ciliares. De acordo com as bandas dispostas, para o cálculo do índice foi utilizada a Equação 2 usada por Jamalabad e Abkar (2004) e Ribeiro et. al., (2022).

$$BSI = \left[\frac{(\text{banda vermelho} + \text{banda verde}) - (\text{banda vermelho} + \text{banda azul})}{(\text{banda verde} + \text{banda infravermelho próximo}) + (\text{banda vermelho} + \text{banda azul})} \times 100 \right] + 100 \quad (2)$$

2.5.3. Limiarização Binária e vetorização

Em conjunto com os índices espectrais, quando se deseja a extração de polígonos específicos para realização de estudos em áreas determinadas, podem ser utilizados métodos para extração dos polígonos desejados, como a operação de limiarização (*thresholding*) que pode ser utilizada para segmentar uma imagem em tons de cinza (Gonzalez e Woods, 2010).

Segundo De Sena Júnior et. al. (2003), a limiarização é utilizada especialmente quando os valores dos pixels apresentam uma distribuição bimodal e intenciona-se classificar as características dos objetos em duas classes, dando origem a uma imagem binária. Nesse caso, é estabelecido um limiar, e os pixels que apresentem valores maiores e menores que o limiar, são distinguidos dos pixels com valores dentro do limiar, gerando dois grupos distintos e a imagem binária.

Com uma imagem binária, os pixels de bordas são mais fáceis de identificar e definir o contorno dos objetos, assim uma posterior vetorização pode permitir uma análise das topologias dos objetos que se deseja identificar (Artero e Tommaselli, 2000).

Este processo permite após a identificação dos alvos de interesse por meio dos índices espectrais, a separação de objetos específicos, como os bancos de sedimentos da confluência do rio Doce, sendo, portanto, de especial valia para o desenvolvimento e metodologia aplicados neste estudo.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado conforme as etapas descritas na Figura 5, com a combinação dos dados encontrados pelos derivadores, com as imagens de alta resolução e os dados de cota e vazão oferecidos pelas estações fluviométricas.

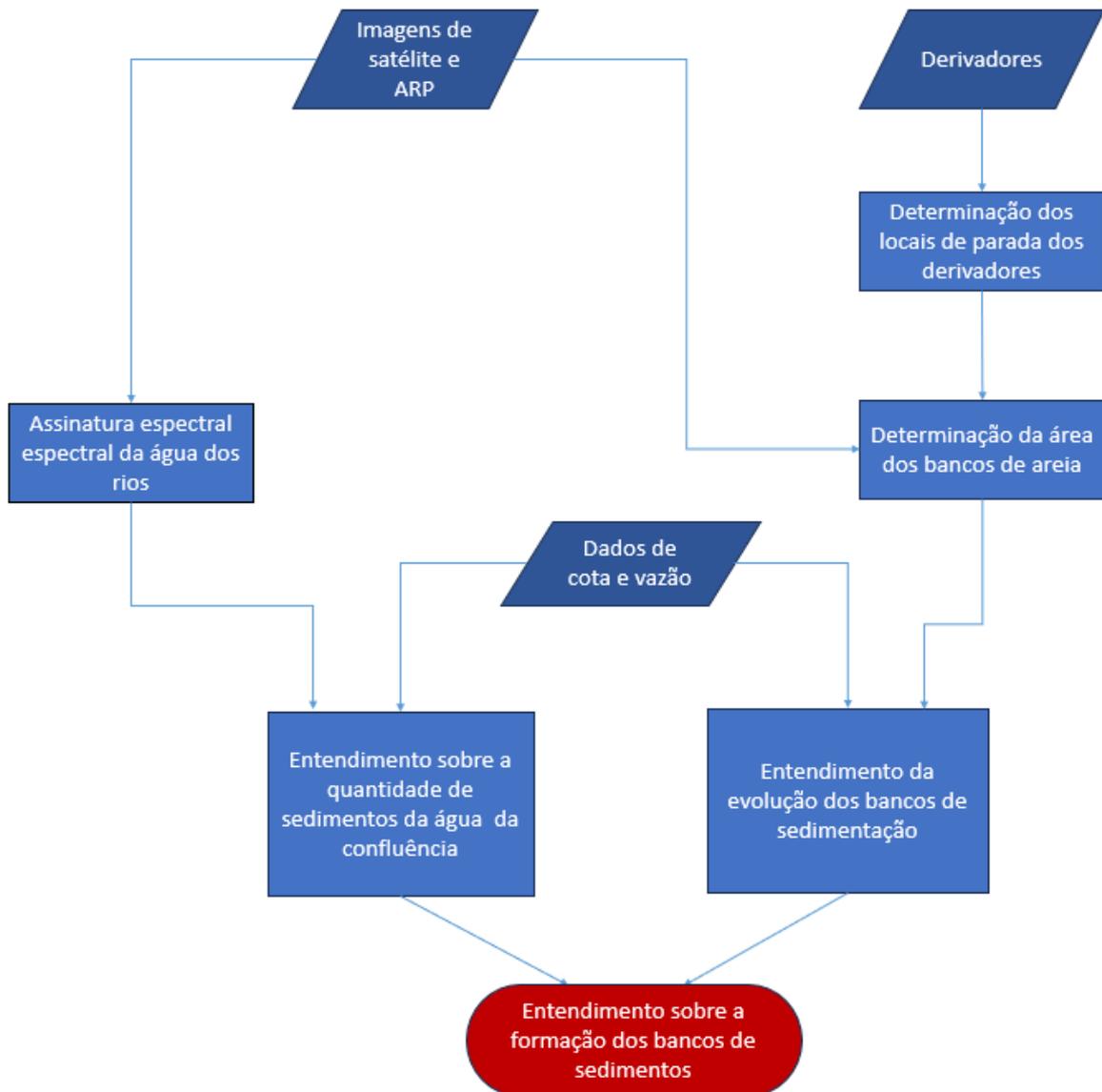
Com equipamentos denominados derivadores, foram realizados experimentos durante as épocas chuvosa e seca, em que os derivadores foram lançados a montante da confluência do rio Doce, no rio do Carmo e rio Piranga, de forma a captarem o comportamento do escoamento fluvial.

Estes dispositivos são levados pela água até encontrarem um local de parada, sendo estes locais considerados possíveis bancos de sedimentos. A partir das imagens de satélite e ARP e geoprocessamento foram obtidos os bancos de sedimentos em diferentes anos. Foram então, calculadas as áreas desses bancos e comparados os valores encontrados, e juntamente com a análise dos dados de cota e vazão, foi possível o entendimento sobre a evolução dos bancos de sedimentação.

Paralelamente, foram utilizadas as imagens para a análise da assinatura espectral de amostras de água de cada um dos três rios da confluência e utilizados os dados de vazão de modo comparativo para entender sobre a quantidade de sedimentos nas águas desses rios e sua influência na confluência do rio Doce.

Por fim, com as informações e os resultados obtidos foi possível compreender a influência dos afluentes na formação e evolução dos bancos de sedimentos encontrados na confluência do rio Doce, assim como alguns pontos de destinação dos resíduos de minério do Desastre de Mariana.

Figura 5 – Fluxograma das etapas da metodologia.



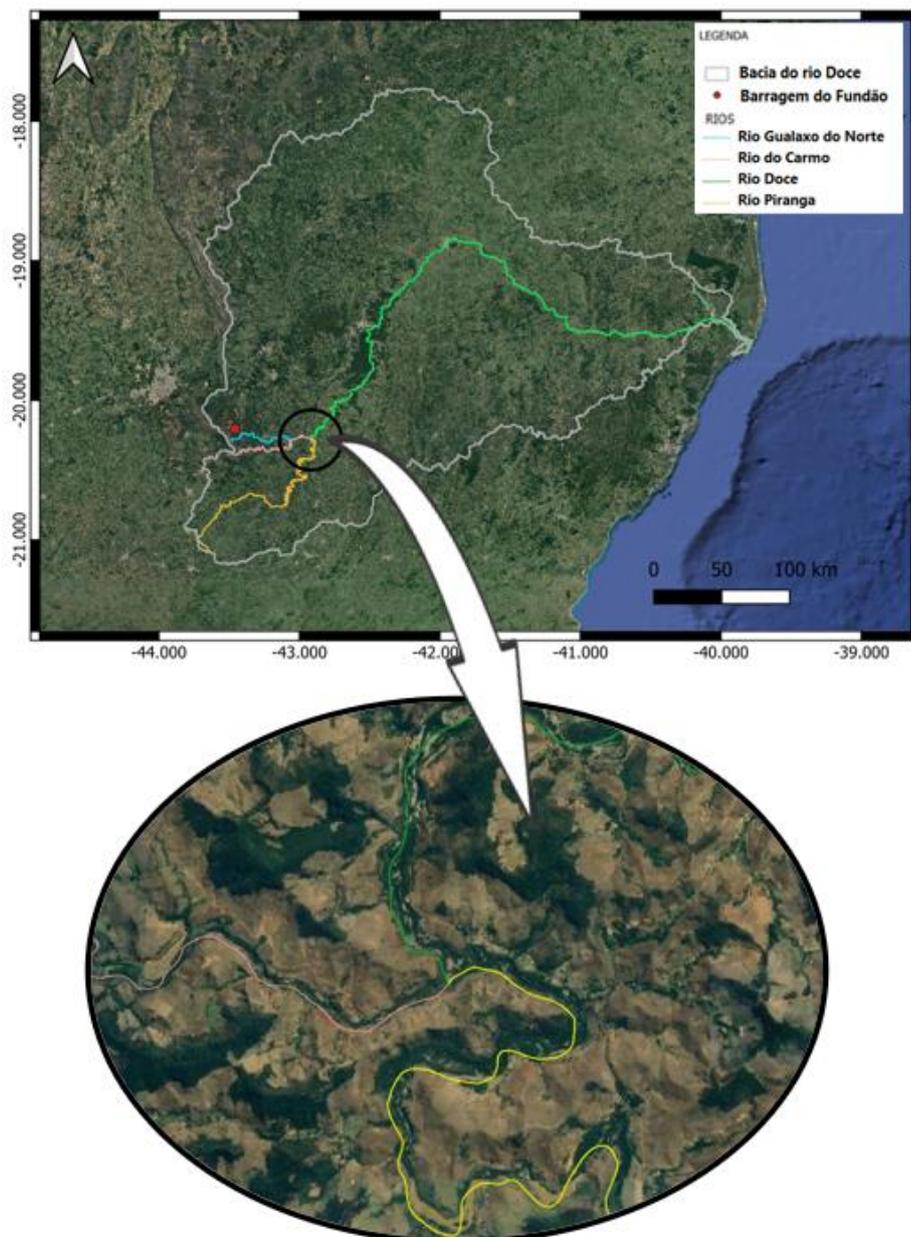
Fonte: Autora (2024).

3.1 Área de estudo

A bacia do rio Doce e seus afluentes, rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Piranga e o local de rompimento da barragem do Fundão, são apresentadas na Figura 6, com destaque para a confluência do rio Doce.

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) está localizada na região Sudeste, majoritariamente no estado de Minas Gerais (86%) e o restante no estado do Espírito Santo (14%) e faz parte da região hidrográfica do Atlântico Sudeste. Possui uma área de drenagem de 82.600 Km² que envolve 230 municípios (CBH DOCE, 2016).

Figura 6 - Bacia do rio Doce e área da confluência estudada.



Fonte: Autora (2024).

A bacia é dividida em três regiões; o Alto Doce que contém as nascentes vindas da Serra da Mantiqueira e na Serra do Espinhaço até a confluência com o rio Piracicaba (Consórcio Ecoplan-Lume, 2010); o Médio Doce, onde se localiza a cidade de Governador Valadares, que é composto pela região entre a confluência com o rio Piracicaba até a divisa entre Minas Gerais e Espírito Santo (Coelho, 2009); e o Baixo Doce que ocupa a área entre Minas Gerais e Espírito Santo até a foz no oceano Atlântico (Maranhão, 2005).

Em consequência do rompimento da barragem, os resíduos de minério foram transportados até o rio Doce. A primeira etapa deste transporte aconteceu através do rio Gualaxo do Norte, afluente do rio do Carmo, mais próximo a jusante do local do rompimento, que se encontra com o rio do Carmo perto da cidade de Barra Longa, MG (ANA, 2016).

Após seu encontro com o rio Gualaxo do Norte, o rio do Carmo segue até sua confluência com o rio Piranga, ponto de formação do rio Doce, entre as cidades de Ponte Nova, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, em Minas Gerais (ANA, 2016). Este é o local de estudo, pois nesta confluência formadora do rio Doce há grande interações geomorfológicas e de fluxo de momento capazes de gerar e modificar depósitos de sedimentos vindos da barragem do Fundão ao longo dos anos.

2.4.3 Caracterização da zona de confluência do rio do Carmo e Piranga

No caso em estudo, a confluência do rio Carmo com o rio Piranga possui a peculiaridade de possuir ilhas dentro da área de confluência. Nanson e Knighton (1996) definem como canais ramificados (anabrânquios) os canais que têm ilhas aluviais estáveis e com vegetação.

Apesar de confluências deste tipo compartilharem várias das características das confluências tributárias fixas, as confluências ramificadas são muito mais variáveis na forma, além de terem ajuste rápido às mudanças de vazão, carga de leito, posição, orientação e morfologia dos canais (Ashmore, 1993).

Segundo Ashmore e Gardner (2008), não são todas as confluências de anabrânquios que possuem estrutura de fluxo distinta e bem desenvolvida, erosão do leito e deposição associada. No entanto, em sua análise sobre a inundação de grande importância ocorrida em 2022 na região da confluência do rio Doce, Marciano et. al., (2024) calculou que a confluência reteu 50% da carga de sedimentos aportada, possuindo grande importância para o balanço de sedimentos. Logo, é de grande interesse estudar os bancos de sedimentos e sua dinâmica de evolução nesta confluência.

A confluência formadora do rio Doce possui três ramificações de maneira a formar três confluências menores (Figura 7), duas assimétricas e uma simétrica. A maior ramificação desta confluência corresponde a junção simétrica de 45° (em amarelo), seguida da junção assimétrica de 90° em forma de T (indicada em vermelho) e a junção assimétrica com ângulo de 110° (indicada em laranja).

Figura 7 - Tipos de ramificações na confluência formadora do rio Doce.



Fonte: Autora (2024).

Na primeira ramificação da confluência, o rio Piranga com um canal de 10 m de largura que possui 18% do fluxo do rio Piranga (Marciano, et. al., 2024), encontra o

rio Carmo, com um canal de cerca de 30m, formando uma junção com ângulo de 110°. De acordo com Marciano et. al. (2024), quando a vazão do rio do Carmo ultrapassa 30 m³/s, pode ocorrer um fluxo deste rio em direção ao interior do canal do rio Piranga, como aconteceu após o desastre.

Segundo Kominecki (2022), em termos de profundidade da zona de escavação, a relação é baixa para confluências com ângulos superiores que 100°. De acordo com Best (1988), à medida que o ângulo de junção aumenta, há maior deflexão mútua dos fluxos e maior extensão de segregação das cargas de sedimento à medida que passam pela confluência, o que indica que nesta confluência a mistura de sedimentos entre os dois canais é menor.

Em confluências de alto ângulo, pode ser encontrado sedimentos mais finos submersos depositados as margens depois da jusante da bacia de erosão, por conta de vetores de fluxo de leito divergindo do centro da confluência e direcionando os sedimentos para a margem do canal (Ashmore e Gardner, 2008).

O aumento do ângulo da junção causa o fortalecimento da estagnação do fluxo e uma extensão da área de separação. Quando há aumento de vazão e conseqüentemente do fluxo de momento do tributário há uma maior deflexão do fluxo total o que pode gerar a separação (Zhang; Feng; Chen, 2020). No entanto, Guillén-Ludeña et al., (2016) encontraram uma menor relação na produção de zonas de escavação e separação com vazões de tributário reduzidas. Portanto, não é esperado depósitos de sedimentos relevantes na superfície nesta parte da confluência.

A segunda confluência acontece a cerca de 125 m da primeira no canal formado pós confluência, em que o canal do rio Piranga, que drena 52% deste rio (Marciano et. al., 2024), e tem cerca de 13 m, encontra o canal do rio do Carmo com aproximadamente 34 m, em um ângulo de cerca de 90°. Apresentando uma formação típica de modelo estudados por Best (1987).

De acordo com este modelo pode haver formação de bancos de areia na zona de estagnação próxima a junção na margem a montante da entrada do tributário (rio Piranga) e uma zona de separação de fluxo na margem do tributário a jusante da junção.

A terceira e última ramificação, foco deste estudo, apresenta simetria e tem formato de Y, com ângulo de cerca de 45°. O canal do rio Carmo, drena 100% deste rio em vazões até 30 m³/s (Marciano et. al., 2024), e tem largura de aproximadamente 40 m. O canal do rio Piranga tem largura aproximada de 30 m, e drena 30% do fluxo do rio Piranga (Marciano et. al, 2024). Esta confluência é semelhante ao modelo observado por Mosley (1976), em que há uma zona de escavação logo após a junção e uma zona de sedimentação central, também conhecida por barra central.

Marciano et. al. (2024) considera de modo geral, que a confluência do rio do Carmo e rio Piranga possui ângulo agudo ou reto, em Y, e a classifica como de fluxo simétrico, com rios de tamanho semelhantes se encontrando.

Um estreitamento da calha localizado na junção (Figura 8, indicado pela seta vermelha), uma curva natural e um posterior enrocamento (Figura 8, indicado pela seta amarela), são formações que normalmente provocam modificações no fluxo e aumento da turbulência; por isso, as zonas de escavação e sedimentação podem sofrer um deslocamento ou não estarem presentes (Dos Santos e Stevaux, 2017).

Levando em consideração esta análise da literatura, os possíveis locais de bancos de areia da confluência em estudo estão apresentados na Figura 8, circulos em roxo, contendo as barras laterais e a barra central.

Marciano et. al., (2024) através de seus estudos sobre o comportamento dessa confluência do rio Doce após as cheias de 2022, observaram a zona das barras laterais, como zonas de deposição após a terceira confluência, porém não constataram o mesmo para a barra central.

Diante dessas informações e para averiguação acerca de dinâmica da confluência e sua concordância com o que foi encontrado na literatura, foi proposto o uso de instrumentos de acompanhamento do fluxo (derivadores) para encontrar as áreas de sedimentação e o uso de processamento digital de imagens e geoprocessamento com o programa QGIS para avaliar a evolução dessas áreas.

Figura 8 – Formações características da confluência e possíveis locais de sedimentação da confluência.



Fonte: Autora (2024).

3.1.1. Rio Piranga

O rio Piranga nasce na Serra das Vertentes, entre as Serras da Mantiqueira e do Espinhaço, no município de Ressaquinha, e ao encontrar com o rio do Carmo, forma o rio Doce, no município de Santa Cruz do Escalvado. A Bacia Hidrográfica do Rio Piranga (BHRP) possui extensão aproximada de 245 km e área de drenagem de 6.600 km², tendo o rio Piranga como seu rio principal e diversos afluentes, entre eles: o rio Oratórios, rio Bacalhau e o rio Turvo Limpo (Consórcio Ecoplan-Lume, 2010; Silva, 2018).

A Bacia do Piranga compõe aproximadamente 25% da Bacia do Rio Doce, e é composta por 77 municípios, em que destes, 62 destes têm sua sede dentro da área de contribuição (Cruz Salomão; Paula; Elmiro, 2020). A bacia tem histórico de uso inadequado de recursos naturais, como a água, além de intensa degradação do solo (UFMG; UFV; Fundação RENOVA, 2018).

Em 2023, o sistema antrópico já abrangia 64,38% de toda a área e era composto por cultivo comercial de madeira, pastagem, entre outros usos (IDE-Sisema, 2023). As terras da bacia apresentam 53% de suscetibilidade forte à erosão, esta situação aliada ao mau uso do solo e desmatamento, eleva a produção de sedimentos (CBH-Piranga, 2024), que podem ser carregados para os cursos d'água durante as chuvas e causar assoreamento (Hanna et al., 2020).

3.1.2. Rio do Carmo

O rio do Carmo que nasce na Serra do Veloso, no município de Ouro Preto, possui uma bacia que abrange 14 municípios e possui área de drenagem de 2.279km². Seus afluentes principais são o rio Gualaxo do Norte e do Sul, e sua extensão chega a 134 km (Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010). Em sua abrangência está a cidade de Mariana, onde ocorreu o desastre, sendo, portanto, o rio do Carmo o primeiro afluente direto do rio Doce a receber a carga de resíduos de minério da barragem do Fundão e o responsável por transportá-la ao rio Doce.

A bacia do Rio do Carmo é caracterizada por diferentes modalidades de usos e ocupações do solo (Rocha et. al., 2021). Em 2014, ano anterior ao desastre de Mariana, 59,9% da bacia era ocupada por cobertura vegetal secundária, 17,55% eram classificadas como campos, solos e pastagem e as manchas urbanas ocupavam 4,86% da área da bacia (Sobreira, 2014).

A população residente ao longo dos rios componentes da bacia, principalmente, dos rios Gualaxo do Norte e Carmo, apresentaram resistência em atender a legislação ambiental vigente, com pouca preservação de mata ciliar e APPs e cultivo de gramíneas e eucalipto e criação de animais (Fernandes, 2017). Rego (2023) observou o mesmo padrão de comportamento dos ribeirinhos, em seu estudo sobre recuperação da mata ciliar na mesma bacia no ano de 2023.

No entanto, vários projetos ambientais foram executados para recuperação das áreas afetadas pelo desastre ocorrido em 2015 e apresentaram resultados positivos na revegetação das matas ciliares na região. Como de Schaefer et. al., (2015) com a recuperação de uma área de 11 ha de pastagem afetada pelo rejeito, no município de Rio Doce/MG, e experimentos com a reabilitação de áreas atingidas pelo rejeito nas

margens de diferentes trechos ao longo da bacia do rio Doce (Scotti et. al., 2020), ou o Programa Olhos D'Água do Instituto Terra cuja meta é recuperar mais de 300 mil nascentes de afluentes do Rio Doce, o que inclui o rio do Carmo (Espindola et. al., 2022).

Para garantir a recuperação dos recursos impactados, em 2016, foi assinado um Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC) entre União e o estado de MG e a Samarco/Vale/BHP, em que foi criado a Fundação RENOVA, esta fundação desenvolve projetos para a recuperação ambiental das áreas afetadas pelo despejo da lama da barragem do Fundão, tendo resultados positivos principalmente com o PG-25-PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO DA ÁREA AMBIENTAL 1 (Botelho e Melo, 2019).

O projeto consiste em três fases: a fase 1 - Projeto de Plantio Emergencial, que revegetou de forma inicial, emergencial e temporária, cerca de 800ha, com gramíneas e leguminosas de crescimento rápido, para reduzir a erosão laminar e eólica. A fase 2 consistiu na regularização das calhas, margens, e controle de processos erosivos nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, no Trecho Montante da UHE Risoleta Neves (Fundação RENOVA, 2018).

Segundo Rego (2023) a fase 3, está em desenvolvimento e se refere ao Projeto de Restauração Florestal em Propriedades Rurais, tendo por objetivo instruir a população ribeirinha na recuperação de APPs e remanescentes de vegetação nativa inseridas nas áreas impactadas localizadas nos municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado.

Estas intervenções realizadas na bacia do rio do Carmo, com o intuito de recuperar as áreas afetadas pelo Desastre de Mariana, podem diminuir o aporte de sedimentos carreados para o rio e desta forma influenciar positivamente na qualidade da água do rio Doce.

3.2. Dados das estações de monitoramento de água

Com a exposição midiática e o tamanho do impacto ambiental do desastre de Mariana, o rio Doce tornou-se um dos rios mais estudados do mundo. Houve atualizações nas estações de monitoramento pré-existentes e a criação de novas estações para acompanhar a recuperação da bacia hidrográfica do rio Doce, assim como da zona costeira e estuarinas, que também foram afetadas (Palu, 2019).

Para a finalidade deste estudo, que avalia a influência de afluentes no aporte e na deposição de sedimentos, são necessárias a análise de dados de cota e vazão a montante da confluência e a jusante. Assim, foram escolhidas estações hidrológicas a montante, para cada rio da confluência e a jusante da junção dos dois rios.

3.2.1. Dados das estações fluviométricas

Os dados de vazão foram retirados das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) e do Consórcio da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (CONS.RISOLETA). Os dados de cota foram obtidos através das estações fluviométricas da CONS.RISOLETA.

O período escolhido para análise de dados de vazão e cota foi de 2014, ano anterior ao acidente, até o ano de 2023, devido a disponibilidade dos dados. No caso das estações de CONS.RISOLETA, os dados se expandem de 17/10/2016 até 2023. As características das estações estão expostas na Tabela 1. A localização das estações fluviométricas utilizadas em relação a confluência do rio do Carmo e Piranga são mostradas na Figura 9.

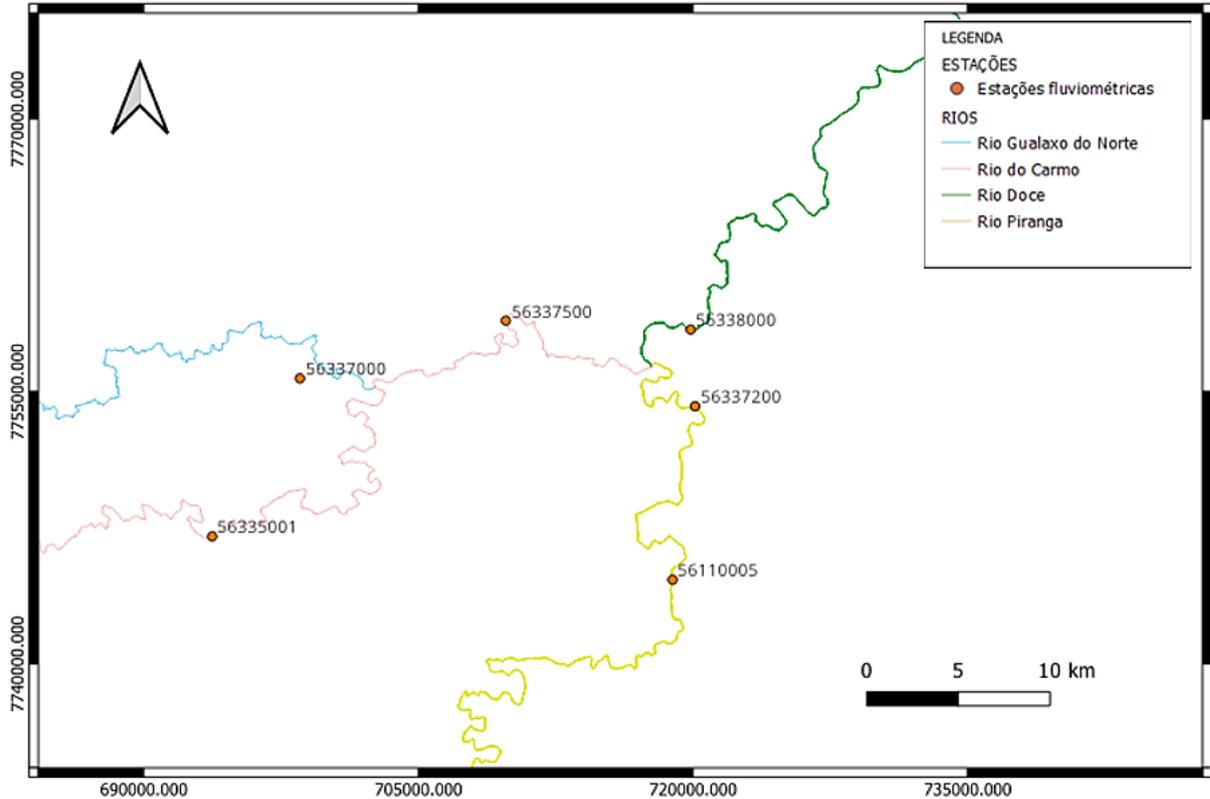
Devido a indisponibilidade de dados em estações mais próximas aos locais desejados foram necessárias realizar algumas considerações. Assim como feito por Vaz, Junior e de Almeida (2006) e Gamaro e Maldonado (2015), nos casos em que não havia estações representativas da vazão do rio após confluência, foram somadas as vazões medidas nos dois rios formadores da confluência, desta forma:

Tabela 1 - Estações fluviométricas utilizadas.

Estações	Nome	Fonte	Dados	E (UTM)	N (UTM)	Rio
56337000	ERGN	CPRM	Vazão	700401.05245136	7755705.5659884	Rio Gualaxo do Norte
56335001	ERC	ANA	Vazão	693732.04788173	7747023.6008076	Rio do Carmo
56110005	ERP	ANA	Vazão	718878.6146197	7744639.6972183	Rio Piranga
56337200	ERP2016	CONS. RISOLETA	Vazão e cota	720107.67169871	7754191.8820771	Rio Piranga
56337500	ERC2016	CONS. RISOLETA	Vazão e cota	709769.72050046	7758905.0692191	Rio do Carmo
56338000	ERD2016	CONS. RISOLETA	Vazão e cota	719868.91905259	7758414.0707184	Rio Doce

Fonte: Autora (2023).

Figura 9 - Estações fluviométricas utilizadas no estudo.



Fonte: Autora (2023).

- Com a falta de dados de estações no período entre 2015 e 2022 para o rio do Carmo após sua confluência com o Rio Gualaxo do Norte, foi considerada para o estudo a soma da vazão dos dois rios medidas antes da junção, e a vazão pós junção foi denominada como Somatória do rio do Carmo (SRC),

- Com a falta de dados de estações no período entre 2015 e 2022 para o rio Doce após a confluência do Rio do Carmo com o Rio Piranga, foi considerada para o estudo a soma da vazão dos dois rios (SCR e ERP) e denominada como Somatória do rio Doce (SRD).

- Os dados das estações ERC2016, ERP2016 e ERD2016 têm início de coleta em 17/10/2016, sendo necessário elaborar uma relação cota x vazão para produzir um valor de cota para o período anterior.

3.3. Levantamento dos parâmetros físicos de escoamento e deposição de sedimentos

Os parâmetros físicos do escoamento dos cursos d'água, que representam o deslocamento de sedimentos, foram obtidos com o projeto do Edital FAPEMIG/RENOVA "Derivadores Rastreados por Satélite e Monitoramento Automático de Parâmetros Ambientais Aplicados ao Entendimento da Contribuição dos Afluentes para o Restabelecimento do Rio Doce.", de qual este estudo é parte integrante.

Os derivadores utilizados neste estudo (Figura 10) são do tipo Lagrangiano, equipados com receptores GPS, que são transportados pelo escoamento do curso d'água e armazenam suas sucessivas coordenadas ao longo do tempo. São dispositivos empregados de forma ampla na oceanografia (Assireu, 2017; Novelli, 2018), e mais recentemente foram também utilizados para estudos em rios (Iwata, 2020; Ribeiro, 2023). Os receptores GPS transmitem sua posição, via enlace com o Serviço de Rádio de Pacote Geral (GRPS) e, quando utilizados em sistemas fluviais possuem a vantagem de serem resgatados ao final do experimento, diferente do que acontece no estudo de oceanos.

São amplamente utilizados para a localização de regiões de convergência do escoamento (Assireu, 2021), isso porque exercem papel fundamental na identificação do eixo principal de escoamento e nas zonas de máximas e mínimas velocidades longitudinais, que por sua vez são fundamentais, segundo Xie *et. al.* (2018) para a localização das regiões de elevado transporte ou concentrações de sedimentos.

Os trabalhos de campo para a aquisição dos parâmetros físicos do escoamento foram realizados em duas campanhas, a primeira em 12/12/2021 representando a época de cheia e a segunda em 26/09/2023, época de seca. Os derivadores rastreados por satélite foram lançados no rio Carmo e rio Piranga, a montante da junção dos rios, de modo a atravessarem a confluência e realizarem o levantamento da estrutura bidimensional (lateral) do escoamento e representarem o comportamento dos sedimentos e seus locais de deposição.

Figura 10 – Exemplo de derivadores utilizados.



Fonte: Autora (2023).

Na primeira campanha, foram utilizados 4 derivadores, numerados 1, 2, 3 e 4. Os derivadores foram lançados a montante da confluência aproximadamente às 12h00min no rio do Carmo e às 12h10min no rio Piranga, após 1h de experimento, os

derivadores foram recolhidos a jusante da confluência, ou em seus pontos de parada, às 12h50min. Os locais de lançamento são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Locais de lançamento dos derivadores no dia 12/12/2021.



Fonte: Google Earth (2024).

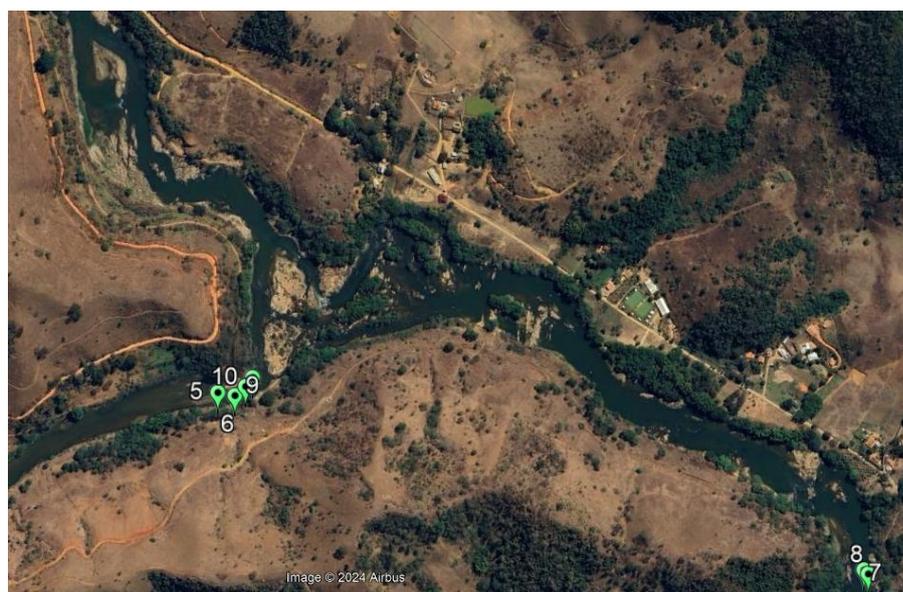
Na segunda campanha, foram utilizados 6 derivadores, numerados 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Os derivadores foram lançados a montante da confluência aproximadamente às 12h00min no rio do Carmo e às 12h05min no rio Piranga, após 1h30min de experimento, os derivadores foram recolhidos a jusante da confluência, ou em seus pontos de parada, às 13h30min. Os locais de lançamento são mostrados na Figura 12.

O local de lançamentos no rio do Carmo foi considerado como o ponto inicial. O deslocamento dos derivadores lançados no rio Piranga foram considerados a partir da terceira confluência, conforme o foco deste estudo. Os pontos iniciais e final foram considerados conforme mostrado na Figura 13. Os derivadores que não estacionaram em nenhum local da confluência foram coletados no ponto final.

Os dados obtidos por esses instrumentos de coleta são recebidos em tempo real e foram utilizados para análise do comportamento de velocidade do fluxo, assim

como áreas de velocidade baixa que poderiam ser locais de formação de bancos de sedimentos. Com essas áreas localizadas, posteriormente foi possível avaliar através de imagens do satélite e ARP a evolução temporal de tais bancos.

Figura 12 – Locais de lançamento dos derivadores no dia 26/09/2023.



Fonte: Autora (2024).

Figura 13 – Pontos iniciais e final considerados nesta análise.



Fonte: Autora (2024).

3.4. Imagens de satélite e ARP

Os estudos de imagens de satélites permitem acompanhar eventos passados e o desenvolvimento ao longo do tempo de fenômenos naturais ou antrópicos ocorridos em uma região.

As imagens da área de estudo disponibilizadas representam distintos períodos entre 2015 e 2022, compostos por imagens de satélite e de ARP, sendo empregadas para fins de comparação sobre a evolução do leito do rio Doce na confluência de sua formação. As características das imagens estão apresentadas na Tabela 2.

As imagens utilizadas nesta dissertação foram retiradas do acervo disponibilizado pela Fundação RENOVA, responsável pelo estudo e monitoramento acerca do rompimento da barragem do Fundão.

Tabela 2 – Características das imagens fornecidas pela Fundação RENOVA.

Imagem/Código	Data	Fonte/sensor	Bandas	Resolução espacial	Resolução radiométrica obtida
T01/2015	21/01/2015	Geoeye	RGBNIR	1,65 m	8 bits
T01/2015	06/08/2015	Spot	RGBNIR	6 m	8 bits
T05/2016	04/05/2016	Geoeye	RGBNIR	1,65 m	8 bits
T06/2017	18/06/2017	ARP	RGBNIR	0,10 m	8 bits
T04/2021	24/04/2021	ARP	RGBNIR	0,10 m	8 bits
T04/2022	18/04/2022	ARP	RGBNIR	0,10 m	8 bits
T08/2022	15/08/2022	ARP	RGBNIR	0,10 m	8 bits

Fonte: Autora (2024).

As imagens orbitais obtidas foram captadas pelos satélites Geoeye e Spot. Anteriormente conhecido como OrbView-5, o satélite GeoEye-1 foi lançado em 6 de setembro de 2008, com a missão de geração de imagens de alta resolução disponibilizando bandas multiespectrais RGB e infravermelho (NIR), suas imagens são utilizadas em diversas aplicações, entre eles, serviços baseados em localização, gerenciamento de risco, monitoramento ambiental e recursos naturais (Planetek Italia, 2024).

As imagens SPOT 6/7 são de satélites franceses pertencentes a Agência Espacial Europeia (ESA) (Hamimeche et. al., 2021). SPOT 6 é um satélite sincronizado com o sol, lançado em 9 de setembro de 2012, que orbita a uma altitude de 694 km, sua configuração espectral consiste em bandas multiespectrais azul (450–520 nm), verde (530–590 nm), vermelha (625–695 nm) e infravermelho próximo (760–890 nm) com uma resolução espacial de 6 m e uma banda pancromática (450–745 nm) com uma resolução espacial de 1,5 m e alcance dinâmico de 12 bits por pixel (Hafner, 2022).

As ortoimagens de ARP foram realizadas pela equipe da empresa Geopixel contratada pela Fundação RENOVA. O voo foi realizado a uma altura média de 400m para obtenção de um GSD (*ground sample distance*) de 10cm, levando em consideração a declividade do terreno levantado (Geopixel, 2022).

O equipamento utilizado para a aquisição das imagens de ARP foi o Ebee PPK/RTK (Figura 14) que possui: câmera RGB de 20 Megapixels, sensor CCD de 1-polegada (13.1 x 8.8 mm = 115 mm²), câmera NIR-GB de 16.1 Mpixels (Sony EPHS com Sensor 1/2.3" back-lit CMOS); resolução máxima (GSD): 1.5 / 1.0 cm/pix; GNSS: GPS e GLONASS, PPK/RTK L1 e L2 (Geopixel, 2022).

As imagens de ARPs foram obtidas já ortorretificadas a partir do programa de fotogrametria Agisoft Metashape Professional 1.7 com base em topografia LiDAR, no sistema de coordenadas SIRGAS 2000, UTM zona 23S.

As imagens de ARP (Figura 15), são produtos multiespectrais obtidos por plataformas suborbitais, realizando voos de baixa altitude, portanto, os efeitos atmosféricos como espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética

podem ser desconsiderados, diferentemente das imagens obtidas por plataformas orbitais (Tagliarini, 2020).

Figura 14 – ARP Ebee utilizado pela equipe Geopixel para obtenção de imagens.



Fonte: Wevolver, 2024. Site: [eBee Classic \(wevolver.com\)](https://wevolver.com).

Figura 15 – Exemplo de imagens de ARP realizada em 2022.



Fonte: Renova (2023).

As imagens orbitais foram adquiridas de forma gratuita em parceria com o projeto Renova, contudo por não estarem disponíveis os arquivos de metadados, não foi possível a realização de sua correção atmosférica. No entanto, por se tratar de um dado extremamente relevante, uma vez que são as únicas imagens datadas antes do desastre e podem inferir sobre o comportamento natural da área de estudo sem o impacto, realizou-se uma comparação relativa entre esses dados de satélite, dado a pequena área de confluência em análise e considerando uma influência atmosférica homogênea em ambas as datas.

3.5. Geoprocessamento

O geoprocessamento pode ser definido como técnicas e métodos de origem teóricas e computacionais relacionados com a coleta, armazenamento, tratamento, processamento e análise de dados, de modo a produzir novos dados e/ou informações espaciais georreferenciadas (Zaidan, 2017).

Dentro do ramo do geoprocessamento pode-se destacar o Sistema de Informações Geográficas (SIG) como uma de suas principais geotecnologias. Um SIG pode ser definido como um sistema com um conjunto de funções automatizadas e capacidade de armazenamento, que auxilia na gestão, transformação e visualização de dados espacialmente referenciados (Ferreira e Raffo, 2012).

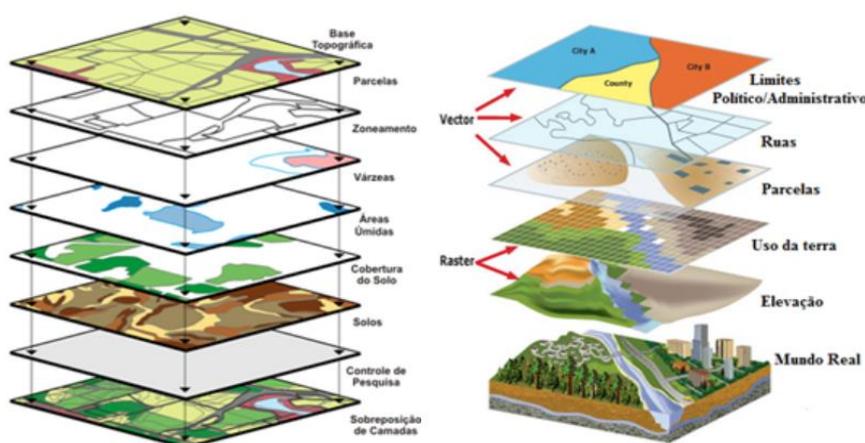
Devido à disponibilidade de trabalhar e integrar dados de diferentes naturezas, o SIG constitui-se de fato de ferramenta de análise ampla e complexa, utilizada das mais diversas formas para análise espacial, em simulação e modelagem de cenários, como instrumento para avaliação de uso e ocupação do solo, monitoramento ambiental em diferentes frentes, entre outras aplicações com componentes dinâmicos e espaciais (Mota, 1999).

Esta capacidade de uso múltiplo e interdisciplinar com precisão georreferenciada induz a utilização desta ferramenta em diversos campos de estudo como urbanização, hidrografia, geologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo, delimitações de bacias e sub-bacias, zoneamentos territoriais e ambientais, erosão do solo, assim como desastre e catástrofes ambientais. Logo, a realidade pode ser

esquemática através da sobreposição de camadas, com a utilização de SIG, como exemplificado na Figura 16.

As formas de representar a realidade tornam-se mais eficazes, mais precisas e executadas em menor tempo, quando são utilizados softwares de geoprocessamento atuais, a exemplo do QGIS (Teixeira, et. al., 2018), que foi utilizado neste trabalho em sua versão Qgis 3.38.4.

Figura 16 - Esquema de um SIG.



Fonte: GEODEN – Geotecnologias Digitais no Ensino (uff.br).

3.5.1. Software QGIS

O Quantum GIS (QGIS), de acordo com Nanni et al. (2017), é um software SIG livre e que possui código aberto, além de possuir grande diversidade de ferramentas para análises geoespaciais e uma interface amigável, com outro benefício sendo o uso do programa e a integração de novos complementos ou *plug ins*, como o SAGA, OTB, GRASS, entre outros.

Dentre eles, destaca-se o *plug in* Lftools que foi utilizado nesse trabalho. Desenvolvido por Leandro França, o Lftools é um complemento de provedor de processamento com ferramentas para produção cartográfica, levantamento topográfico, gerenciamento de banco de dados, processamento digital de imagens e análise espacial científica (<https://plugins.qgis.org/plugins/Lftools/>).

Outro *plug in* importante é o *Semi Automatic Classification* (SCP), desenvolvido por Luca Congedo em 2013, que é considerado um dos mais importantes complementos do QGIS (Pereira e Guimarães, 2022). Isso devido ao fato de permitir a classificação supervisionada de imagens de sensoriamento remoto, disponibilizando ferramentas para download, pré-processamento e pós-processamento de imagens, (<https://plugins.qgis.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/>), incluindo as ferramentas para a análise espectral realizadas neste estudo.

3.6. Assinatura espectral dos rios

Considerando as imagens disponíveis para este trabalho, foi realizada uma comparação relativa da assinatura espectral da área de estudo por meio das imagens de satélite nas duas datas disponíveis para analisar as características espectrais antes e após o evento.

No caso das imagens obtidas por ARP, como não estavam disponíveis antes do evento, procurou-se analisar o comportamento espectral dos cursos d'água em diferentes datas considerando eventos extremos de precipitação e o impacto desses pulsos hidrológicos para o carreamento de sedimentos na área. Como já comentado, as imagens de ARP dispensam a necessidade de correção atmosférica por voarem em altitude suborbital, sem influência atmosférica causadoras de espalhamento, absorção e refração (Tagliarini, 2020). Outra característica essencial que possibilitou o uso das imagens para análise espectral foi o fato de serem realizadas com o mesmo equipamento, sensores, alturas de voo e ângulo de visada, em todos os períodos realizados. Além disso, sua alta resolução espacial de 10 cm, permite que os pixels, por capitarem uma menor área, representem com mais veracidade e homogeneidade a assinatura espectral dos objetos em análise.

As amostras utilizadas para a realização de medidas das assinaturas espectrais foram obtidas nas bandas RGB e NIR (infravermelho) disponíveis para cada data nos rios do Carmo (A1), Piranga (A2) e Doce, logo após a junção (A3). Para esse trabalho, foram utilizadas as imagens de ARP do ano de 2017, em época de seca (T06/2017),

do ano de 2021 em época de cheia (T04/2021), do ano de 2022 na cheia (T04/2022) e em 2022 na seca (T08/2022).

Foram escolhidas estas imagens para comparar as assinaturas espectrais dos rios estudados em diferentes anos e observar mudança de assinatura espectral de cada rio nos diferentes tipos de vazões (alta e baixa) nos diferentes anos, principalmente a variação espectral ocasionada pelas cheias ocorridas em 2021 em 2022. Para realização do proposto foi utilizado o complemento SCP do Qgis e de ferramenta para geração de regiões de interesse (ROI) para determinação de amostras puras.

A primeira etapa para produção das assinaturas espectrais foi de extração das bandas das imagens fornecidas em arquivos distintos. Depois, através do *plug in* SCP foi organizado uma imagem com as bandas na seguinte ordem: azul (B), verde (G), vermelho (R) e infravermelho (NIR). Na terceira etapa foi realizada a amostragem A1, A2, A3, com os locais expostos na Figura 17.

Figura 17 – Localização das amostras para assinatura espectral.



Fonte: Autora (2024).

De modo a garantir a captura de pixels que representassem somente a água, foram observados nos centros dos cursos d'água os pontos que não apresentaram banco de sedimentos ao longo do tempo. Para tanto, foi usado a ferramenta de vista do histórico de imagens de satélite fornecida pelo *Google Earth Pro*. Após escolhidos os pontos, foram amostrados 3 pixels da água para cada curso d'água, rio do Carmo, rio Piranga e rio Doce, após a confluência de sua formação.

Na última etapa foram produzidas as assinaturas das amostras por meio do *plug in SCP* e com os dados obtidos foram elaborados os gráficos pelo Excel. Além do uso para análise espectral, as imagens de satélite e ARP foram utilizadas para vetorização e avaliação da evolução de bancos de sedimentos da confluência.

3.7. Vetorização dos bancos de sedimentos utilizando imagens de satélite e ARP

Para a vetorização dos bancos de sedimentos estudados na confluência do rio Doce foram utilizados índices espectrais. O índice espectral para identificação de corpos d'água, o NDWI, foi utilizado a partir da combinação entre bandas para criação de uma nova imagem com a delimitação do objeto de interesse, nesse caso os cursos d'água. A vantagem em se trabalhar com os índices é evitar a influência de variação de iluminação, como mostrado na Figura 18, e a necessidade de normalização radiométrica, uma vez que os resultados são valores normalizados entre -1 a 1.

Para análise da evolução dos bancos de sedimentação foram usadas somente as imagens fornecidas que correspondiam ao período de seca e de vazão baixa do rio Doce, pois em época de cheias tais bancos ficam encobertos pela água.

De acordo com De Sena Júnior *et. al.* (2003), os índices são amplamente utilizados na área de sensoriamento remoto, para redução da diferença de brilho em materiais idênticos, causados por distinções em relevo, sombras, ângulo e intensidade da iluminação solar.

Dos índices conhecidos, o NDWI e o BSI foram utilizados neste estudo, uma vez que o NDWI está associado ao infravermelho absorvido pela água e o BSI ao solo exposto e descoberto (esperado em áreas de bancos de areia). Para execução dos índices NDWI e BSI foram utilizadas as fórmulas das Equação 1 e Equação 2, respectivamente, dentro da calculadora de raster do Qgis.

Figura 18 – Exemplo de imagens de satélite (T0), Spot à esquerda e Geoeye à direita, feitas em 2015 mostrando variações no brilho.



Fonte: Renova (2023).

O resultado da aplicação dos índices são imagens em escala de cinza, que para separação do alvo de interesse é necessária a execução da limiarização binária dessas imagens, isto é, a transformação em imagens preto (fundo) e branco (objeto de interesse), com valores 0 e 1, respectivamente. Para tanto são observados o range dos alvos de interesse e estabelecidos limiares extraídos dos índices NDWI ou BSI. Este processo consiste em estabelecer, dentro da escala do próprio índice, um limite inferior e superior para enquadrar o que é considerado parte constituinte do objeto em análise.

Para o NDWI foi estabelecido limiar para identificação da água, identificando indiretamente bancos de areia interiores. Já para o BSI o limiar foi estabelecido para identificar, diretamente, pedras, bancos de areia clara e bancos de areia escura.

Posteriormente, com estes valores de mínimos e máximos em mãos, utilizou-se da ferramenta limiarização binária disponível no complemento *Lftools* para criação das imagens binárias. A partir destas imagens, foi utilizada a ferramenta de vetorização automática, que consiste em converter *raster* para vetor (poligonizar), disponível na aba Raster do Qgis, para produzir os polígonos dos depósitos de sedimentação.

Outro ponto a salientar é o fato das áreas dos bancos de sedimentos serem relativamente pequenas (menores que 1km²) e da poligonização através de vetorização automática poder ser avaliada a olho nu e corrigida.

Por meio da adaptação da metodologia de Wen (2020) de extração por índice NDWI, com a substituição do uso de histograma da água e classificação não supervisionada pela definição de polígonos por limiarização binária e vetorização automática, foram obtidos polígonos dos depósitos de sedimentos. O mesmo processo foi utilizado com o índice BSI para definição de bancos não captados pelo NDWI, a descrição da metodologia é mais bem explicada nas subseções 3.7.1 e 3.7.2.

Para obtenção dos polígonos dos depósitos de sedimentos, os bancos de areia foram divididos em dois grupos: bancos de sedimentação internos, aqueles envoltos por água de maneira a estarem ilhados, e os bancos de sedimentação marginais, aqueles que estão localizados na margem do rio.

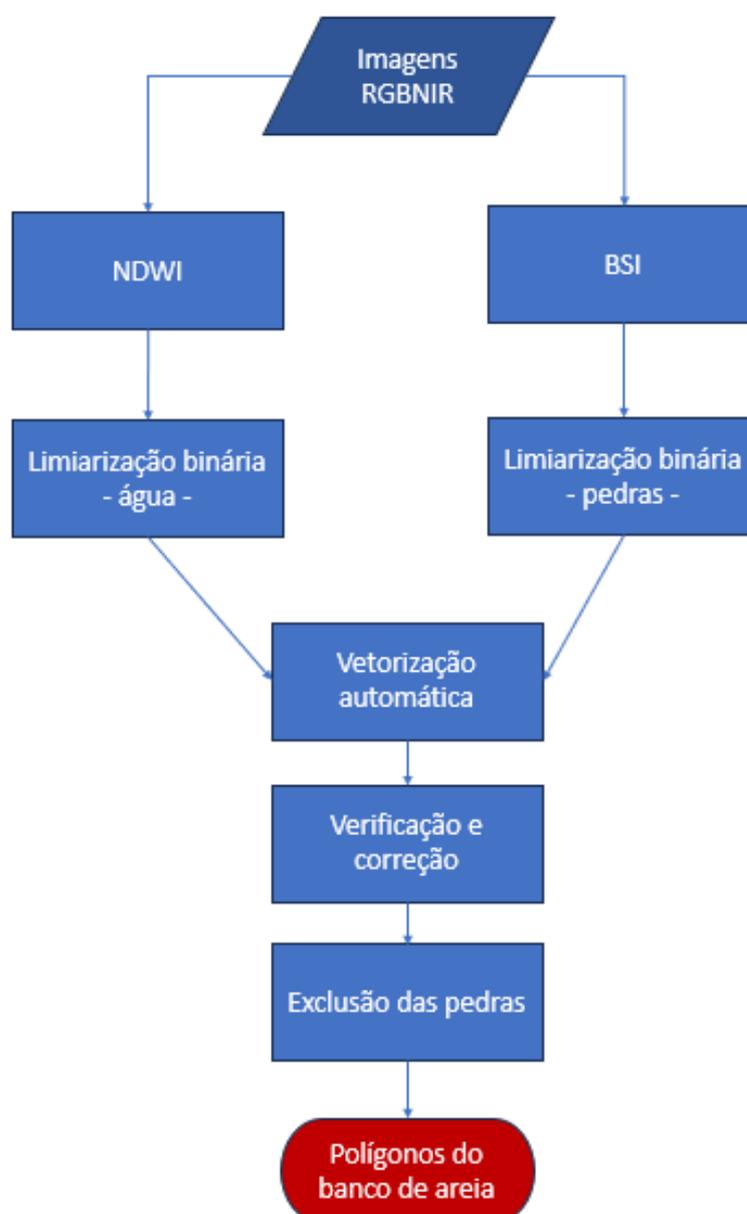
3.7.1. Vetorização dos bancos de sedimentos internos

Os bancos de sedimentação internos, por estarem ilhados, permitem a utilização do índice NDWI para a definição do seu polígono, pois, a resposta do solo e da vegetação é reduzida, de modo a destacar o corpo de água estudado dos outros objetos da imagem.

A metodologia seguida para este tipo de banco é apresentada na Figura 19, semelhante a metodologia de extração de bancos de sedimentos por NDWI utilizada

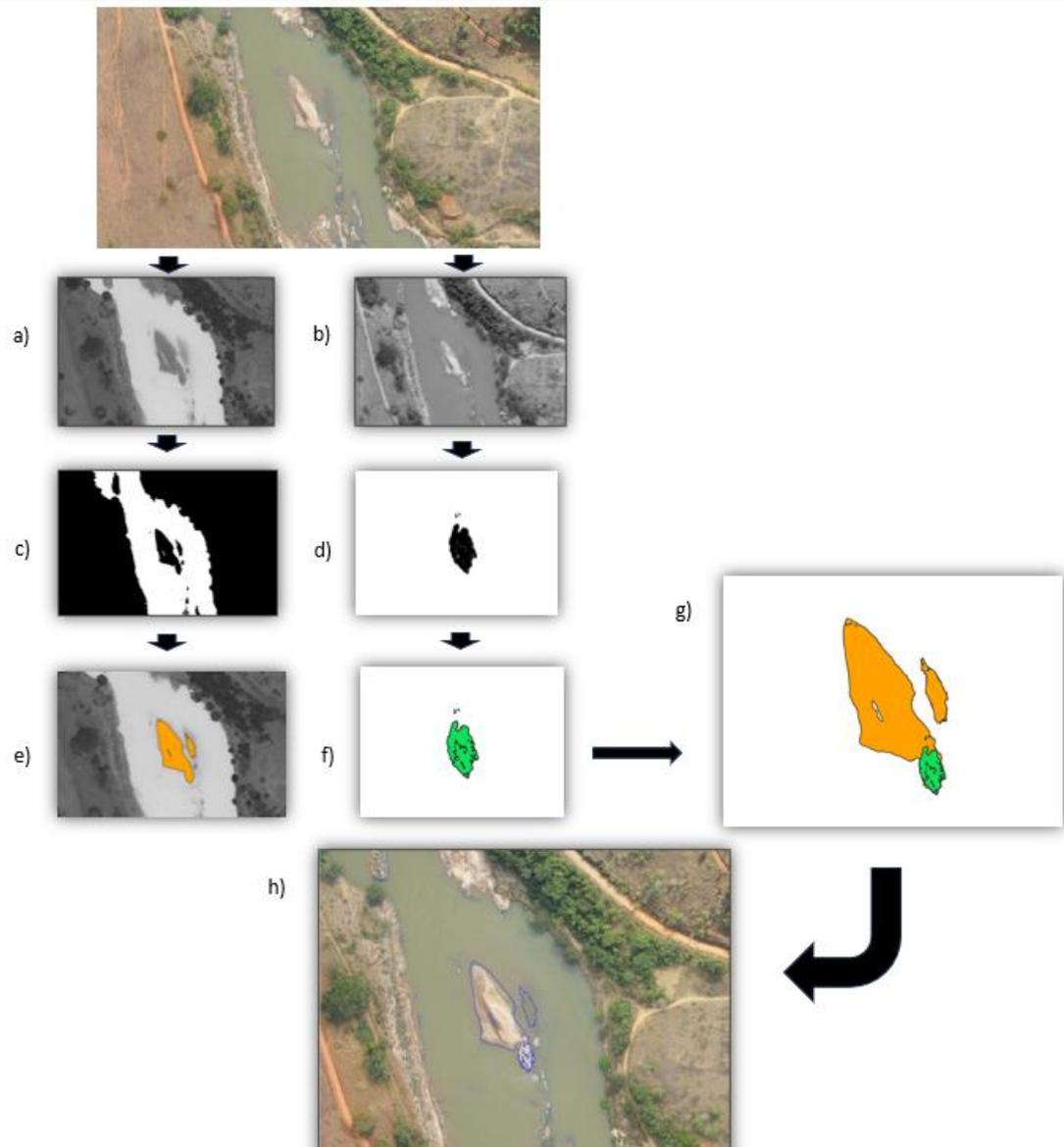
por Wen (2020) e adaptada para o uso adicional de BSI. O processo de poligonização dos bancos até o resultado final está representado na Figura 20.

Figura 19 – Fluxograma da metodologia aplicada para poligonização dos bancos de sedimentos internos.



Fonte: Autora (2024).

Figura 20 – Exemplificação da poligonização dos bancos de sedimentos internos.



a) Imagem NDWI; b) Imagem BSI; c) Limiarização binária do banco de sedimentos; d) Limiarização binária das pedras; e) Vetorização automática do banco de sedimentos; f) vetorização automática das pedras; g) Extração do polígono das pedras do polígono de banco de sedimentos e h) Banco de sedimentos final da barra central. Fonte: Autora (2024).

O primeiro passo foi utilizar a fórmula do índice NDWI (Equação 1) para obtenção de nova imagem, pois, a água aparece em tonalidade mais clara, sendo possível diferenciar entre a água e os bancos de sedimentos não submersos, como pode ser observado na Figura 20a.

No caso de bancos de sedimentos localizados na barra central foi observada a presença de pedras próximas ao banco que poderiam causar uma superestimação do tamanho do depósito e deveriam ser desconsideradas.

Como o índice NDWI não consegue separar nitidamente os bancos de areia das pedras, foi utilizado o índice BSI (Equação 2) para extração destes polígonos (Figura 20b). Por não haver variação no tamanho e localização deste grupo, foi utilizada a imagem de 08/2022 como base para poligonização das pedras, por possuir melhor distinção e facilitar a extração do vetor correspondente a sua localização.

O segundo passo consistiu em obter através dos índices, valores de limiares que representassem aos objetos desejados. Assim foi realizada, por meio do *plug in* LTools, a limiarização binária, que consiste na separação dos pixels em dois grupos; os que estão dentro do limiar e os que não estão.

Através de limiarização binária os bancos de areia (Figura 20c) e as pedras (Figura 20d) foram caracterizados. Posteriormente, foi realizado a vetorização automática através da ferramenta de vetorização de raster, disponível pelo Qgis, para obter os polígonos destes dois objetos (Figuras 20e e 20f).

Depois de obtidos os vetores, foram realizadas verificações e correções (reajuste de limiares e exclusão manual de vetores fora da área de interesse), para ajustar os polígonos, de modo a evitar tanto superestimação quanto subestimação de seu tamanho.

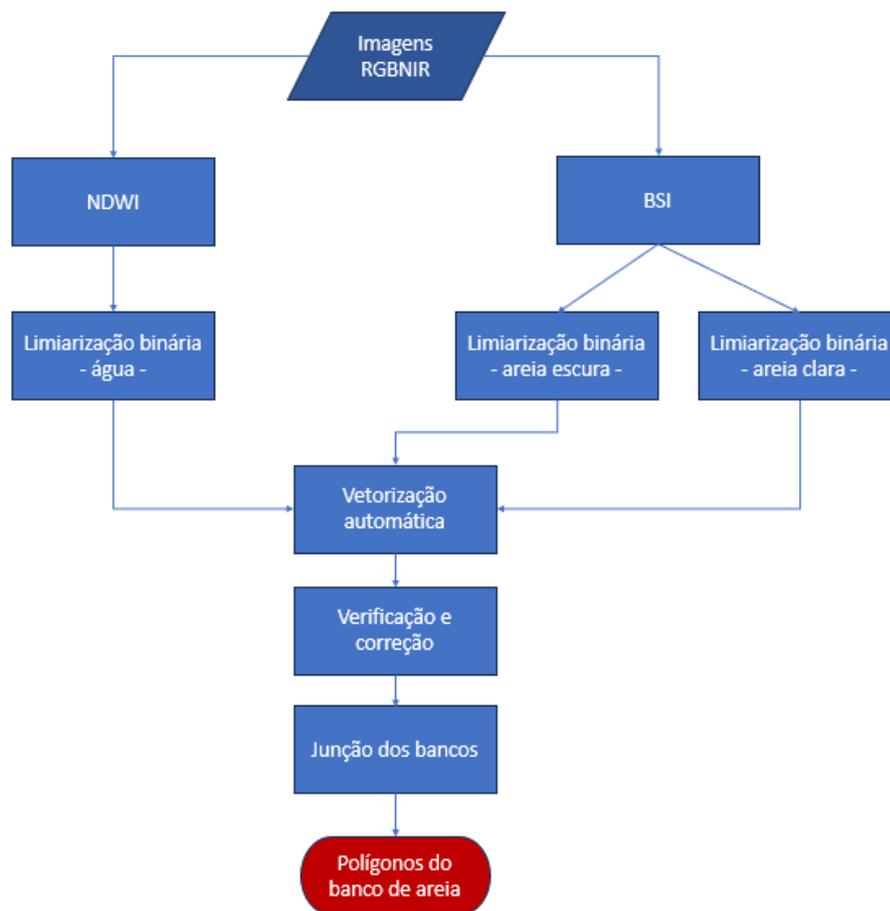
O terceiro passo foi a extração do grupo de rochas do polígono representante do banco de sedimento (Figura 20g), conseguindo assim seu tamanho real (Figura 20h).

3.7.2. Vetorização dos bancos de sedimentos marginais

Os bancos de sedimentação marginais foram considerados aqueles que estão parciais ou totalmente integrados às margens do corpo d'água. A metodologia seguida para este tipo de banco é apresentada na Figura 21. O processo de poligonização está representado na Figura 22.

Primeiramente, quando possível, em casos de bancos de sedimentos parcialmente ligados à borda do rio ou ilhados utilizou-se o NDWI para definir o contorno da parte do objeto cercada de água (exemplo, Figura 22a).

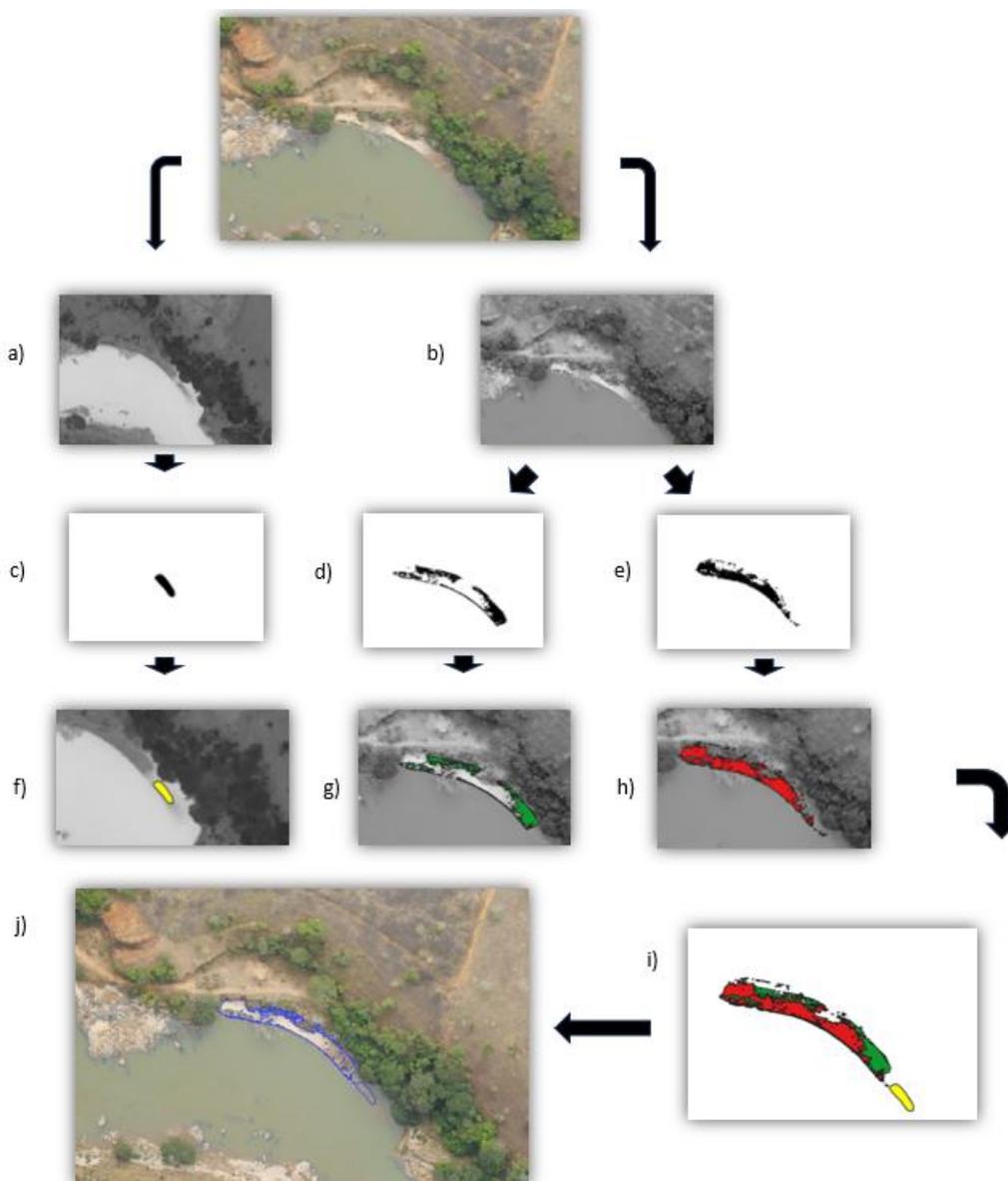
Figura 21 – Fluxograma da metodologia aplicada para poligonização dos bancos de sedimentos marginais.



Fonte: Autora (2024).

O segundo passo consistiu em diferenciar entre o solo exposto dos locais de deposição e a vegetação ciliar nas parcelas interligadas a margem. Para isso, foi pertinente o uso do índice BSI (Figura 22b) para vetorização dos bancos de sedimentação, já que é capaz de fornecer essa diferenciação.

Figura 22 – Exemplificação da poligonização dos bancos de sedimentos marginais.



a) Imagem NDWI; b) Imagem BSI; c) Limiarização binária do banco de sedimentos ilhado; d) Limiarização binária do banco de sedimentos de areia escura; e) Limiarização binária do banco de sedimentos de areia clara; f) Vetorização automática do banco de sedimentos ilhado; g) Vetorização automática do banco de sedimentos de areia escura; h) Vetorização automática do banco de sedimentos de areia clara; i) Mescla dos polígonos de bancos de sedimentos e j) Banco de sedimentos final da barra lateral. Fonte: Autora (2024).

Nos casos de bancos de areia que continham areia clara e escura, foi preciso formar dois polígonos distintos, com diferentes valores de limiares utilizando a escala do BSI. Após a determinação dos limites inferiores e superiores dos objetos

estudados, novamente foi utilizado o processo de limiarização binária (como nas Figuras 22c, 22d e 22e) e de vetorização de imagens (Figuras 22f, 22g e 22h) para a produção dos polígonos, sendo então realizadas verificações e correções para ajuste dos polígonos.

Finalmente foi realizada a união dos vetores obtidos (Figura 22i) a fim de reproduzir o contorno real dos bancos de sedimentação (Figura 22j). Estes procedimentos foram repetidos para as imagens de satélite e ARP de todos os anos estudados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dados de vazão

Com os dados das estações fluviométricas disponíveis, foi possível o cálculo da vazão que entra na confluência através do rio do Carmo; por meio da somatória da vazão do rio Gualaxo do Norte, medida pela estação ERGN (Estação do rio Gualaxo do Norte), com a vazão do rio do Carmo, medida pela estação ERC. Desta forma foi obtida a vazão denominada SCR (Somatória do rio do Carmo). Para o rio Piranga foi possível utilizar diretamente a vazão medida pela estação ERP (Estação do Rio Piranga).

Os dados mostram que a época de cheia dos dois rios corresponde ao período de outubro a abril, com picos entre janeiro e março. A época de seca dos rios, em que a vazão está mais baixa, ocorre entre maio e setembro, sendo os meses mais secos julho e agosto. Este comportamento é repassado, após a confluência, ao rio Doce.

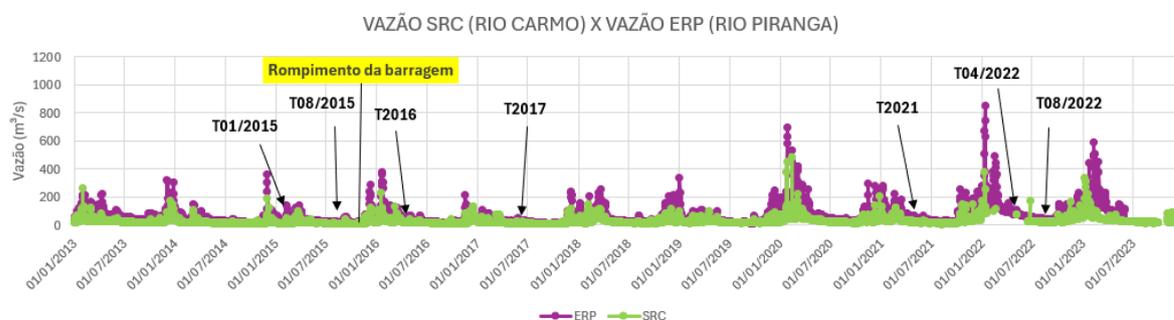
Com esses dados de vazão foi produzido o gráfico da Figura 23, de vazão dos rios Piranga (em roxo) e do Carmo (em verde), que chegam na confluência formadora do rio Doce, para o período de 2013 a maio de 2023. Para facilitar o entendimento o período das imagens obtidas através da Fundação RENOVA foram apontados em preto nas Figuras 23 e 24.

Na Figura 23 observa-se que a vazão do rio Piranga é maior do que a do rio do Carmo durante todo o ano. Normalmente, a vazão do rio Piranga é de 2 a 3 vezes maior em comparação ao rio do Carmo, podendo chegar a ter vazão de 15 a 20 vezes maior em alguns dias na época chuvosa.

O rompimento da barragem do fundão, ocorrido no dia 5 de novembro de 2015, gerou uma onda de inundação com pico de 66 m³/s a montante da confluência no rio do Carmo. Isso gerou um evento anômalo, durante os dias 8/11 a 10/11 e de 15/11 a 17/11, em que o rio do Carmo teve vazão de 1,6 a 1,76 vezes maior do que o rio Piranga.

Eventos de remobilização dos sedimentos com grandes vazões ocorreram em 2020, 2022 e 2023, com forte influência das águas vindas do rio Piranga. Por este ser um rio não afetado pela lama da barragem, estes eventos podem ter efeito diluidor, sendo a cheia de 2022 o evento mais importante devido ao seu grande volume.

Figura 23 – Vazão do rio do Carmo (SRC) e rio Piranga (estação ERP), entre 2013 e maio de 2023.



Fonte: Autora (2024).

Em relação aos dias de coletas das imagens utilizadas pode ser observado através da Tabela 3 que as imagens T08/2015 e T06/2017 foram obtidas em períodos de vazão menor que 100 m³/s. As imagens T01/2015, T05/2016, T04/2021 e T08/2022 foram realizadas em períodos com vazões semelhantes, próximos a 150 m³/s. Já a imagem T04/2022 foi realizada após um período de grande vazão, onde o rio Piranga ultrapassou os 800 m³ de vazão.

Para comparação entre as vazões, foi utilizada a razão de vazão entre o rio do Carmo (QSRC) e o rio Piranga (QERP) demonstrada pela Equação 3.

$$\text{Razão de vazão} = \frac{Q_{SRC}}{Q_{ERP}} \quad (3)$$

Em casos em que a vazão do rio do Carmo é maior, a razão de vazão é maior que 1, quando a vazão do rio Piranga é maior essa razão é menor que 1. As vazões dos rios do Carmo (SRC), rio Piranga (ERP) e a razão de vazão nos dias exatos de coleta de cada imagem, estão apresentadas na Tabela 3.

Após o rompimento da barragem do Fundão, nos dias 08 e 09 de novembro, QSRC chegou a 26,82 m³/s enquanto QERP era de 16,91 m³/s, chegando a uma razão de vazão de 1,65. Já para todos os dias de coleta de imagem a razão de vazão foi menor que 1, logo pode-se entender que a hidrodinâmica promovida pela maior vazão do rio do Carmo durante o desastre teve efeitos incomuns nessa confluência.

As menores razões encontradas nos dias 01/2015 e 04/2022 foram em épocas chuvosas e as maiores em 08/2015 e 08/2022 em épocas de seca. Isso indica que durante cheias há menor discrepância entre as vazões dos dois rios.

Tabela 3 – Vazão dos rios do Carmo e Piranga nos dias de coleta das imagens.

Código	Dia da imagem	Vazão SRC (m ³ /s)	Vazão ERP (m ³ /s)	Razão de vazão
T01/2015	21/01/2015	11,04	32,98	0,33
T08/2015	06/08/2015	13,97	24,39	0,57
T05/2016	04/05/2016	19,32	41,08	0,47
T06/2017	18/06/2017	15,95	36,02	0,44
T04/2021	24/04/2021	22,06	48,49	0,45
T04/2022	18/04/2022	33,33	97,90	0,34
T08/2022	15/08/2022	26,57	45,44	0,58

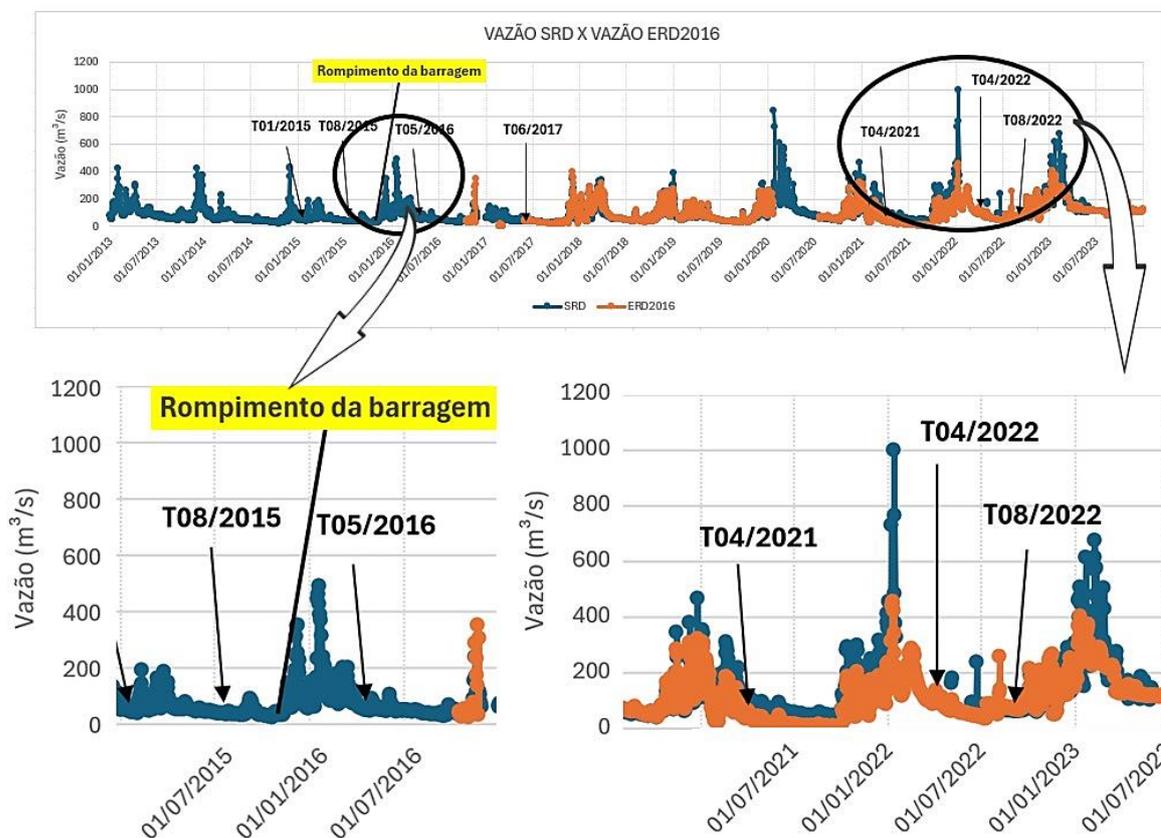
Fonte: Autora (2024).

Para a vazão do rio Doce após a confluência, foi considerada a somatória da vazão (SCR) e a vazão do rio Piranga medida na estação ERP, obtendo-se a vazão SRD (somatória do rio Doce).

A partir de 17 de outubro de 2016, ficaram disponibilizados os dados de vazões e cotas das estações da CPRM instaladas nos dois rios, a montante da confluência e no rio Doce a jusante. A estação ERD2016 (Estação rio Doce), que mede a vazão do rio Doce após a confluência, foi utilizada para comparação com a vazão obtida através de somatória, sendo o resultado exposto no gráfico da Figura 24, com destaque para momentos de grandes vazões, no qual a vazão SRD está em azul e a vazão da ERD2016 está em laranja. Como o esperado, as duas medições apresentaram picos e quedas de vazão nos mesmos períodos.

A vazão média SRD, durante esses 10 anos, no período da cheia foi de cerca de 123 m³/s, sendo as maiores cheias calculadas pela SRD ocorridas nos anos de 2020 (842 m³/s), 2021 (456 m³/s), 2022 (999 m³/s) e 2023 (675 m³/s). Segundo estudo de Marciano et. al. (2024) o evento de 2022 foi a maior inundação dos últimos 25 anos, sendo 53% maior do que o Desastre de Mariana.

Figura 24 – Vazão do rio Doce, SRD e ERD2016, entre 2013 e 2023 (Zoom no período do acidente e na cheia de 2022).



Fonte: Autora (2024).

A vazão média na cheia medida pela estação ERD2016 foi de 125 m³/s, com os mesmos picos de cheia, porém, em menor escala com 310 m³/s em 2021, 456 m³/s em 2022 e 404 m³/s em 2023; não houve registros da cheia de 2020.

Em época de seca a vazão média do rio Doce medida através da SRD foi de cerca de 57 m³/s, enquanto pela ERD2016 a vazão média foi de aproximadamente 55 m³/s, apontando para o bom desempenho do método da soma das vazões, utilizado aqui. Porém, vê-se que grandes discrepâncias são observadas nos períodos de picos de vazão o que pode estar associado a alterações na localização da régua medidora.

4.2. Dados de cota

Com o intuito de comparar a evolução de bancos de sedimentos na confluência estudada, foi necessária a obtenção de dados de cota e vazão para os dias de coleta das imagens. Como a estação disponível pós confluência (ERD2016) tem dados de cota disponibilizados a partir de 17/10/2016, não contemplando todo o período em estudo, fez-se necessário encontrar uma relação cota x vazão que pudesse ser utilizada. Desse modo, foi elaborado o gráfico da Figura 25, de cota x vazão com os dados da estação ERD2016, para os dados relativos ao período de 2016 a 2023.

A partir dos dados de vazão e cota foi estabelecida a equação exponencial da curva-chave (Equação 4), como feito por Santos et al., 2001; De Almeida et. al., 2013; Tamwing et al., 2022; entre outros.

$$Q = a * (h - h_0)^b \quad (4)$$

Onde:

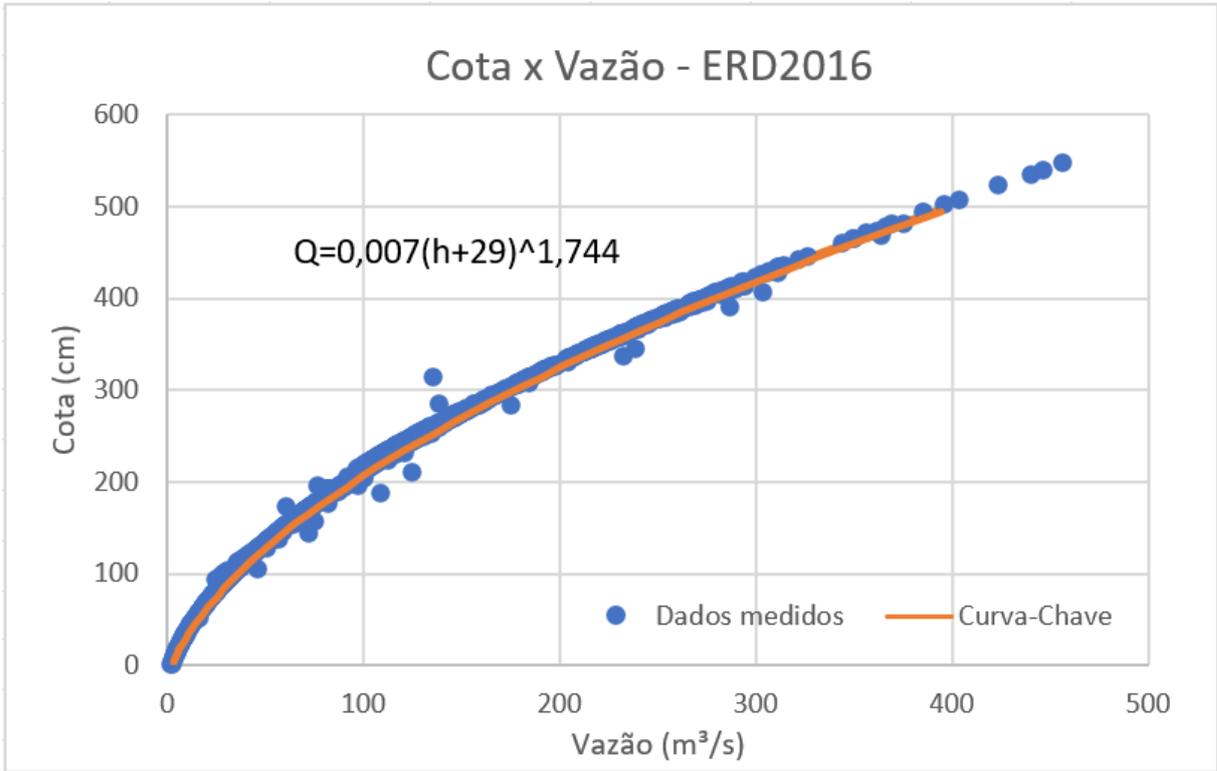
Q = vazão calculada (m³/s);

h = cota correspondente à vazão Q (cm);

h₀ = cota correspondente à vazão Q₀(cm);

a e b = Coeficientes de ajuste da curva-chave através de mínimos quadrados.

Figura 25 – Cota x Vazão do rio Doce - ERD2016 (curva-chave), entre 2016 e 2023.



Fonte: Autora (2024).

Este tipo de equação é usado com frequência pois, segundo Collischonn et al. (2013), é semelhante as relações encontradas entre cota e vazão em equações de escoamento em regime permanente e uniforme, em fórmulas como de Manning e Chezy. Com esta relação, a partir da Equação 5, foi calculada a cota do rio Doce para os dias de coleta das imagens, utilizando os dados SRD.

$$Cota(h) = \sqrt[1,744]{\frac{Q}{0,007}} - 29 \quad (5)$$

As cotas e vazões do rio doce, após sua confluência, nos dias das imagens utilizadas para avaliar a evolução das zonas de sedimentação, estão apresentadas na Tabela 4.

Vale ressaltar que as imagens T04/2021 e T08/2022 são perfeitamente comparáveis e podem fornecer importantes informações sobre as mudanças acontecidas na confluência causadas pelo grande pulso de 2021/2022.

Tabela 4 – Vazão e cota calculada para SRD.

Código	Dia da imagem	Vazão SRD (m ³ /s)	Cota SRD (cm)
T01/2015	21/01/2015	44,03	121,43
T08/2015	06/08/2015	38,25	109,76
T05/2016	04/05/2016	60,40	151,33
T06/2017	18/06/2017	51,97	136,43
T04/2021	24/04/2021	70,53	168,10
T04/2022	18/04/2022	131,25	252,43
T08/2022	15/08/2022	72,01	170,46

Fonte: Autora (2024).

Para entendimento da hidrodinâmica representada pelos derivadores é importante entender a relação da vazão de entrada entre os dois rios da confluência. No entanto, a estação do rio Piranga não gerou dados a partir de maio de 2023 para o cálculo de vazão SRD e sua cota equivalente.

Como o lançamento de derivadores em período de seca ocorreu em 26/09/2023, foi preciso o uso dos dados de vazão das estações ERP2016 e ERC2016. Por motivos metodológicos, as mesmas estações foram utilizadas para as medidas de vazões do dia de lançamento 12/12/2021. Os valores de vazão para os dias de lançamento dos derivadores são apresentados na Tabela 5, sendo estes representativos de período seco (26/09/2023) e chuvoso (12/12/2021).

Em época de seca, como no dia 26/09, o rio Piranga teve uma vazão 2,47 vezes maior do que a do rio do Carmo. Na época de cheia esta razão aumentou, com a vazão do rio Piranga sendo 20,9 vezes maior do que a do rio do Carmo. Portanto, é esperado que os derivadores apresentem representações distintas da hidrodinâmica da confluência.

Tabela 5 – Vazão do rio do Carmo e rio Piranga na entrada da confluência.

Dia de lançamento dos derivadores	ERC2016 (m ³ /s)	ERP2016 (m ³ /s)
12/12/2021	30,69	77,15
26/09/2023	19,00	47,00

Fonte: Autora (2024).

Os dados de vazão e cota obtidos foram utilizados para entender a evolução dos bancos de sedimentos estudados e compreender as respostas espectrais das assinaturas realizadas nos rios pertencentes a confluência do rio Doce.

4.3. Análise espectral relativa dos rios em estudo

As assinaturas espectrais dos alvos são utilizadas para observar as bandas de absorção e quanto de energia e em qual comprimento de onda o alvo é capaz de refletir. Assim, ao se comparar as assinaturas espectrais de água entre os rios é viável a análise acerca da compatibilidade com a assinatura padrão da água em seu estado puro e a água com presença de sólidos em suspensão.

Conforme Florenzano (2011), a água em estado puro, reflete pouco no espectro do visível (0,4 – 0,7 μ m), e tem reflexão quase nula na região do infravermelho (0,7-1,3 μ m), já quando há presença de sólidos suspensos (turbidez), há um aumento da resposta de número digital (ND) em direção aos comprimentos de onda mais longos, entre 0,5 e 0,70 μ m. No infravermelho a resposta também é maior em águas mais turvas do que em água sem sedimentos.

As principais bandas utilizadas para o entendimento das assinaturas espectrais dos rios, seus valores médios considerados e seus respectivos comprimentos de onda são apresentados na Tabela 6.

Para observar onde havia diferenças nas assinaturas espectrais, foram realizadas análises para as imagens T08/2015 e T05/2016 para os rios do Carmo, Piranga e Doce, a fim de verificar a mudança na quantidade de sedimentos antes e depois do acidente de Mariana.

Tabela 6 – Principais bandas espectrais utilizadas e respectivos comprimentos de onda.

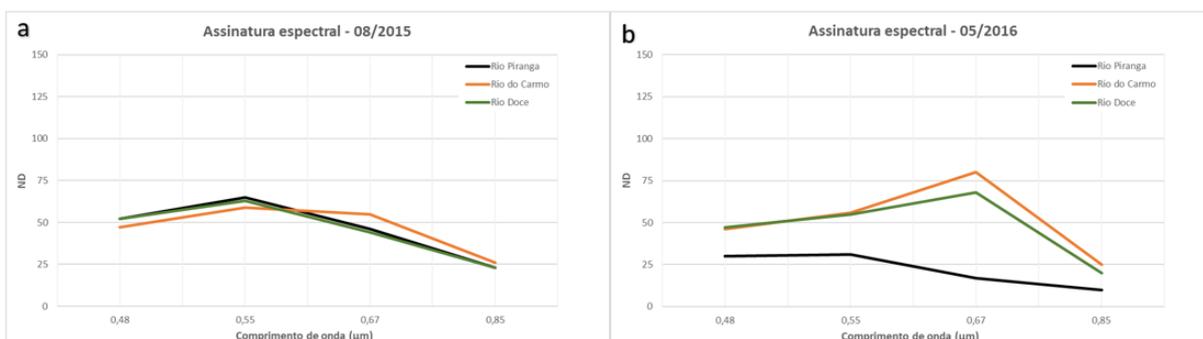
Banda espectral	Comprimento de onda (μm)	Valores médios de cada banda
Vermelho	0,630 – 0,690	0,673
Infravermelho próximo	0,750 – 0,850	0,850

Fonte: Adaptado de INPE (1995) e Pessi (2019).

Conforme pode ser observado da Figura 26, antes do acidente a resposta espectral das águas eram dominadas pela banda correspondente ao verde (Fig. 26a) e a após o desastre passam a ser dominadas pela banda correspondente ao vermelho (Fig. 26b).

Segundo Florenzano (2011) picos na região da banda do vermelho e respostas na banda do infravermelho são características apresentadas em águas com maior turbidez, esse crescimento na quantidade de sedimentos presentes no rio do Carmo em relação ao rio Piranga também foi observado por Marciano (2023). Por essa razão, os espectros serão analisados com foco nesta banda espectral.

Figura 26 – Assinatura espectral dos rios do Carmo, Piranga e Doce – T08/2015 e T05/2016.



Fonte: Autora (2024).

Considerando a diferença de comportamento do rio do Carmo e Piranga nas assinaturas espectrais da água nas imagens T08/2015 e T05/2016, foi considerado pertinente a análise das imagens ARP entre 2017 e 2022, a fim de avaliar se o comportamento dos rios se manteve.

As imagens de ARP utilizadas para análise representam: um período de seca típica, T06/2017 (18/06/2017) com a vazão SRD de 51,97 m³/s; duas imagens com vazões semelhantes em distintos períodos, T04/2021 (24/04/2021) com vazão de 70,53 m³/s e T08/2022 (15/08/2022) cuja vazão SRD foi de 72,01 m³/s; e uma cheia típica T04/2022 (18/04/2022) com vazão atingindo 131,25 m³/s.

4.3.1. Análise espectral relativa dos rios em cada imagem

Com os dados coletados foram elaborados os gráficos de comparação relativa entre as assinaturas espectrais da água dos três rios estudados, para todas as imagens já citadas (Figura 27).

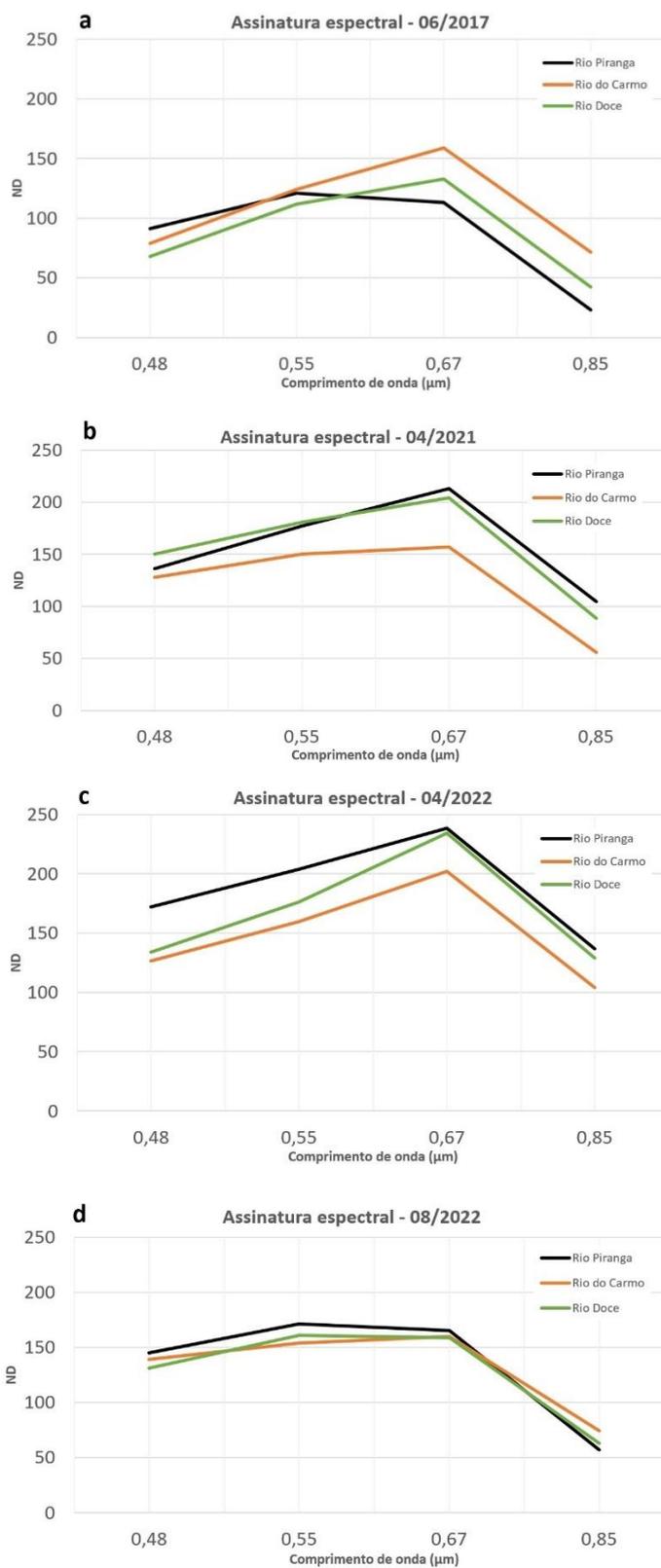
Em 06/2017 (Figura 27a), em típico período de seca, o rio do Carmo (laranja) que chegava à confluência com vazão de 15,95 m³/s, e o rio Doce (verde), de vazão de 51,97 m³/s apresentaram aumento no valor de ND em 0,67 µm (banda vermelha), sendo maior no rio do Carmo. O rio Piranga (preto), que tinha vazão 36,02 m³/s, 2 vezes maior que o Carmo, mas apresentou comportamento contrário decaindo nesta mesma região do espectro.

Segundo Chelotti (2017) os picos em 580nm e em 600nm indicam um deslocamento do espectro do verde para o vermelho, sendo este deslocamento um indicador de que há um aumento de concentração de sólidos suspenso.

Isso indica a presença de sólidos suspensos no rio do Carmo e a sua influência no rio Doce. O rio Piranga apresenta comportamento mais semelhante ao de águas com menor turbidez, com o declive da resposta (valor de ND) entre o verde e o vermelho, sendo ainda menor na faixa do infravermelho (Florenzano, 2011). Isto reforça o caráter do Rio Piranga como linha base ou de referência no quesito turbidez, para a região de estudo em época de seca.

Portanto, cerca de 1 ano e meio depois do acidente da barragem do Fundão, mesmo com uma vazão duas vezes menor, havia mais sedimentos presentes nas águas do rio do Carmo do que nas águas do Rio Piranga, sendo o primeiro o maior transportador de sedimentos para a confluência.

Figura 27 – Assinatura espectral dos rios do Carmo, Piranga e Doce, para cada imagem coletada.



a) Imagem de 06/2017; b) Imagem de 04/2021; c) Imagem de 04/2022; d) Imagem de 08/2022. Fonte: Autora (2024).

Em 04/2021, o rio Piranga apresentava vazão igual a 48,49 m³/s, o dobro do observado para o RC como aconteceu em 06/2017, já que o rio do Carmo apresentava vazão de 22,06 m³/s. O rio Piranga e Doce apresentaram aumento no valor de ND entre 0,54 e 0,67 μm (Figura 27b), sendo maior no rio do Piranga. A água rio do Carmo apresentou constância mais baixa nesta mesma região do espectro. Portanto, a influência nos sólidos em suspensão no rio Doce foi induzida pelo rio Piranga e esse resultado pode ter relação com medidas de restauração da bacia do rio do Carmo, como as apresentadas por Schaefer et al., (2015); Fundação RENOVA (2018); Scotti et al., (2020); Espindola et. al., 2022 e Rego (2023).

Em 04/2022, durante as cheias, Figura 27c, as assinaturas espectrais têm comportamento semelhante para os três rios, todos apresentando aumento do valor de ND na região do visível, com destaque para banda do vermelho 0,67 μm e queda dentro da região do infravermelho. Segundo Jensen (2009) à medida que se aumentam as concentrações de sólidos suspensos, o pico de resposta (valor de ND) começa se deslocar em direção à faixa do vermelho e infravermelho. Portanto, o rio Piranga apresenta mais sólidos suspensos, seguida do rio Doce. Infere-se, dessa maneira, que houve maior interferência e maior aporte de sedimentos do rio Piranga na assinatura espectral do rio Doce após a cheia.

Isto é confirmado por Marciano et. al., (2024) em sua análise quantitativa de sedimentos aportados na confluência do rio Doce após as chuvas de 2022, em que calcularam a contribuição de 3,1 x 10² hm³ pelo rio Carmo, e de 8,6 x 10² hm³ de sedimentos pelo rio Piranga.

Por representar a época de alta pluviometria, com vazões nos valores de 97,90 m³/s para o rio Piranga e 33,33 m³/s para o rio do Carmo, era esperado a presença de sólidos suspensos na água, causados pelo carreamento de sedimentos para o rio, através da chuva (Schiavetti e Camargo, 2002). A presença maior de sedimentos na água do rio Piranga pode ser explicada pelo maior volume e pelo uso e ocupação do solo em sua bacia, em que há forte suscetibilidade à erosão e degradações por parte de uso inadequado do solo próximo ao rio, com a ocorrência de desmatamento e pouca preservação de mata ciliar, o que eleva produção e erosão de sedimentos (CBH-Piranga, 2024).

Em 08/2022, Figura 27d, os rios tinham vazões próximas às vazões encontradas em 04/2021, porém as assinaturas apresentaram distinções. O rio do Carmo (vazão 26,57 m³/s) apresentou ligeiro aumento de reflexão na região do visível, enquanto nesta região, o rio Piranga, com vazão de 45,49 m³/s, e Doce, com vazão de 72,01 m³/s, apresentam queda dos valores de ND ainda que ligeiramente maiores do que o do rio do Carmo.

A proximidade entre as assinaturas espectrais demonstra que o nível de turbidez dos rios do Carmo e Piranga estavam próximos. Por não haver aumento da resposta de ND em 0,673µm pode-se inferir que nesse período havia menos sedimentos na água.

A imagem de seca de 06/2017 mostra que o rio Carmo teve maior turbidez e maior influência na turbidez da confluência, do que o rio Piranga. Uma hipótese para explicar esse resultado seria a influência dos resíduos de minério de ferro que foram depositados no fundo do rio do Carmo.

A menor quantidade de sedimentos apresentada normalmente pelo rio do Carmo após 2017 pode ter relação com os projetos desenvolvidos pela RENOVA e por outros colaboradores, para restauração e recuperação de margens, calha e APPs desenvolvidos na bacia do rio do Carmo, e que apresentaram bons resultados segundo Rego (2023), reduzindo a erosão dos solos e o transporte de sedimentos para o curso d'água. Naturalmente, ainda ocorre a remobilização do sedimento derivado do rompimento da barragem que não foi dragado.

O rio Piranga por não ter sido impactado diretamente pelo derrame da barragem do Fundão e transportar normalmente mais sedimentos, principalmente em épocas chuvosas, pode auxiliar na diluição da quantidade de resíduos de mineração depositados nos bancos de sedimentos, como ocorrido a jusante da confluência do Rio Pilcomayo e Pilaya na Bolívia (Hudson-Edwards, 2001, Smolders et.al, 2001).

4.3.2. Análise espectral temporal comparativa dos rios

Para uma análise comparativa entre as assinaturas espectrais dos rios nos períodos das imagens foram elaborados os gráficos da Figura 28, em que são comparados os valores de ND em 06/2017, 04/2021, 04/2022 e 08/2022.

Pela Figura 28a percebe-se que no rio Piranga os períodos de seca (06/2017 e 08/2022) apresenta menores valores de ND no vermelho e infravermelho, o que está relacionado a águas com menor turbidez, sendo 06/2017 o menos turvo.

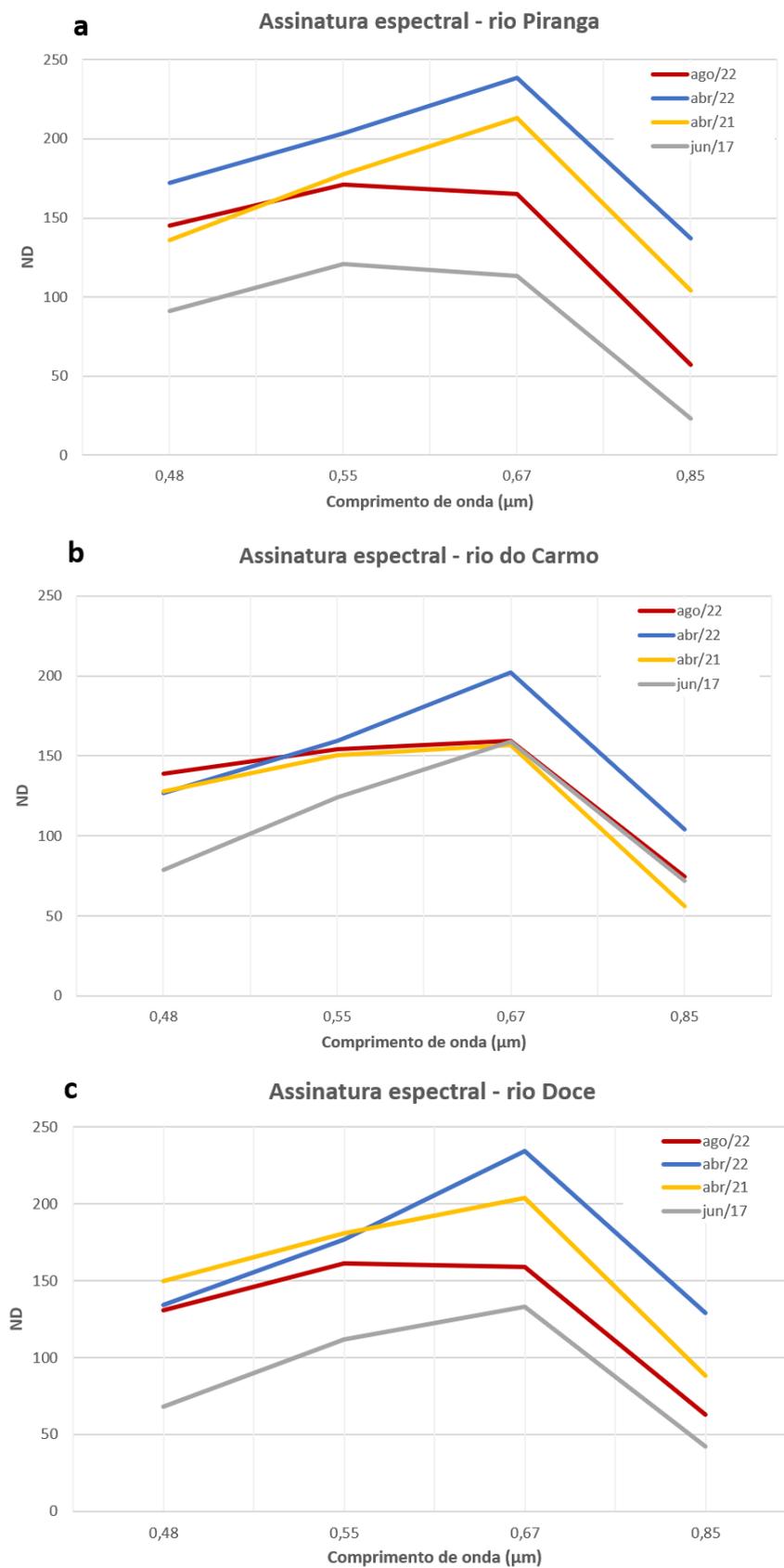
Já durante os períodos chuvosos (04/2021 e 04/2022), houve grande presença de sólidos suspensos. Observam-se diferenças significativas entre as curvas espectrais, principalmente nas regiões entre $0,67\mu\text{m}$ e $0,85\mu\text{m}$ (vermelho ao NIR).

Apesar da vazão do rio ser muito próxima nestes dois momentos, vazão de $48,49\text{ m}^3/\text{s}$ e $45,44\text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 3), o transporte de sedimentos do rio Piranga foi consideravelmente maior em 04/2021 do que em 08/2022. Isso pode ser explicado pois, apesar das vazões serem parecidas no dia de captura das imagens, a pluviosidade do período seco resultou em menores concentrações de sedimentos na água como também observado por Chelotti (2017). Isto é um indicativo do papel das chuvas como moduladora da turbidez neste rio.

No rio Piranga, considerando-se os valores de ND em $0,67\mu\text{m}$ entre abril de 2021 e 2022, os valores variaram de 213 para 238 (Figura 28a), respectivamente, um aumento de 11,7%. Para o Rio do Carmo (Figura 28b), os valores foram de 153 e 200, sendo essa variação de 28,6%. Como o rio Piranga apresentou maior turbidez e maior carga de sedimentos, essa maior variação do ND do rio do Carmo pode ser argumentada pelo fato de que entre os dois períodos chuvosos das imagens, o pulso de 2022 causou maiores mudanças na dinâmica do sedimento do Rio do Carmo.

No rio do Carmo (Figura 28b), curvas correspondentes a vazões semelhantes, 08/2022 e 04/2021, mas com períodos pluviométricos diferentes, apresentaram comportamentos parecidos, com valores de ND muito próximos ao longo de todo o espectro, com variação de 1,9%.

Figura 28 – Assinatura espectral para cada rio entre 06/2017, 04/2021, 04/2022 e 08/2022.



a) Rio Piranga; b) Rio do Carmo; c) Rio Doce. Fonte: Autora (2024).

Na Figura 28b, a seca de 06/2017 e a cheia de 04/2022 apresentam pico em $0,67\mu\text{m}$ o que indica a presença de turbidez na água. A presença de sólidos suspensos nas águas do rio do Carmo mesmo em época de seca em 2017 foi observada também no estudo de Araújo (2018) com coletas realizadas em 09/06/2017 no rio do Carmo, a montante da confluência com o rio Piranga, onde foi observado, a existência de maiores concentrações de sólidos suspensos e substâncias características da lama de Mariana em comparação ao rio Piranga.

No rio do Carmo houve maior quantidade de sedimentos em 2022, em comparação com 2021. Isso pode ser explicado pelo alto índice de vazão do rio do Carmo nesse período, de $33,33\text{ m}^3/\text{s}$, a maior vazão para este rio dentre as imagens estudadas, gerando carreamento de sedimentos vindos da bacia e o revolvimento do leito coberto por resíduos de mineração.

Na confluência do rio Doce, Figura 28c, onde as águas do rio do Carmo encontram o rio Piranga, houve maior presença de sólidos suspensos em 04/2022, seguido de 04/2021. Já na seca de 06/2017, houve menor quantidade de sedimentos sendo transportados, com o rio do Carmo com maior carga de sedimentos e o rio Piranga atuando como modulador da turbidez.

Como esperado nas amostras de cheias houve maior transporte de material suspensos e água mais turva do que nas amostras de seca, com o rio Piranga aportando maior carga de sedimentos.

A baixa pluviometria interfere de maneira que quanto menos chuva, menor a erosão e conseqüentemente menor o transporte de sedimentos até os rios afluentes, que, com vazões reduzidas, produzem menor carreamento de sedimentos (Chelotti, 2017).

De maneira geral, a turbidez e as concentrações de sedimentos do rio Doce estiveram mais influenciadas pelo rio com maior aporte de sedimentos, em 06/2017 pelo rio do Carmo e nos períodos restantes pelo rio Piranga. Isso pode causar diferenças na origem dos sedimentos depositados nos bancos de sedimentos nesse período, visto que o RC foi quem transportou lama de mineração para o RD. Já o rio Piranga teve relevância principalmente no transporte de sedimentos da cheia ocorrida em 2022.

4.3.3. Considerações sobre as análises espectrais

Considerando a análise espectral relativa a cada rio da confluência e ao longo dos anos, pode-se inferir que:

1 - É possível utilizar as assinaturas espectrais de imagens de ARP para análise comparativa sobre as quantidades de sedimentos da água e entendimento da influência de cada afluente na confluência.

2 - Durante a seca (06/2017), o rio do Carmo teve maior quantidade de material suspensos e água mais turva do que o rio Piranga, ainda que sua vazão e erosão da bacia por parte da pluviosidade, fosse menor. Isso indica que em 2017 a maior turbidez pode ter sido influenciada pelo revolvimento do leito e seus resíduos de minérios vindos da lama de Mariana.

3 - Durante a cheia de 04/2022, o rio Piranga estava com vazão de 97,90 m³/s, a maior entre os rios Carmo e Piranga para as imagens estudadas, e transportava maior quantidade de sólidos suspensos. Esse resultado encontra respaldo na associação entre a alta pluviosidade e a forte suscetibilidade à erosão, o uso inadequado do solo próximo as margens e o desmatamento encontrados na bacia (CBH-Piranga, 2024).

4 - A assinatura espectral pode verificar diferenças de turbidez em vazões semelhantes como as de 04/2021 e 08/2022. A análise dessas imagens apresentou maiores concentrações de sedimentos no rio Piranga em 04/2021 do que em 08/2022, já para o rio do Carmo as leituras foram praticamente iguais. Isso gera a hipótese de que o rio do Carmo pode estar se recuperando gradualmente do impacto sofrido com o rompimento da barragem do Fundão.

5 - A turbidez e as concentrações de sedimentos do rio Doce estiveram mais influenciadas pelo rio com maior aporte de sedimentos, rio do Carmo em 06/2017 e rio Piranga nos outros momentos estudados. Logo, há diferenças na origem dos sedimentos depositados durante esse período, nas barras encontradas pelos derivadores, tendo o rio Piranga maior relevância nos sedimentos depositados na cheia ocorrida em 2022, como também verificado por Marciano et. al., (2024).

4.4. Análise da hidrodinâmica fluvial por meio de derivadores

Com os dados de latitude, longitude e velocidade que são fornecidos pelos derivadores, é possível representar o comportamento hidrodinâmico que ocorre na superfície do curso d'água.

Os dispositivos foram lançados no dia 12/12/2021 de modo a representarem o comportamento da confluência em época de chuvas. Com a possibilidade de diferentes trajetórias de deslocamento, os dispositivos foram lançados também em época seca, no dia 26/09/2023.

4.4.1. Lançamento de derivadores em época chuvosa

No dia do experimento, a vazão do rio do Carmo era de 30,69 m³/s, medida pela estação ERC2016 e a do rio Piranga de 77,15 m³/s medida pela estação ERP2016. O caminho percorrido pelos derivadores 1, 2, 3 e 4 lançados no dia 12/12/2021 e suas respectivas velocidades estão expostas na Figura 29.

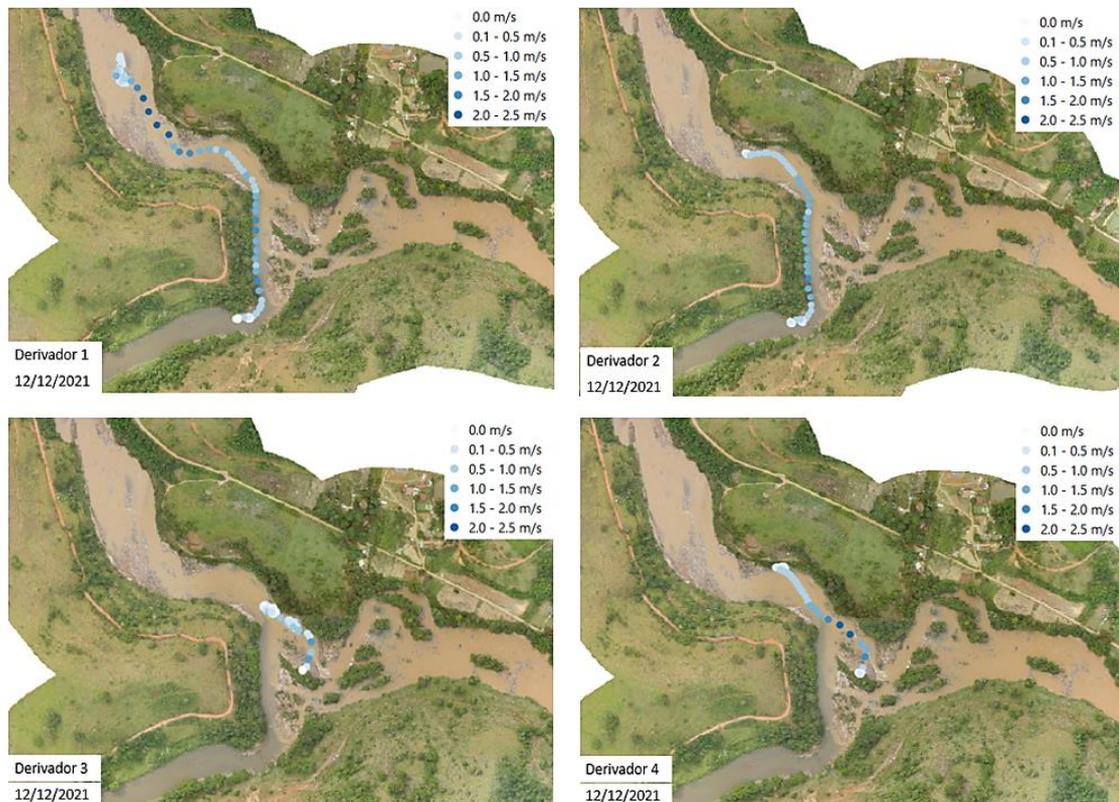
O deslocamento dos derivadores foram representados por pontos e a velocidade de seu deslocamento varia gradualmente em escala de azul (Figura 29), começando de 0 m/s (branco) até 2,5 m/s (azul escuro). Este intervalo de velocidade também foi obtido via modelagem numérica, nesta confluência do rio Doce, por Marciano (2024) e Marciano et. al. (2024).

Os derivadores número 1 e 2 (Fig.29) lançados a montante da confluência no rio do Carmo, foram deslocados para a margem esquerda do canal quando encontraram a primeira e a segunda confluência assimétrica (destacadas na Figura 8) com o rio Piranga. Nesta área a velocidade foi de 0,1 a 1,5 m/s.

Ao continuar seu caminho, o derivador 1 encontrou a última confluência, de característica simétrica. Esta junção produz uma zona de baixa velocidade no centro do curso d'água (entre 0 e 0,5 m/s) que é atravessada pelo dispositivo. Como pode ser observado na Figura 29, logo após a confluência, o rio faz uma curva para a esquerda e encontra um enrocamento. Isto faz com que a água retome velocidade

chegando a alcançar de 2 a 2,5 m/s. Por fim, o dispositivo encontrou uma zona de velocidade nula na barra central do canal, onde ficou estacionado e foi resgatado.

Figura 29 – Comportamento dos derivadores no lançamento realizado dia 12/12/2021.



Fonte: Autora (2024).

O derivador número 2, após a confluência simétrica foi deslocado para a margem direita onde encontrou ponto de velocidade baixa, entre 0 e 0,5 m/s, quando foi resgatado.

Foi observado também que o rio Piranga atua de maneira a “empurrar” as águas do rio do Carmo para a margem esquerda ao longo das duas primeiras confluências assimétricas (conforme derivadores 1 e 2), o que foi observado também por Best (1988).

Os derivadores 3 e 4 (Fig. 29) foram lançados no rio Piranga a montante da confluência simétrica. O derivador 3 entrou na confluência em baixa velocidade, sendo deslocado para a direita, onde permaneceu em baixa velocidade e ficou preso nas

pedras do estreitamento da calha (destacado na Figura 8) ali presente. Já o derivador número 4, representou comportamento distinto. Assim que foi lançado encontrou corrente com velocidade de 2 m/s a 2,5 m/s no centro da confluência, depois prosseguiu até uma zona de velocidade 0 na barra lateral direita, antes do início do enrocamento (destacado na Figura 8), onde foi recolhido próximo ao derivador 2.

O lançamento dos derivadores pode identificar áreas na confluência que possuem altas velocidades, características de áreas de erosão, e áreas de baixa velocidade, características de áreas de deposição, essas são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Áreas de erosão e deposição indicados pelos derivadores em época chuvosa.

Áreas de erosão	Áreas de deposição
Centro do enrocamento	Área central após enrocamento (barra central)
Início da confluência simétrica	Margem direita (barra lateral)

Fonte: Autora (2024).

A presença de zona de alta velocidade; entre 2 e 2,5 m/s; no centro do canal (após o enrocamento, conforme derivador 1) também é compatível com a literatura (Mosley, 1976; Best, 1987). A zona de velocidade máxima está associada ao afinulamento do canal (Marciano 2022). Estas zonas estão associadas à junção dos fluxos após a zona de separação de fluxo (Best, 1987; Biron 1996).

A zona de velocidade 0 localizada na margem direita, após o estreitamento (observadas pelos derivadores 2 e 4), também é prevista por (Mosley, 1976; Best, 1987). O fato deste deslocamento ocorrer somente para a margem direita e haver envolvimento de derivadores vindos dos dois canais aponta que, nessa região, há mistura das massas d'água. Já foi observado por Best e Roy (1991) este mesmo comportamento, que eles definiram como causa principal a presença de apenas uma célula vertical rotativa, girando em sentido horário, com movimento ascendente no

centro do canal e descendente na margem, de forma a depositar sedimentos na barra lateral.

A zona de baixa velocidade no centro de confluências, presente nesta após o enrocamento, foi observada por Mosley (1976); Best (1987), Best (1988), Ashworth, (1996) e Samir et. al. (2022).

Zonas de baixa velocidade ou zonas de estagnação ocorrem devido à deflexão dos fluxos na junção (Marciano et. al., 2024) e possuem relação com cisalhamento por atrito e aumento da pressão e profundidade (Best, 1987; Biron et al., 1996).

Em comparação com os locais de depósitos de sedimentos encontrados por Mosley (1976), Best (1987), Best e Roy (1991), e Marciano et. al. (2024) os derivadores lançados em época de cheia mostraram a existência de condições de sedimentação na zona de barra central, prevista na literatura, mas que não foi encontrada na simulação de Marciano et. al. (2024) e na zona de barra lateral direita também prevista em outros estudos. Essas barras foram confirmadas a partir de observações *in loco* e por análises multitemporais de imagens de alta resolução, a serem discutidos na Seção 4.5.

4.4.2. Lançamento de derivadores em época seca

Em 26/09/2023 foi realizado outro trabalho de campo afim de captar a hidrodinâmica da confluência em períodos de seca. Foram lançados os derivadores 5, 6, 9 e 10 a montante da confluência no rio do Carmo e os derivadores 7 e 8 no rio Piranga, a montante da confluência. Neste experimento a vazão do rio do Carmo foi de 19 m³/s, medida pela estação ERC2016 e a do rio Piranga de 47 m³/s, obtido pela estação ERP2016.

O deslocamento dos derivadores lançados neste dia e suas respectivas velocidades estão expostos na Figura 30. Os dispositivos foram representados por pontos e a velocidade de seu deslocamento varia gradualmente em escala de vermelho com início em 0 m/s (branco) até acima de 3,5 m/s (vermelho escuro). Assim como encontrado por Marciano (2024) a velocidade da confluência varia

majoritariamente entre 0 e 2,5 m/s, sendo encontradas velocidades entre 2,5 e 3,5 m/s apenas no rio Piranga próximo a entrada da confluência simétrica.

Os derivadores lançados no rio do Carmo 5, 6, 9, 10 (Fig. 30) apresentaram comportamento semelhante no encontro com a primeira confluência assimétrica, com sua linha de deslocamento próximo ao centro do canal com velocidade entre 1 e 2 m/s.

Os derivadores seguiram com trajetórias semelhantes no encontro com a segunda confluência, onde as águas do rio do Carmo são “empurradas” pela entrada do canal do rio Piranga, e assumem velocidade de 0,5 a 1,5 m/s. Após a confluência simétrica, contudo, houve distinções na hidrodinâmica observada por estes traçadores.

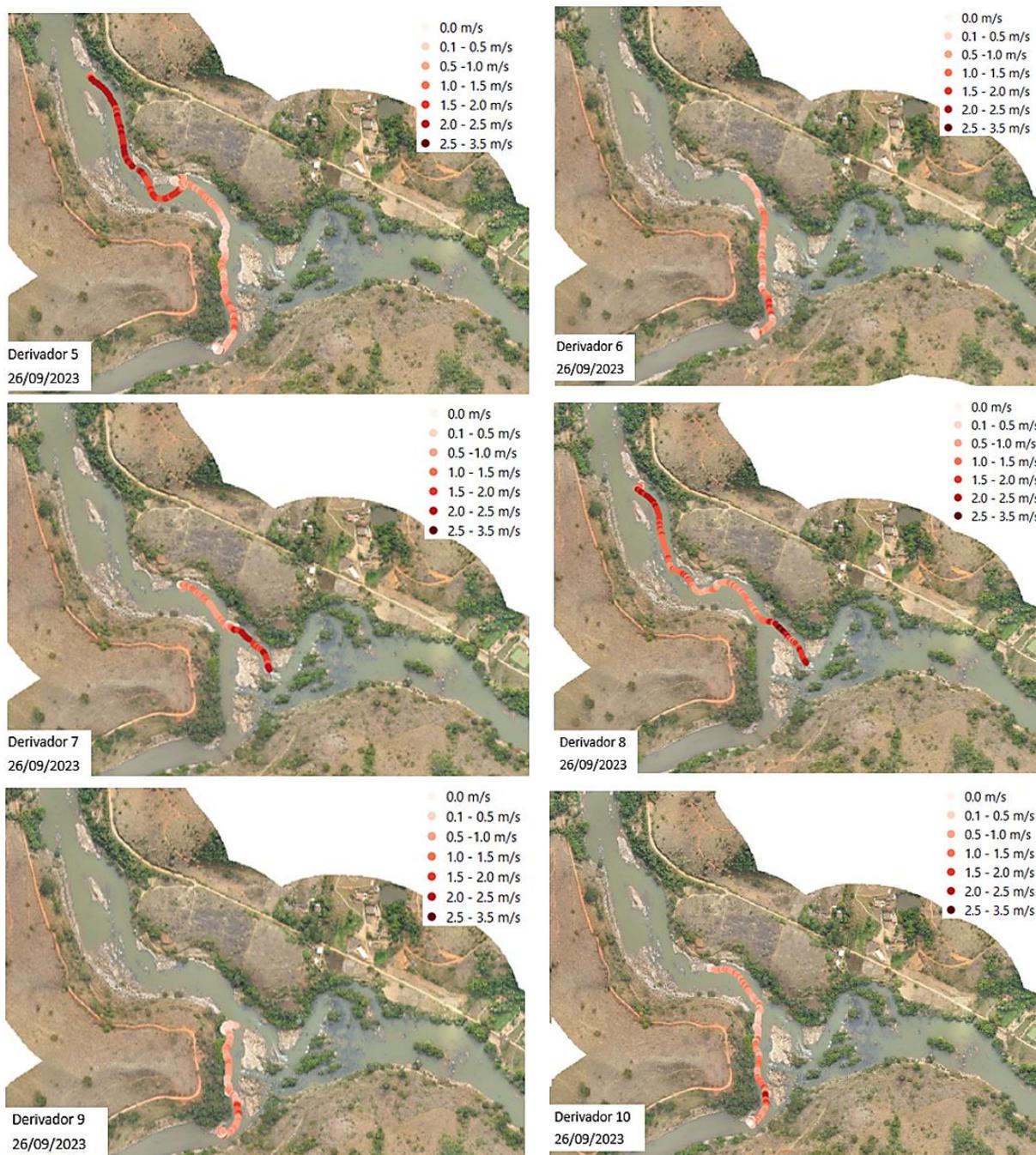
Os derivadores 5, 9 e 10 lançados no rio do Carmo, encontram velocidades próximas a 0 antes do início da confluência simétrica, onde foi encontrado o derivador 9. No início da confluência em Y, os derivadores 5 e 10 encontraram zona de baixa velocidade, entre 0,1 e 0,5 m/s, sendo depois transportados por uma zona de crescimento de velocidade (0,5 e 1,0 m/s) próximo ao centro do canal pelo lado direito e depois direcionados a um vórtice ali presente, onde foi encontrado o derivador 10.

Após se desvencilhar do vórtice, o derivador 5 seguiu com velocidade de 2 a 2,5 m/s pelo centro da confluência, margeando a área da barra central, após o enrocamento.

O derivador 6 também lançado no rio do Carmo, encontrou a mesma zona de velocidade baixa após a terceira confluência e sofreu um deslocamento para a margem direita, na qual há uma zona de velocidade 0 onde o dispositivo ficou estacionado e foi resgatado.

Os derivadores 7 e 8 (Fig. 30) lançados no rio Piranga entraram na confluência simétrica com velocidades normalmente entre 2 e 2,5 m/s. Este ponto da confluência é o único em que a velocidade chegou a ultrapassar 2,5m/s. Posteriormente, foram direcionados ao centro do canal, perdendo velocidade antes do estreitamento e seguindo com velocidade entre 0,5 e 1,0 m/s até o encontro com o vórtice presente, e seguiu para a margem direita, onde o derivador 7 foi recolhido.

Figura 30 – Comportamento dos derivadores durante experimento realizado dia 26/09/2023.



Fonte: Autora (2024).

Já o derivador 8 percorreu a mesma trajetória do derivador 5 após o vórtice, com velocidade aumentando gradualmente e margeando a barra central, até ficar preso entre as pedras próximas ao ponto de coleta final.

O lançamento dos derivadores em época de seca pode identificar áreas na confluência que possuem altas velocidades, características de áreas de erosão, e áreas de baixa velocidade, características de áreas de deposição ou vórtices. Como indicado na Tabela 8.

O vórtice encontrado pelos derivadores 5, 7, 8 e 10 pode ser explicado pelo fato da confluência em estudo ter duas das três características que aumentam a convecção de vorticidade a jusante, apresentadas por Bradbrook, Lane e Richards (2000): a presença de uma barra lateral e a redução geral da largura do canal pós-confluência (estreitamento da calha), quando comparado a largura total dos dois canais.

Em comparação com o detectado em época de cheia, em que houve um deslocamento maior para a esquerda graças ao rio Piranga, fica evidente a menor influência do canal do rio Piranga, como visto por Biron et al. (2004), Paes (2007), Bilal; Xie; Zhai (2020).

Tabela 8 – Áreas de erosão e deposição indicados pelos derivadores em época seca.

Áreas de erosão	Áreas de deposição
Zona de cisalhamento em volta da barra central	Início da confluência simétrica na margem esquerda (vórtice)
Centro do enrocamento	Margem direita (barra lateral)

Fonte: Autora (2024).

Este experimento também mostrou uma zona de alta velocidade no centro do canal, o que indica que há erosão do leito (Mosley, 1975; Ashmore e Parker, 1983; Best, 1988; Rodrigues et al., 2006) após o enrocamento (destacado na Figura 8), com velocidades (entre 1 e 2m/s), próximas às encontradas em período de cheia.

A presença de uma zona de cisalhamento (encontrada por 5 e 8) em forma de meia lua e com alta velocidade próxima ao banco de sedimentos da barra central, é vista também em Mosley (1976) e Marciano et. al. (2024).

Marciano et. al (2024) previu a formação de barras laterais em ambos os lados da confluência, contudo os derivadores indicaram zona de deposição maior apenas de um lado do canal, na barra lateral direita (derivador 6, 7 e 10), isso pode ser visto também em Dos Santos e Stevaux, J. C. (2017).

4.4.3. Considerações sobre a hidrodinâmica da confluência

Considerando a hidrodinâmica superficial obtida através dos derivadores nos dois experimentos foi possível notar os seguintes pontos:

1 – A formação da barra central acontece em períodos de cheia com influência principal dos sedimentos vindo do rio do Carmo, conforme observado com o derivador 1.

2 – Durante cheias ocorre a formação de zona de velocidade 0 próximas a barra lateral direita, e tanto os sedimentos do rio do Carmo quanto do rio Piranga podem ser direcionados para estas zonas, conforme derivadores 2 e 4.

3 – Durante baixa vazões ocorre a formação de um vórtice próximo ao enrocamento e da barra lateral direita, de acordo com os derivadores 5 e 10. Ocorreu também o direcionamento dos derivadores e possíveis sedimentos vindos do rio do Carmo para a barra lateral direita, conforme derivador 6.

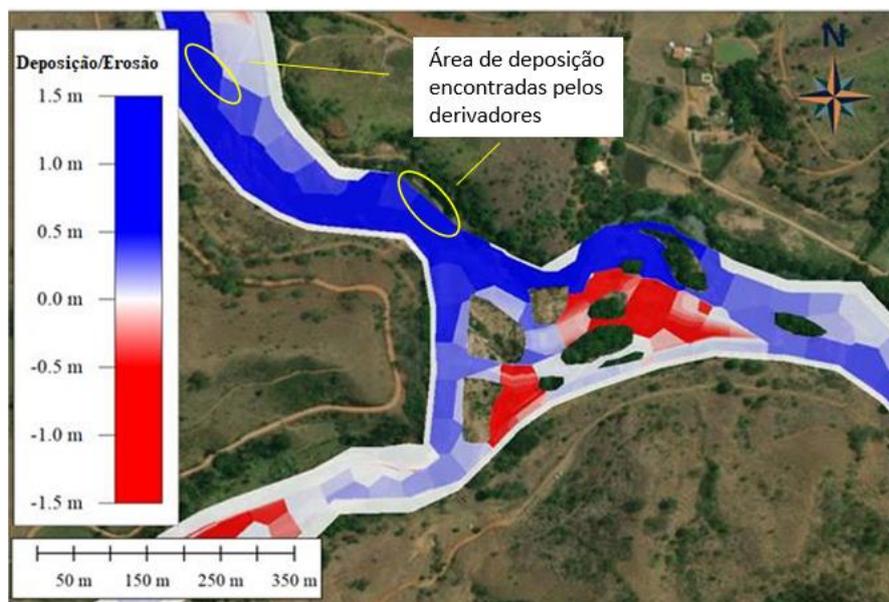
4 – A possível presença de uma única célula vertical rotativa girando em sentido horário que ajuda a promover o depósito de sedimentos na barra lateral direita.

5 – Os derivadores lançados no rio Piranga foram direcionados para pontos de deposição próximos a barra lateral direita ou ficaram presos no vórtice.

Locais de sedimentação nesta confluência foram previstos pela simulação hidrodinâmica 2D realizada por Marciano (2024) exposta na Figura 31. Nessa simulação, após a confluência simétrica, toda a região é área de deposição de sedimentos (área azul), incluindo as zonas de baixa velocidade encontradas pelos derivadores (indicado em amarelo). No entanto, zonas de altas velocidades, como no

centro do enrocamento e em volta da barra central também foram consideradas área de deposição.

Figura 31 – Área de deposição de sedimentos na confluência do rio do Carmo e rio Piranga.



Fonte: Adaptado de Marciano (2024).

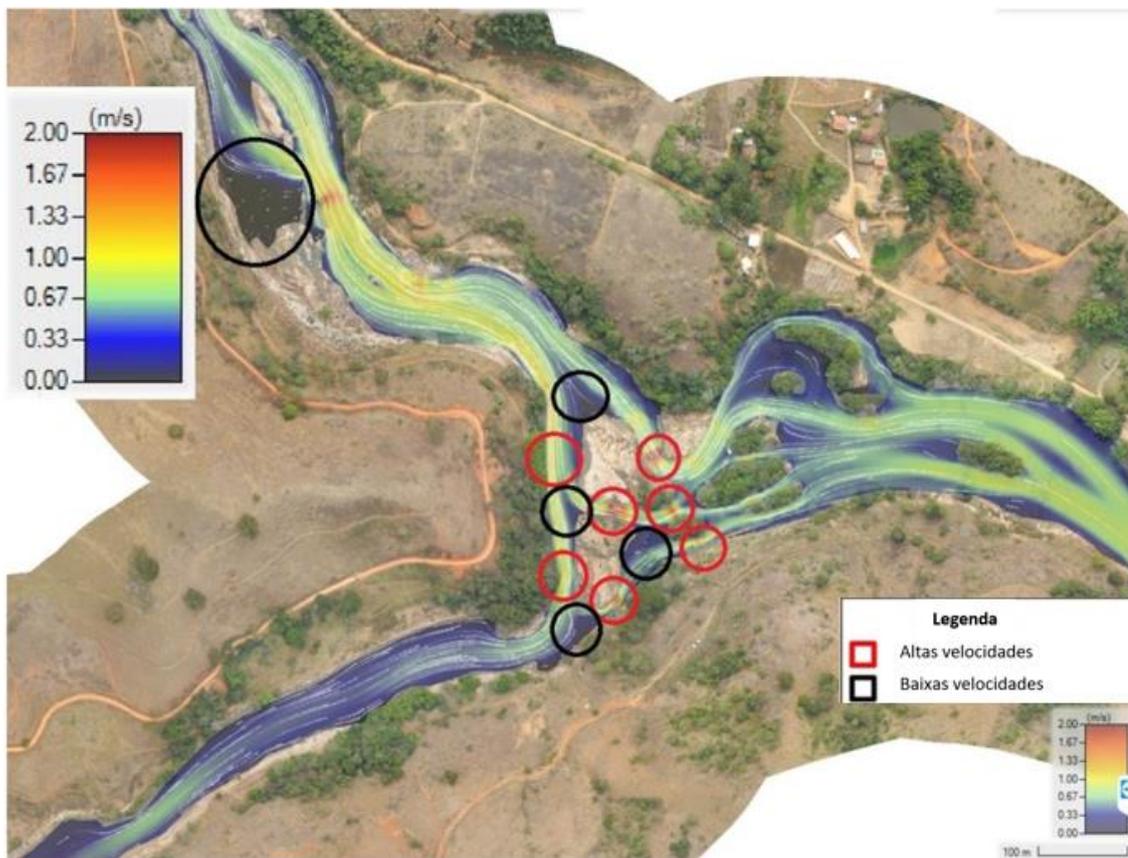
Após estes estudos, novas simulações de velocidade (Figura 32) e deposição de sedimentos (Figura 33) foram realizadas na confluência considerando o cenário da forte cheia de 2022 por Marciano et. al (2024).

Quando Marciano et. al. (2024) analisaram a velocidade na região foi encontrado após entrada na confluência simétrica, as mesmas regiões de maior velocidade encontradas pelos derivadores, sendo obtidas velocidades entre 1,3 e 2,0 m/s (Figura 32, amarelo) pela simulação e entre 1,5 e 2,5 m/s através dos derivadores.

No que tange a deposição e erosão, esta nova simulação obteve resultados mais próximos aos encontrados através dos derivadores. As regiões de baixa velocidade nas margens, as barras laterais (Fig. 33, indicada em amarelo), mantiveram a categoria de zonas de deposição (Fig. 33, azul), enquanto as zonas de altas velocidades encontradas pelos derivadores, na desembocadura do rio Piranga, no centro do enrocamento, e próximo a barra central (Fig. 33, indicada em amarelo) foram consideradas zonas de erosão (Fig. 33, vermelho).

Curiosamente, próximo as barras laterais, principalmente a direita, foram encontradas também áreas de erosão, o que pode dificultar o crescimento da barra. Ao contrário do que foi indicado pelos derivadores, a área da barra central não foi indicada pela simulação como zona de deposição.

Figura 32 – Velocidade encontrada por Marciano et. al. (2024) através de simulação hidrodinâmica na confluência do rio do Carmo e rio Piranga.



Fonte: Adaptado de Marciano et. al. (2024).

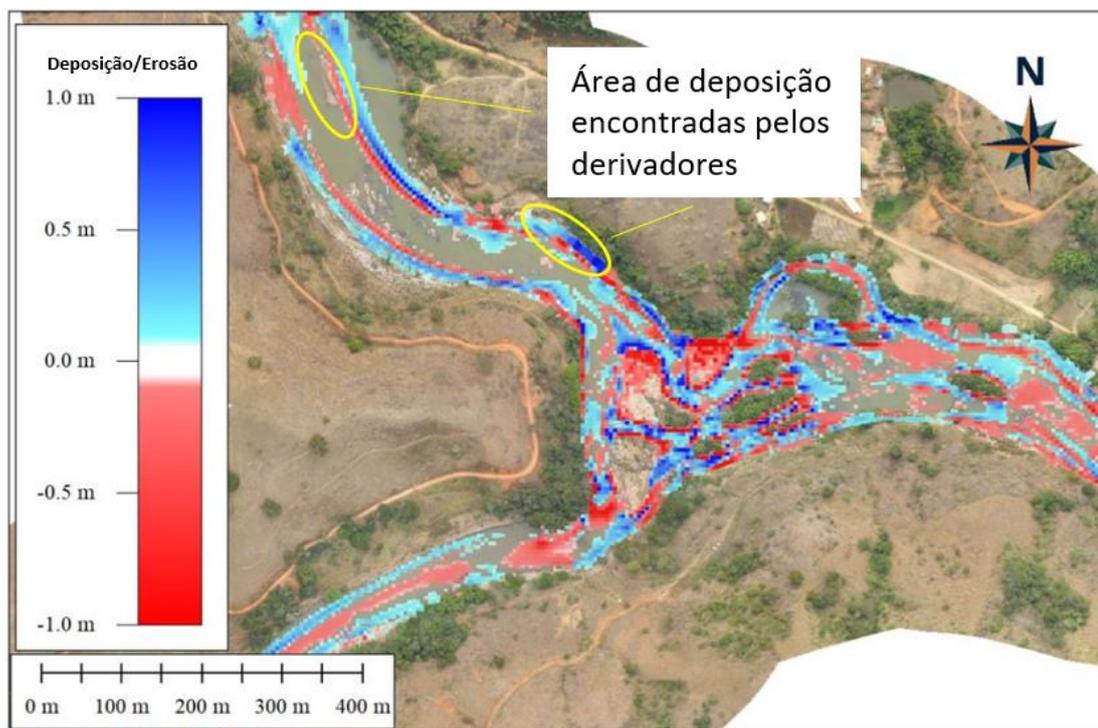
Considerando as simulações realizadas por Marciano (2024) e Marciano et. al. (2024) e as indicações dos bancos de sedimentação feita pelos derivadores, duas áreas foram escolhidas para análise da evolução dos bancos de sedimentação presentes na confluência, a barra central e a barra lateral direita.

A barra central, por ser zona de baixa velocidade encontrada pelos derivadores e zona de deposição, que foi confirmada na simulação numérica para o cenário antes

da grande cheia de 2022, mas não foi detectada pela simulação referente a cheia de 2022, tendo sido, ao contrário, indicada como região de erosão.

A barra lateral direita, região amplamente visitada pelos derivadores, que foi confirmada como área de deposição nas duas simulações. Porém, a simulação, considerando o cenário da cheia de 2022 aponta para áreas de erosões muito próximas a esses bancos. Isso indica que, no caso de novas cheias, seu crescimento ao longo do tempo estará vulnerável, podendo a ser remobilizado para o curso d'água.

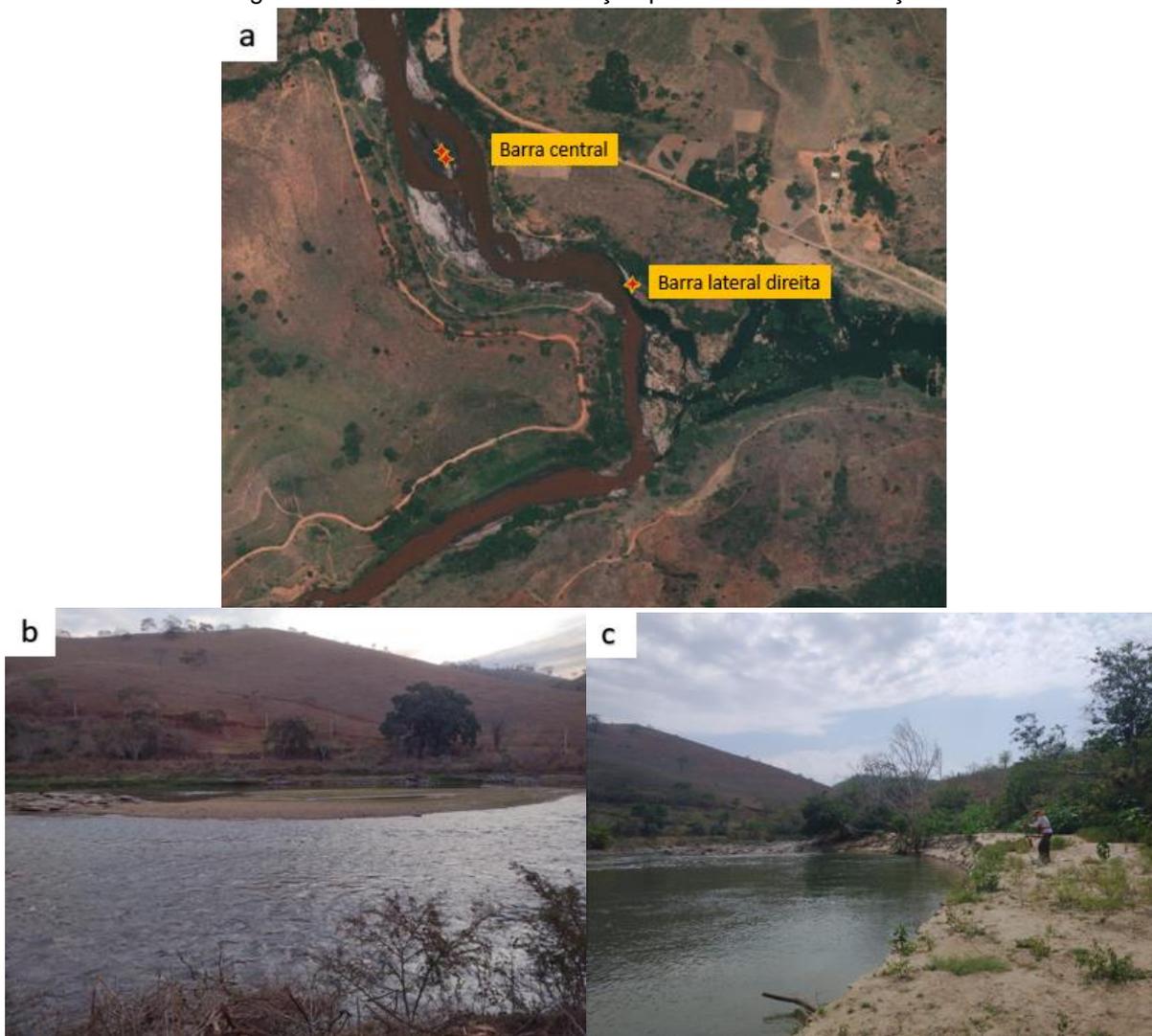
Figura 33 – Área de deposição encontrada por Marciano et. al. (2024) através de simulação hidrodinâmica na confluência do rio do Carmo e rio Piranga.



Fonte: Adaptado de Marciano et. al. (2024).

A localização dos depósitos a serem analisados e as fotos dos locais tiradas durante o trabalho de campo de 26/09/2023 são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Locais de sedimentação para análise de evolução.



(a) Bancos de sedimentação indicados pelos derivadores, (b) Barra central e (c) Barra lateral direita. Fonte: Autora (2024).

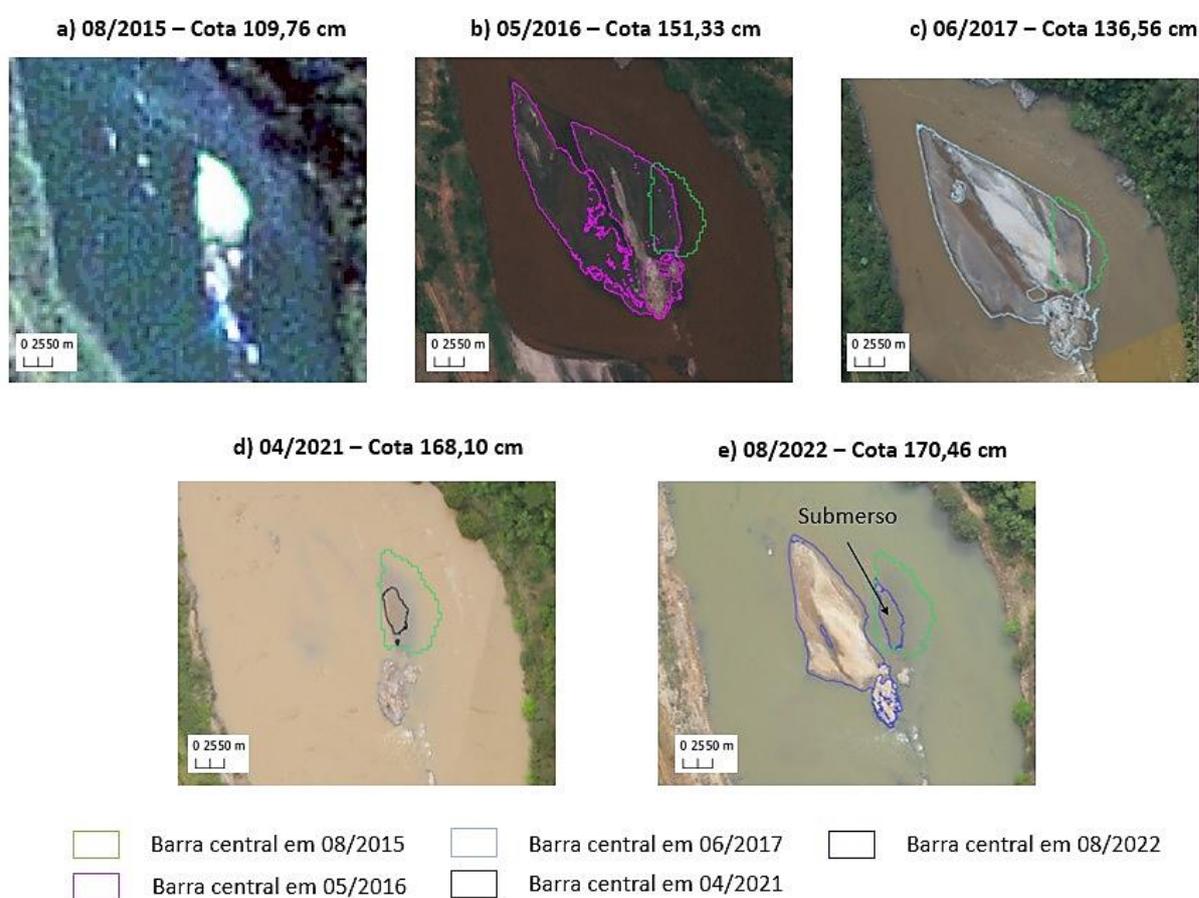
4.5. Análise da evolução temporal dos bancos de sedimentos através de imagens de satélite e ARP

Por meio da adaptação da metodologia de Wen (2020) de extração por índice NDWI, a inclusão do uso do índice BSI e a definição de polígonos por limiarização binária e vetorização automática foram obtidos os polígonos de contorno dos bancos de sedimentos denominados barra central e barra lateral direita para os anos de 2015, 2016, 2017, 2021 e 2022.

4.5.1. Análise qualitativa da evolução temporal – Barra central

Os resultados da vetorização através do uso dos índices NDWI e BSI foram sobrepostos sobre as imagens RGB. Os correspondentes bancos de sedimentação localizados na barra central (BC) e sua evolução entre 2015 e 2022, são expostos na Figura 35.

Figura 35 – Evolução da Barra Central entre 2015 e 2022.



Fonte: Autora (2024).

Considerando a localização dos bancos de sedimento dentro do rio e a flutuação da cota devido as variações de vazão, é necessário a obtenção dos dados de cota para análise dos resultados. Os dados de cota, relativos as imagens usadas para obtenção dos polígonos da barra central (BC), são exibidos na Tabela 9. O banco

assinalado como submerso na imagem de 08/2022, foi mostrado para facilitar a localização da barra, porém não teve sua área contabilizada.

Em 08/2015 antes do desastre de Mariana, a barra central (Figura 35a e assim para todas as outras, em verde) da confluência formadora do rio Doce possuía área exposta de 908,66 m², quando o rio apresentava vazão de 38,2 m³/s e cota de 109,76 cm.

Tabela 9 – Cota calculada para SRD e área dos bancos de sedimentos da barra central.

Código	Dia da imagem	Vazão SRD (m ³ /s)	Cota SRD (cm)	Área (m ²)
T08/2015	06/08/2015	38,25	109,76	908,66
T05/2016	04/05/2016	60,40	151,33	4244,49
T06/2017	18/06/2017	51,97	136,43	5212,54
T04/2021	24/04/2021	70,53	168,10	152,16
T08/2022	15/08/2022	72,01	170,46	1723,37

Fonte: Autora (2024).

Em 05/2016, após o desastre de Mariana, a barra central (Figura 35b, em rosa) possuía área exposta de 4244,49 m², e o rio apresentava vazão de 60,40 m³/s e cota de 151,33 cm. Diferentemente de 08/2015, BC apresentava forma ovalada com a parte final mais fina. Assim, o desastre influenciou tanto a forma quanto a área desta feição, resultando em aumento superior a 4 vezes, mesmo se considerando que em maio de 2016 o rio estava 41 cm mais alto, o que leva à subestimação da real variação, quando comparado ao estado pré-desastre.

Em 06/2017, BC (Figura 35c, em azul claro) possuía área exposta de 5212,54 m², quando o rio apresentava vazão de 51,97 m³/s e cota de 136,43 cm. O formato do banco de sedimentos sofreu pouca alteração entre 05/2016 e 06/2017.

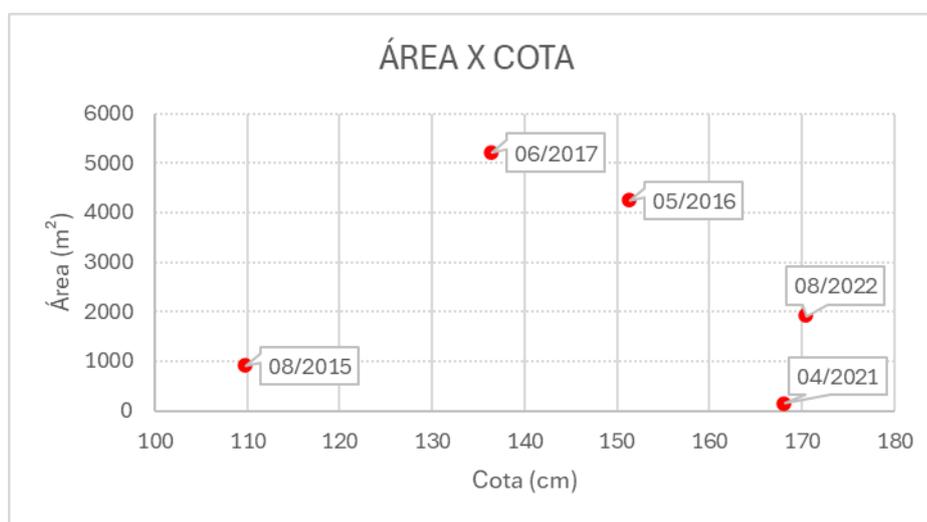
Em 24/04/2021, o rio apresentava vazão de 70,53m³/s e cota de 168,10cm. Devido à maior cota do rio, somente 152,16 m² da área da barra central (Figura 35d, em preto) estava exposta. Considerando que a área foi local de deposição para o experimento realizado em época de cheia (derivador 1), o período de chuvas de 2021,

registrado nessa imagem, pode ter atuado de forma a aumentar o tamanho da barra, ainda que em menor escala em comparação a cheia de 2022.

Em 15/08/2022 (Fig. 35e), após as cheias de 2021 e 2022, o rio apresentava vazão de 72,01 m³/s e cota de 170,46 cm, em prática igual a verificada em 04/2021. Portanto, o aumento de 10 vezes na área deste banco de areia (Tabela 9 e Fig. 35e) é inteiramente relacionado a hidrosedimentação. Isto evidencia que a cheia de 2022 causou transportes e remobilização de sedimento em escala não vista, mesmo se comparado ao desastre. Havia 1723,37 m² da área descoberta no banco de areia BC (Figura 35e, em azul) e 195,98 m² de banco submerso localizado na mesma área analisada em 04/2021.

Lançando-se a hipótese de que, caso a área do banco de areia não houvesse mudado com tempo, seria de se esperar uma relação inversa com a cota. A fim de averiguar essa hipótese, foi construída a relação entre a cota e área da barra central nos períodos das imagens fornecidas (Fig. 36).

Figura 36 – Área x Cota da Barra Central de 2015, 2016, 2017, 2021 a 2022.



Fonte: Autora (2024).

Fica evidente o grande aumento de área de sedimentação após o desastre, em 2016 e 2017 (Fig. 36). Mas o ponto principal a ser observado deste resultado é que a relação entre cota e área não foi verificada e, portanto, a variação temporal deste

banco de dados, analisado aqui, é devido a efeitos hidrodinâmicos relacionados a sedimentação e erosão.

É possível verificar também que após uma elevação de aproximadamente 31 cm da cota entre as imagens de 2017 e 2021, houve uma diminuição da área exposta em relação a cota. Já em 2022, a cota estava bem próxima da cota de 2021, mas esse padrão de comportamento foi quebrado. Isso mostra que a hidrodinâmica entre 2017 e 2021 atuou de forma a reduzir a barra central. Estes pontos serão melhor analisados a seguir.

A área de BC apresentou crescimento depois do acidente, no ano de 2016 (Fig. 37), mesmo com uma cota 41,57 cm maior. Isso indica que o local foi área de sedimentação de resíduos do desastre de Mariana, conforme previsto pelo derivador 1, lançado no rio do Carmo durante a época de alta vazão. Em 06/2017 houve também aumento da área de BC (Figura 37, em azul claro) em relação ao ano anterior, porém isso pode ter relação com a cota 15 cm menor.

Segundo Ashworth (1996), o processo de crescimento da barra é acompanhado por um aumento progressivo na largura do canal e uma diminuição na profundidade média da água, o que contribui para a separação do fluxo e mudança na velocidade máxima para fora do centro do canal e de forma a aumentar a aceleração da erosão da margem.

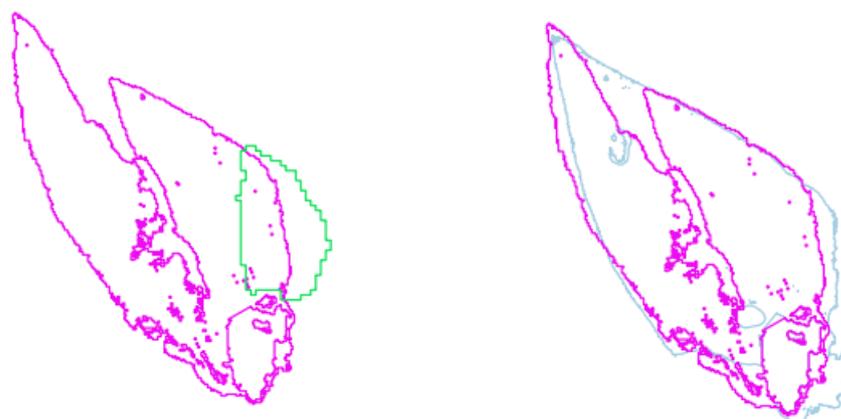
O formato do banco de sedimentos sofre alterações depois do acidente (Fig. 37), assumindo um formato oval com a ponta a jusante mais estreita. Este formato de barra central também foi observado por Li et. al. (2014), que observou uma zona cisalhante que impede a deposição de sedimentos no setor a montante da barra. Esta zona também foi encontrada na simulação de Marciano et. al., (2024) e pelos derivadores 5 e 8.

A partir da evolução temporal destas feições (Fig.37) é possível observar o deslocamento para a margem esquerda da zona de sedimentação e o formato ovalado resultante da zona de cisalhamento entre as imagens de 08/2015 (Fig.37, em verde) e 05/2016 (Fig. 37, em rosa).

Considerando a mudança de tamanho entre 2015 e 2016 e o fato do derivador 1, vindo do rio do Carmo, ser o único a ter estacionado nesta área, é provável que a barra central tenha sido um grande receptor dos rejeitos vindos da barragem de Mariana. Análises do solo da barra central seriam necessários para confirmar essa possibilidade.

Em 2021, foi registrada a menor área da barra central (Fig. 38, em preto) com 152,16 m² o que poderia ter relação com a cota de 168,10 cm, a segunda maior cota em análise. Porém, em 2022 (Fig. 38, em azul), para mesma cota, o banco apresenta área mais que 10 vezes maior, indicando que esta variação se deve a modulação promovida pela grande variação hidrodinâmica e de transporte de sedimentos promovida pelo pulso de 2022.

Figura 37 – Evolução da barra central – 08/2015 (verde), 05/2016 (rosa) e 06/2017 (azul claro).



Fonte: Autora (2024).

De 2021 para 2022, houve novamente um aumento na área da barra central. Considerando a diferença de 2,36 cm entre a cota analisada em 2021 e 2022, respectivamente 168,10 e 170,46 cm, pode-se confirmar que a cheia ocorrida em 2021/2022 remobilizou os sedimentos depositados no rio do Carmo depois do acidente, e trouxe novos sedimentos vindos de sua bacia, assim como carregou os

sedimentos vindos do rio Piranga e sua bacia, e provocou nova sedimentação na barra central. Isso é confirmado por Marciano et. al., (2024) e também pela análise do comportamento espectral do rio que comprovou maior resposta na região do vermelho proveniente de maior quantidade de sedimentos para 04/2022.

Best et. al. (2003) em seus experimentos realizados na barra central do rio Jamuna em Bangladesh, observaram a redução do comprimento e o aumento da largura entre julho 1995 e março de 1996, depois do período chuvoso (junho a setembro), diferente do caso em estudo, onde aconteceu o reaparecimento da barra central maior tanto em comprimento quanto em largura. Isso acontece porque de acordo o experimento de Ashworth (1996), períodos de maior vazão constante, produzem quantidade maior de agregação transversal na barra, como a cheia de 2022 que teve tempo de recorrência 25 anos e foi 53% maior do que o próprio desastre (Marciano et. a., 2023), e que foi capaz de levar sedimento ainda presente na margem, para o rio.

Figura 38 – Barra central – 04/2021 (preto) e 08/2022 (azul).



Fonte: Autora (2024).

Ao analisar a variação de área do banco de sedimentos ao longo dos anos entre 08/2015 (antes do acidente) e 08/2022 (7 anos após o acidente), mostrado na Figura 39, é perceptível que houve um deslocamento da barra central para a esquerda, provocado pelo remodelamento da confluência após o desastre, e que este se manteve até 2022.

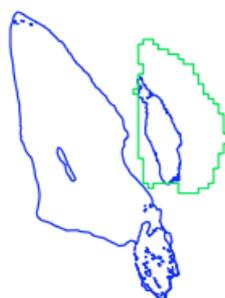
Em relação a área, em 08/2015 (Fig. 39, em verde), com rio na cota igual a 109,76 cm, a área descoberta pela água era de 908,66 m². No mesmo mês em 2022 (Fig. 39, em azul), com cota do rio de 170,46 cm, a área exposta foi de 1723,37 m², ou seja, a barra cresceu 89,66%.

Levando em conta a diferença de cota de 60,70 cm entre o rio nas duas datas, é indiscutível que a hidrodinâmica da confluência continua a provocar sedimentação no local. Os resultados mostrados aqui, a partir de observações in loco, análise dos derivadores e imagens de alta resolução, não deixa dúvida que esta é uma zona de deposição e que foi fortemente modulada pela cheia de 2022. Isto é corroborado por resultados semelhante que foram encontrados em outros rios após vazões elevadas (Ashworth, 1996, Long et. al., 2021 e Samir et. al., 2022).

Derivadores lançados a partir do Rio do Carmo, o rio que transportou a lama do desastre para o Rio Doce, convergiram para essa área, indicando que, durante evento de cheia, essa área tem sido um local de depósito de sedimentos residuais de minérios que sofreram revolvimento.

Assim como observado por Ashworth (1996) a resposta morfológica de uma unidade de confluência-difluência à criação e evolução da barra é não uniforme e é altamente variável. Best et. al. (2003) também encontrou variação em comprimento e largura no processo de desenvolvimento da barra, em um caso de maior assimetria.

Figura 39 – Barra central – 08/2015 (verde) e 08/2022 (azul).



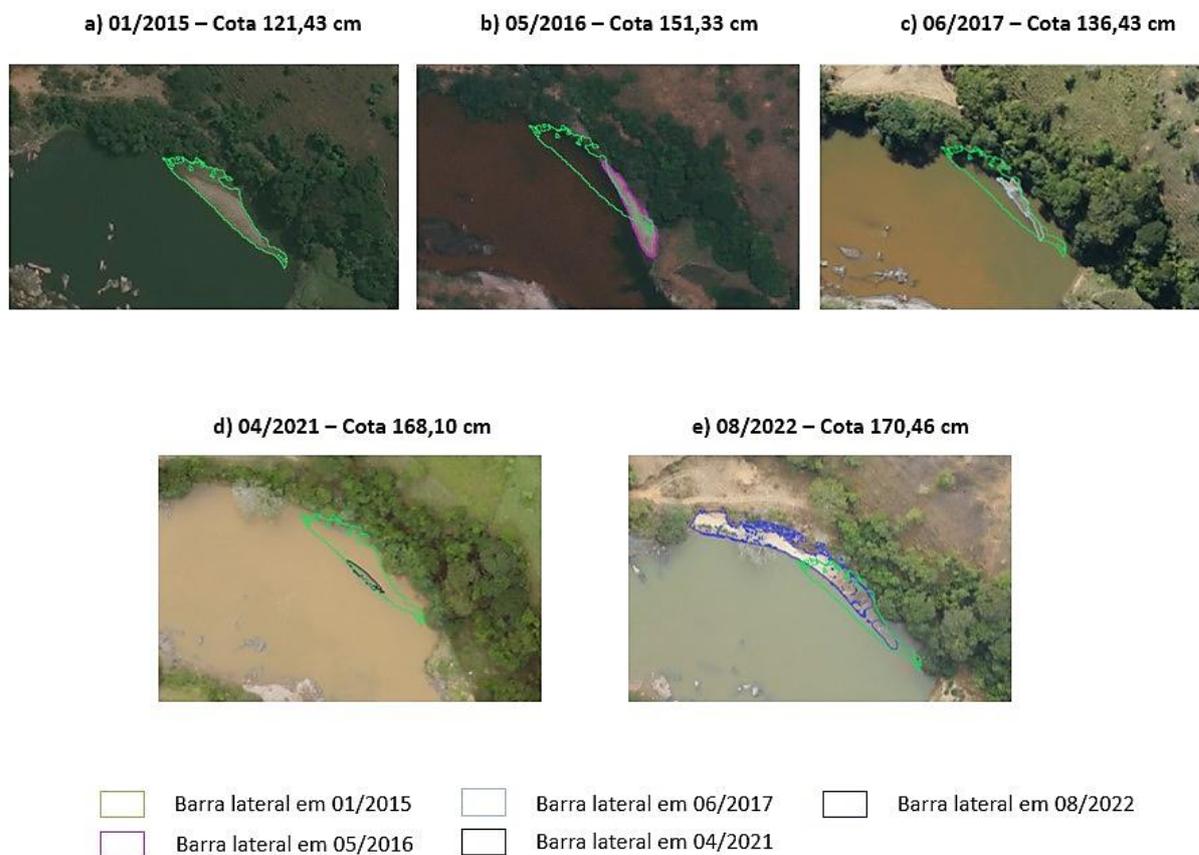
Fonte: Autora (2024).

O deslocamento da barra central para margem esquerda, caso prossiga, pode promover a união do banco de areia com a margem do rio, como observado por Long et. al. (2021) em seu estudo sobre meandros no rio Yangtze, China. A Figura 34b corrobora esta hipótese.

4.5.2. Análise qualitativa da evolução temporal – Barra lateral direita (BL)

Outro depósito escolhido para ser avaliado nesse estudo sobre a confluência do rio Doce foi a barra lateral direita (BL). Os resultados da vetorização sobre os índices NDWI e BSI foram sobrepostos às imagens RGB. Os bancos de sedimentação da barra lateral e sua evolução entre 2015 e 2022 são expostos nas Figura 40.

Figura 40 – Evolução da Barra Lateral entre 2015 e 2022.



Fonte: Autora (2024).

Considerando que os bancos de sedimento estão localizados na margem direita do rio, e que sofrem com a flutuação da cota derivada das mudanças de vazão, a obtenção dos dados de cota é necessária para análise dos resultados. Os dados de cota, relativos as imagens usadas para obtenção dos polígonos da barra lateral direita são exibidos na Tabela 10.

Em 01/2015, antes do desastre de Mariana, a barra lateral direita (Figura 40a e em todas as outras, em verde) possuía área exposta de 582,03 m², quando o rio apresentava vazão de 44,03 m³/s e cota de 121,43 cm, e o banco de sedimentos não se apresentava totalmente anexo à margem.

Tabela 10 – Cota calculada para SRD e área dos bancos de sedimentos da barra lateral.

Código	Dia da imagem	Vazão SRD (m ³ /s)	Cota SRD (cm)	Área (m ²)
T01/2015	21/01/2015	44,03	121,43	582,03
T05/2016	04/05/2016	60,40	151,33	245,19
T06/2017	18/06/2017	51,97	136,43	102,74
T04/2021	24/04/2021	70,53	168,10	41,35
T08/2022	15/08/2022	72,01	170,46	836,88

Fonte: Autora (2024).

Em 05/2016, após o desastre de Mariana, a barra lateral (Figura 40b, em rosa) possuía área exposta de 245,19 m², quando o rio apresentava vazão de 60,40 m³/s e cota de 151,33 cm. O banco de sedimentos sofreu alterações depois do acidente, ocupando apenas a parte mais ao sul da margem. Isto está de acordo com a expectativa de que o cisalhamento lateral do escoamento proveria erosões nesta seção do rio, como observado por Samir et. al. (2022) e Marciano et. al. (2023).

Em 06/2017, BL (Figura 40c, em azul claro) possuía área exposta de 102,74 m², quando o rio apresentava vazão de 51,97 m³/s e cota de 136,43 cm. O formato do banco volta a ficar parecido com antes do desastre.

Em 24/04/2021, o rio apresentava vazão de 70,53m³/s e cota de 168,10cm. Devido à maior cota do rio, somente 41,35 m² da área da barra lateral (Figura 40d, em preto) estava exposta. Em 15/08/2022, o rio apresentava vazão de 72,01 m³/s e cota

de 170,46 cm. Havia 836,88 m² da área descoberta no banco de areia (Figura 40e, em azul).

A exemplo da análise realizada para o banco no meio do rio, para o banco lateral também não foi observada relação entre área e cota (Fig.41). Assim, também para este caso, a dinâmica de sedimentos associado a hidrodinâmica também modula a dinâmica deste banco de areia.

O Figura 41 mostra um decaimento contínuo da área da barra entre 2015 e 2021, o que poderia indicar que não houve sedimentação importante no período, contudo tem que se levar em consideração que as cotas do rio nas imagens depois 2015 também foram maiores.

De 05/2016 para 06/2017 (Fig. 41), BL apresenta novamente uma área inferior ao ano anterior, ainda que a cota esteja 14,9 cm mais baixa. O mesmo acontece na comparação entre 06/2017 e 04/2021, contudo neste caso há elevação da cota em 31,67 cm. Por fim, entre 04/2021 e 08/2022, com a cota praticamente igual, há um crescimento da área do banco de sedimentos, chegando a 836,88 m² o maior valor encontrado e 20,2 vezes maior do que em 04/2021.

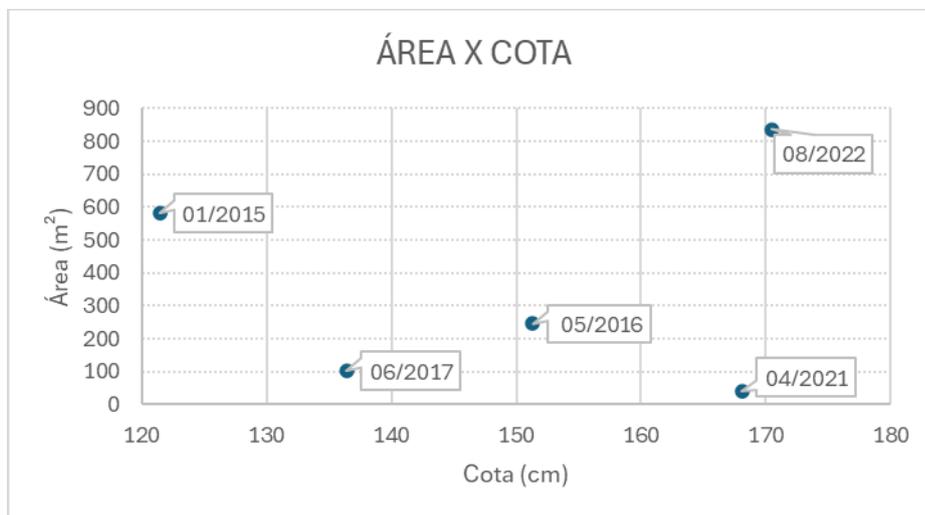
É notável o crescimento da área exposta entre 2021 e 2022 (Fig. 41), assim como a existência de um banco de sedimentos maior em 2022 do que o existente pré-desastre, ainda que a cota em 2022 fosse cerca de 49 cm maior do que em 01/2015. Os fatos destacados são mais bem abordados a seguir.

A área da barra lateral reduzida em 05/2016 em relação a 01/2015, pode ser explicado pela cota 21 cm maior, contudo, considerando a quantidade de sedimento gerado pelo desastre tal resultado não condiz com o esperado para um local de sedimentação.

Algo que pode ter reduzido a deposição de sedimentos no local foi o “efeito de barreira” e a diluição dos sólidos suspensos produzida pelo rio Piranga ao entrar na confluência simétrica, tendo atuação semelhante ao do rio Manhuaçu no encontro com o rio Doce (Assireu, 2021), após esse mesmo desastre. Este tipo de comportamento acontece normalmente em junção de rios com diferentes cargas de sedimentos como

o caso do rio Solimões e Negro (Franzinelli, 2011) ou Danúbio e Drava, na Croácia (Đorđević et. al., 2023). Esse efeito pode ser observado pela Figura 42.

Figura 41 – Área x Cota da barra lateral de 2015, 2016, 2017, 2021 a 2022.



Fonte: Autora (2024).

Figura 42 – Atuação do rio Piranga na confluência do rio Doce após o desastre de Mariana.



Fonte: Adaptada do Google Earth (2024).

Outra hipótese que poderia explicar o resultado, seria de complementariedade da sedimentação pós acidente, que pode ser vista através da Figura 43, de modo que o sedimento vindo da lama de Mariana, preencheu a área anteriormente não ocupada, podendo haver primeiramente uma separação entre os sedimentos pré (Fig. 43, em verde) e pós acidente (Fig. 43, em rosa) nesse banco. Uma análise de sedimentos seria necessária para averiguar essas hipóteses.

Figura 43 – Barra lateral – 01/2015 (verde) e 05/2016 (rosa).

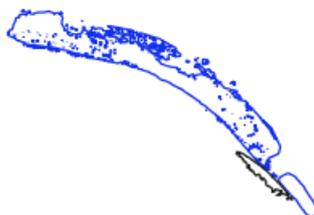


Fonte: Autora (2024).

Resende, Carvalho e Guerra (2015) consideram que há uma relação direta entre o maior acúmulo e aumento da área ocupada por bancos de sedimentos com maiores índices pluviométricos. Este tipo de barra se desenvolve durante eventos de inundação e contém grãos de tamanho grosso na superfície (Rhoads, 2006).

Segundo os dados de vazões obtidos, o período chuvoso de 2021/2022 teve alta vazão para todos os três rios estudados, o que corrobora esta ideia. A diferença entre os bancos laterais de 04/2021 e 08/2022 (Figura 44, respectivamente, em preto e azul), e foi observada também após períodos de cheia por Resende, Carvalho e Guerra (2015) e Silva et al., (2013), em diferentes rios.

Figura 44 – Barra lateral – 04/2021 (preto) e 08/2022 (azul).



Fonte: Autora (2024).

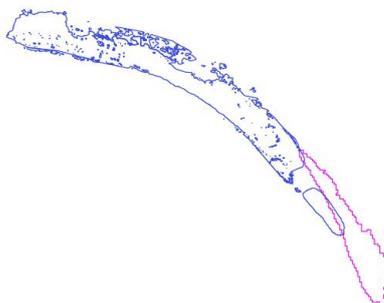
Ainda assim, após a cheia de 2021/2022, houve crescimento da barra lateral, o que demonstra que os sedimentos remobilizados do leito do rio do Carmo, originários

da lama de Mariana, podem ter sido depositados nessa área, considerando os resultados mostrados pelos derivadores 2 e 6.

No entanto, há maior chance de deposição de sedimentos erodidos e carregados vindos da bacia do rio Piranga, devido a maior vazão e quantidade de sedimentos deste rio nesta ocasião, como visto na análise espectral deste estudo e relatado também por Marciano et. al. (2024).

Em comparação da BL depois do desastre de Mariana e após a cheia de 2022 (Figura 45, em rosa e azul, respectivamente) é notável que este último evento teve maior influência no crescimento do banco de sedimentos, já que a cheia de 2022 gerou vazão 53% maior do que a observada para o desastre (Marciano et. al., 2024).

Figura 45 – Barra lateral – 05/2016 (rosa) e 08/2022 (azul).

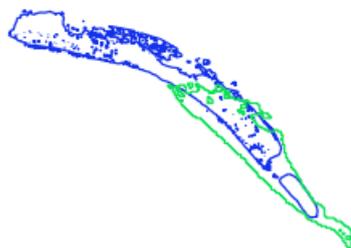


Fonte: Autora (2024).

Em comparação a BL inicial de 2015 (Fig. 46, em verde), em 2022 (Fig. 46, em azul) houve um crescimento da área ocupada, além de um deslocamento para mais a jusante na confluência.

A dinâmica de crescimento e redução apresentada por barras marginais como é o caso da barra lateral foi observada em outros estudos como de Resende, Carvalho e Guerra (2015), Ribeiro et. al., (2023), Rademann et. al., (2023), que as relacionam a mudanças no uso do solo e precipitação, e em Silva et al., (2013), que as associam a variações de volume do fluxo (chuva e estiagem).

Figura 46 – Barra lateral – 01/2015 (verde) e 08/2022 (azul).



Fonte: Autora (2024).

Considerando a evolução da barra lateral e a atuação de cada rio durante os anos, é possível que a parte a montante da barra tenha maior presença de sedimentos vinda da lama de Mariana e contenha resíduos de minérios. Já a parte a jusante que teve maior desenvolvimento durante a cheia de 2022, pode apresentar maior quantidade de sedimentos derivados de erosão da bacia do rio Piranga, por este apresentar mais sedimentos durante o período. Análises de sedimentos considerando diferentes pontos da barra seriam necessários para confirmar essa hipótese.

4.5.3. Análise quantitativa da evolução temporal relativa entre as barras central e lateral

As formações dos bancos de sedimentos BC e BL podem ser analisados de maneira quantitativa quando se é considerado que as imagens estão na mesma cota. Como as imagens de 2015 foram obtidas em dias diferentes e possuem cotas distintas, elas foram dispensadas na análise. Levando isso em consideração, pode-se mensurar a evolução relativa dos bancos em duas situações:

- 1) A evolução comparativa da área de BC e BL entre 2016 e 2022, cenário pós desastre.
- 2) A evolução de BC e BL entre 04/2021 e 08/2022, em que as cotas foram, em prática, iguais.

Para isso será considerada a diferença absoluta entre as áreas, Δ área (m²), conforme Equação. 6.

$$\Delta\text{área} = \text{área (ti +1)} - \text{área (ti)} \quad (5)$$

Onde ti relativo é o período mais antigo.

Para a análise da evolução da sedimentação nos locais estudados, no cenário pós desastre, foi elaborada a Tabela 11. Os valores sombreados de vermelho indicam diminuição do tamanho da barra e os sombreados de verde indicam seu aumento.

Tabela 11 – Análise da evolução da sedimentação dos bancos de sedimentos.

Ano	Área de BC (m ²)	Δ área (m ²)	Variação de tamanho	Área de BL (m ²)	Δ área (m ²)	Variação de tamanho
2016	4244,49			245,16		
2017	5212,54	968,05	1,22x maior	102,74	-142,42	2,47x menor
2021	152,16	-5060,38	34,25x menor	41,35	-61,39	2,48x menor
2022	1723,37	1571,21	11,32x maior	836,88	795,53	20,24x maior

Fonte: Autora (2024).

Entre 2016 (cota: 151,33 cm) e 2017 (cota: 136,43 cm), a cota entre as imagens diminuiu 14,9 cm, por isso era esperado um aumento de área exposta dos bancos de sedimentos. Nesse período, a área descoberta de BC cresceu 1,22 vezes, enquanto BL diminuiu 2,47 vezes sua área de exposição.

Isso indica que a hidrodinâmica da confluência foi favorável a sedimentação da barra central, enquanto a zona de erosão próxima a margem direita encontrada por Marciano et. al (2024), promoveu erosão na barra lateral, entre os dois períodos das imagens.

Entre as imagens de 2017 (cota: 136,43 cm) e 2021 (cota: 168,10 cm), a cota estava maior por 31,67 cm. Houve redução de 34,25 vezes da área exposta da BC, já a área exposta da BL foi reduzida em 2,48 vezes. Ambas tiveram reduções de medida que podem ter ocorrido devido a elevação de cota, porém como a barra central teve maior redução, isso pode indicar que a camada cisalhante circundante a BC (Mosley, 1976 e Li et. al., 2014) pode ter atuado de modo erosivo, como previsto por Marciano et. al (2024).

Entre 2021 e 2022, a diferença de cota é desprezível, logo, seria esperado a mesma área exposta para bancos de sedimentos estabilizados. A barra central teve um crescimento de área exposta de 1571,21 m² de 2021 para 2022, o que representa um crescimento de 11,32 vezes. Já a barra lateral teve um aumento de 795,53 m² no mesmo período, sendo 20,24 vezes maior. Infere-se então que, entre esse período a hidrodinâmica atuou de maneira a promover a sedimentação nas duas zonas, com mais proeminência na barra lateral.

Os derivadores 2, 3 e 4 lançados em época de cheia foram encaminhados para essa área, enquanto 1 foi encaminhado para a barra central, o que indica preferência do escoamento em direção a BL, o que explicaria o fato de BL ter se desenvolvido mais na cheia de 2022. Soma-se a isso, o fato da barra lateral direita ter sofrido mais cisalhamento (Marciano et. al., 2024) e diminuído de tamanho em anos anteriores.

4.5.4. Considerações sobre a evolução dos bancos de sedimentos

Considerando a evolução dos bancos de sedimentos entende-se que:

1 – A formação da barra central foi favorecida pelo desastre de Mariana, sendo um local de sedimentação dos resíduos de mineração, corroborado pelos derivadores e pela evolução da barra na imagem de 2016.

2 - A zona de cisalhamento que envolve a barra central molda a barra de forma oval e atua de maneira erosiva, principalmente em momentos de fluxos moderados, como indicado por Marciano et. al. (2024). Isso foi também corroborado pelos derivadores.

3 – Na barra lateral direita, os sedimentos vindos da lama de Mariana foram depositados adjacientemente a formação pré-existente e/ou podem ter sofrido com um efeito barreira promovido pelo rio Piranga, devido a diferença de carga de sólidos suspensos, como acontece, por exemplo no encontro do rio Negro e Solimões (Franzinelli, 2011).

4 – Vórtices (Mosley, 1976; Best, 1987; Baeta, 2018 e Bradbrook, Lane e Richards, 2000) e o cisalhamento lateral (Marciano et. al, 2024) atrapalharam a sedimentação na barra lateral direita, principalmente entre 2016 e 2021.

5 – Sedimentos vindos da cheia de 2021/2022 reestruturaram as duas zonas de sedimentação estudadas, principalmente BL, e podem ter origem em maior escala da erosão da bacia do rio Piranga e em menor escala, dos sedimentos vindos da bacia do rio do Carmo e do revolvimento do leito com resíduos de minérios, de acordo com as análises espectrais e ao observado por Marciano et.al. (2024).

6 - A morfologia da barra central não sofreu grandes variação ao longo dos anos após o Desastre de Mariana, portanto, o acidente foi essencial para sua forma atual.

7 – Houve sedimentação em variados pontos da barra lateral direita ao longo dos anos, o que gerou instabilidade morfológica e pode estar relacionado com mudanças no uso do solo e variações de vazão (Silva et al., 2013; Resende, Carvalho e Guerra, 2015; Ribeiro et. al., 2023 e Rademann et. al., 2023).

5. CONCLUSÕES

O uso de imagens de ARP e análise da assinatura espectral pode ser uma maneira de verificação das quantidades de sedimentos da água e entendimento da influência de cada afluente na confluência. Podendo ser utilizados em caso de falta de dados de estações de monitoramento.

No presente estudo as assinaturas espectrais de antes e depois do acidente indicaram um aumento de sedimentos no rio do Carmo pós desastre. Essa maior quantidade se manteve nas assinaturas de 06/2017, ainda que fosse menor sua vazão e a correspondente erosão da bacia. O que demonstra que em 2017, a maior turbidez pode ter sido influenciada pelo revolvimento do leito e seus resíduos de minérios vindos da lama de Mariana.

Já durante a cheia de 04/2022, o rio Piranga apresentou maior turbidez e a maior vazão entre as imagens estudadas, portanto, transportava maior quantidade de sólidos suspensos, o que pode ser respaldado pela associação entre a alta pluviosidade, a forte suscetibilidade à erosão, o mau uso do solo e o desmatamento encontrados na bacia deste rio.

A análise de assinatura espectral pode identificar também diferenças de turbidez em vazões próximas como as de 04/2021 e 08/2022. Diferenças nas quantidades de sedimentos foram encontradas para o rio Piranga, mas no rio do Carmo as assinaturas foram parecidas. Logo, há a hipótese de que o rio do Carmo pode estar se recuperando gradualmente do impacto sofrido com o rompimento da barragem do Fundão e que as diversas medidas de recuperação da mata ciliar e da bacia como um todo apresentaram efeitos positivos, podendo ser replicadas no futuro. Estudos mais aprofundados devem ser feitos para corroborar essa hipótese.

A turbidez e as concentrações de sedimentos do rio Doce estiveram mais influenciadas pelo rio com maior aporte de sedimentos. Portanto, há diferenças na origem dos sedimentos depositados nos bancos entre 2015 e 2022, com o rio Piranga tendo grande relevância nos sedimentos depositados após a cheia ocorrida em 2022.

O uso de derivadores para entendimento da hidrodinâmica de cursos d'água também apresentou resultados positivos. Com o uso destes dispositivos foi possível

identificar as zonas hidrodinâmicas que apresentam influência na superfície da água, o que inclui zonas de cisalhamento e de sedimentação. Os derivadores foram capazes de identificar a localização da barra central prevista na literatura, além de mostrar que sua formação acontece majoritariamente, em períodos de cheia, com influência principal dos sedimentos vindo do rio do Carmo. O fato de que essa barra foi observada pelos derivadores, mas não foi encontrada em simulação de Marciano et. al., (2024) indica que esses dispositivos podem ser usados em complemento com simulações de maneira a aperfeiçoá-las.

Os derivadores indicaram também a formação de zona de velocidade zero próximas a barra lateral direita, com sedimentos de ambos os rios podendo ser direcionados para esta zona, principalmente no período de cheia, com a vazão maior vinda do rio Piranga.

Na seca, os derivadores mostraram a presença de um vórtice próximo ao enrocamento e da barra lateral direita, assim como a existência de deposição de sedimentos do rio do Carmo nesta barra. Esta deposição acontece provavelmente pela presença de uma única célula rotativa girando em sentido horário, que direciona os sedimentos para a margem.

Por meio das imagens de satélite e ARP foi possível observar que a formação da barra central foi favorecida pelo desastre de Mariana, sendo, portanto, um local que deve ser monitorado para análise de sedimentação e limpeza do rio.

Considerando a hidrodinâmica observada pelos derivadores e a literatura conhecida, infere-se que a morfologia da barra central é causada pela zona de cisalhamento e alta velocidade que envolve esta barra e atua de maneira erosiva em momentos de seca, marcando sua forma oval.

Na barra lateral direita, os sedimentos vindos da lama de Mariana foram depositados adjacientemente a formação pré-existente, porém ao longo dos anos analisados não houve uma tendência de local de deposição, com a barra variando sua morfologia durante o período. Os vórtices e zonas de cisalhamento encontrados pelos derivadores demonstraram ter maior atuação do que o esperado, e diminuíram a sedimentação na barra entre 2016 e 2021.

Os sedimentos vindos da cheia de 2021/2022, majoritariamente do rio Piranga, reestruturaram as duas zonas de sedimentação estudadas. É provável que a remobilização e a hidrodinâmica da confluência tenham transportado e depositado sedimentos residuais do rompimento da barragem na barra central e na barra lateral, porém esta última sofreu maior deposição dos sedimentos vindos da bacia do Piranga.

Através da combinação e utilização de ferramentas multidisciplinares envolvendo áreas de hidrodinâmica, hidrologia, transporte de sedimentos, geoprocessamento, análise espectral, entre outras, foi possível chegar aos resultados apresentados nesse trabalho, trazendo informações sobre os impactos gerados pelo Desastre de Mariana, podendo nortear novas pesquisas, bem como, a criação, desenvolvimento e manutenção de políticas públicas voltadas para situações semelhantes.

Em trabalhos futuros recomenda-se investigar o uso e ocupação do solo nas bacias do rio do Carmo e rio Piranga a fim de avaliar a contribuição destas para o aporte de sedimentos na confluência do rio Doce. Recomenda-se também estudos sobre os sedimentos na barra central e na barra lateral para complementar esse estudo de hidrodinâmica da confluência e auxiliar no maior entendimento de seu processo de sedimentação, recuperação e futuros processos de retiradas de resíduos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, Kazi Rifat; AKTER, Simu. Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with Landsat multi-spectral surface reflectance satellite data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 8, p. 168-181, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.010>.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce. Rompimento da barragem em Mariana/MG**. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos - SPR. Brasília, DF, 2016, 50 p., 2016.

ANDREADIS, Ioannis; TSALIDES, Ph. Analog computation of image chromaticity. **Real-Time Imaging**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1006/rtim.1996.0041>.

ARAÚJO, Gustavo Simões de. Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo e na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, pós-rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, leste do Quadrilátero Ferrífero, MG. 2018. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1224>. Acesso: 10 de fevereiro de 2023.

ARTERO, ALMIR OLIVETTE; TOMMASELLI, ANTONIO MARIA GARCIA. Limiarização Automática de Imagens Digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 6, n. 1, p. 38-48, 2000.

ASSIREU, Arcilan T. et al. Near-inertial motions in the Brazil Current at 24 S-36 S: Observations by satellite tracked drifters. **Continental Shelf Research**, v. 145, p. 1-12, 2017. Disponível em: Near-inertial motions in the Brazil Current at 24°S-36°S: Observations by satellite tracked drifters - ScienceDirect. Acesso: 10 de fevereiro de 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.07.005>.

ASSIREU, Arcilan Trevenzoli. **Derivadores Rastreados por Satélite e Monitoramento Automático de Parâmetros Ambientais Aplicados ao Entendimento da Contribuição dos Afluentes para o Restabelecimento do Rio Doce**. Edital FAPEMIG/RENOVA, 1-55. 2021.

ASHMORE, P.; GARDNER, J. T. Unconfined confluences in braided rivers. **River confluences, tributaries and the fluvial network**, p. 119-147, 2008.

ASHMORE, P. E. et al. Secondary flow in coarse-grained braided river confluences. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 17, p. 299-312, 1992.

ASHMORE, Peter. Anabranche confluence kinetics and sedimentation processes in gravel-braided streams. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 75, n. 1, p. 129-146, 1993. Disponível em: Anabranche confluence kinetics and sedimentation processes in gravel-braided streams | Geological Society, London,

Special Publications. Acesso em: 10 mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.075.01.08>.

ASHWORTH, Philip J. Mid-channel bar growth and its relationship to local flow strength and direction. **Earth surface processes and landforms**, v. 21, n. 2, p. 103-123, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199602\)21:2<103::AID-ESP569>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199602)21:2<103::AID-ESP569>3.0.CO;2-O).

AUGUSTINHO, Lucas Ferreira; DE FREITAS, Rodrigo Randow. Atividade pesqueira na bacia do Rio Doce e o rompimento da barragem de Fundão: um olhar sobre os impactos negativos observados. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, p. e024034-e024034, 2024. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/1706>. Acesso em: 27 set. 2024.

BAETA, Gonçalo Lança Rodrigues. **Estudo numérico de escoamento turbulento numa confluência fluvial utilizando o modelo LES**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Nova de Lisboa.

BARBOSA, Claudio Clemente Faria; DE MORAES NOVO, Evlyn Marcia Leão; MARTINS, Vitor Souza (Ed.). **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.

BENITO, G., BENITO-CALVO, A., GALLART, F., MARTIN-VIDE, J.P., REGUES, D., BLADE, E. 2001. Hydrological and geomorphological criteria to evaluate the dispersion risk of waste sludge generated by the Aznalcollar mine spill (SW Spain). **Environ. Geol.** 40, 417–428. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002540000230>.

BEST, J. L. 1987. Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. **Recent Developments in Fluvial Sedimentology**, SP39.

BEST J. L. 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. **Sedimentology** 35: 481–498.

BEST, James L. et al. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh. **Journal of Sedimentary Research**, v. 73, n. 4, p. 516-530, 2003.

BEST, James L.; RHOADS, Bruce L. Sediment transport, bed morphology and the sedimentology of river channel confluences. **River confluences, tributaries and the fluvial network**, p. 45-72, 2008.

BILAL, A.; XIE, Q.; ZHAI, Y. Flow, Sediment, and Morpho-Dynamics of River Confluence in Tidal and Non-Tidal Environments. **J. Mar. Sci. Eng.** 2020, 8, 591. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse8080591>.

BIRD, Graham et al. Heavy metal contamination in the Arieş river catchment, western Romania: Implications for development of the Roşia Montană gold deposit. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 86, n. 1, p. 26-48, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.02.002>.

BIRJUKOVA, Olga et al. Three dimensional flow field at confluent fixed-bed open channels. In: **Proc. of 7th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics–River Flow 2014**. 2014. p. 1007-1014.

BIRON, P.; ROY, A. G.; BEST, J. L. Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences. **Experiments in Fluids**, v. 21, n. 6, p. 437-446, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00189046>.

BIRON, Pascale M.; RAMAMURTHY, Amruthur S.; HAN, Sangsoo. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 130, n. 3, p. 243-253, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:3\(243\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(243)).

BOUCHEZ, Julien et al. Turbulent mixing in the Amazon River: The isotopic memory of confluences. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 290, n. 1-2, p. 37-43, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.054>. Acesso em: 02 out. 2023.

BOTELHO, Soraya Alvarenga; DE MELO, Lucas Amaral. Restauração sobre o rejeito após o rompimento da barragem em Mariana (MG). **Restauração Ecológica: Desafio do processo frente à crise ambiental Coordenação geral: Luiz Mauro Barbosa**, p. 113.

BRADBROOK, K. F.; LANE, S. N.; RICHARDS, K. S. Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. **Water resources research**, v. 36, n. 9, p. 2731-2746, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000WR900011>. Acesso em: 05 out. 2023.

BREUNIG, Fábio Marcelo et al. Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva-Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 2, n. 2, p. 88-102, 2007.

BRITO, Flávia Las-Cazas de. **GEODESIGN PARA CRIAÇÃO OU AMPLIAÇÃO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE PROTEÇÃO INTEGRAL: sub-bacia do Rio Piranga, Minas Gerais**. Orientador: Ana Clara Mourão Moura. 2023. 142 p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geografia) - Instituto de Geociências - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, MG, 2023.

CHELOTTI, GIANCARLO BRUGNARA. **ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO RESERVATÓRIO DO DESCOBERTO (DF), POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Orientador: Jean Michel Martinez. 2018. 98 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em

Geociências Aplicadas) - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

CHEN, Wanhui et al. Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multitemporal TM images. In: **IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, 2004. p. 3379-3382. DOI: [10.1109/IGARSS.2004.1370429](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370429). Acesso em: 2 jun. 2022.

COELHO, André Luiz Nascentes. Bacia hidrográfica do rio doce (MG/ES): uma análise socioambiental integrada. **GEOGRAFARES**, Espírito Santo, v. 7, p. 131-146, 2009.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F.. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre, 2013.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE – CBH-DOCE. **A bacia do rio Doce**. 2016. Disponível em <http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>. Acesso em: 2 jun. 2024.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANGA, CBH-PIRANGA. 2024. Disponível em: <https://www.cbhpiranga.org.br/a-bacia>. Acesso em: 2 jun. 2024.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE – CBH-DOCE. **Deliberação ao Normativa CBH-Doce N° 51/2016**. 2016. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/12/Delibera%C3%A7%C3%A3o-051-Ad-Referendum-Aprova-Realoca%C3%A7%C3%A3o-do-PAP.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2022.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce**. P.478. 2010.

COSTA, Adivane Terezinha. **Geoquímica das águas e dos sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, leste-sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG): estudo de uma área afetada por atividades de extração mineral**. 2001.

CPRM (Brasil). 2015. **Serviço Geológico do Brasil. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce – Relatório 1**. 33p.

CRUZ SALOMÃO, Caroline de Souza; PAULA, Luiz Gustavo de Souza; ELMIRO, Marcos Antônio Timbó. Uso da análise multicritério para definição de áreas prioritárias para reflorestamento na Bacia do Rio Piranga, MG, Brasil. **Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate**, Brasília, DF, v. 11, ed. 2, p. 108-120, 2020. doi:10.18472/SustDeb.v11n2.2020.30468. Acesso: 2 jun. 2023.

DA SILVA, RACHEL SCRIVANI. **Estimativa de produção de cana-de-açúcar com base em dados remotos de baixa resolução espacial e índices climáticos**. 2016. Tese de Doutorado.

DASH, J. P.; PEARSE, G. D.; WATT, M. S. UAV. Multispectral Imagery Can Complement Satellite Data for Monitoring Forest Health. **Remote Sens**, Basileia, v. 10, n.8, p. 1216-final, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10081216>. Acesso: 2 jun. 2023.

DIEK S, FORNALLAZ F, SCHAEPMAN ME, DE JONG R. 2017. Barest Pixel Composite for Agricultural Areas Using Landsat Time Series. **Remote Sensing**, 9(12):1245. <https://doi.org/10.3390/rs9121245>. Acesso em: 13 jul. 2023.

DE ALMEIDA, Isabel Kaufmann et al. Estimativas de vazões e traçado de curvas-chave. 2013.

DOS SANTOS, M. Q. E CARVALHO, J. A. L. 2018. Morfodinâmica na confluência dos rios Solimões Amazonas e Negro, e a organização socioespacial na costa do rebojo e terra nova no período de 1952 a 2016. Revista **Geonorte**, V.9, N.33, p.237-240, DOI: 10.21170/geonorte.2018.V.9.N.33.237.240. Acesso em: 17 jul. 2023.

DOS SANTOS, V. C., e STEVAUX, J. C. 2017. Processos fluviais e morfologia em confluências de canais: uma revisão. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, 18(1). <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i1.1042>. Acesso em: 15 jul. 2023.

DOS SANTOS, V. C.; Stevaux, J. C.; SZUPIANY, R. N.; et al. 2019. The sedimentology of river confluences. **Sedimentology**, v. 23, n. 2, p. 391-407. Elsevier B.V. DOI: <https://doi.org/10.1111/sed.12504>. Acesso em: 13 mai. 2023.

DORĐEVIĆ, Dejana et al. Estimation of changes in sediment transport along the free-flowing middle Danube river reach. **Applied Sciences**, v. 13, n. 18, p. 10513, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131810513>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ECOPLAN-LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce**. Belo Horizonte: Consórcio Ecoplan/LUME, v1., 472 p, 2010.

ELTNER, Anette; SARDEMANN, Hannes; GRUNDMANN, Jens. Flow velocity and discharge measurement in rivers using terrestrial and unmanned-aerial-vehicle imagery. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 3, p. 1429-1445, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-1429-2020>. Acesso em: 18 jan. 2023.

ESPINDOLA, Haruf Salmen; VILARINO, Maria Terezinha Bretas; SOUZA, Bianca de Jesus; MIFARREG, Iesmy Elisa Gomes. Contra a Correnteza: Conservação, Restauração e Recuperação Ambiental no Vale do Rio Doce. **Fronteira: Journal of**

Social, Technological and Environmental Science, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 156–175, 2022. DOI: 10.21664/2238-8869.2022v11i3.p156-175. Disponível em: <https://revistas.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/6525>. Acesso em: 10 set. 2024.

FERNANDES, K. N. QUALIDADE DAS ÁGUAS NOS RIOS GUALAXO DO NORTE, GUALAXO DO SUL E DO CARMO, AFLUENTES DO ALTO RIO DOCE (WATU): METAIS, METALÓIDES E ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS ANTES E APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS FUNDAÇÃO DA SAMARCO/VALE/BHP BILLITON, EM MARIANA, MG. 2017. 224 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

FERREIRA, Aline Batista; PEREIRA FILHO, Waterloo. AVALIAÇÃO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE CORPOS D'ÁGUA EM SANTA MARIA-RS POR MEIO DE ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO. **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 13, p. 01–14 pág., 2013. DOI: <https://doi.org/10.5216/rev.geoambie.v0i13.25996>. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/25996>. Acesso em: 29 jun. 2024.

FERREIRA, R. e RAFFO, J. 2012. O uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) no estudo da acessibilidade física aos serviços de saúde pela população rural: revisão da literatura. *Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde*, p. 177-189. Disponível em: www.hygeia.ig.ufu.br/ ISSN: 1980-172. Acesso em: 10 abr. 2024.

FEST. Relatório Anual do PMBA/Fest. Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente. Junho de 2024. Vitória, Espírito Santo. Disponível em https://drive.google.com/drive/folders/1B_MUDCfqfXH-K5xssSnb01NDR2tFMh5F. Acesso em: 10 abr. 2024.

FLORENZANO, Teresa G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. Disponível em: http://books.google.com.br/books/about/Inicia%C3%A7%C3%A3o_em_Sensoriamento_Remoto.html?hl=pt-BR&id=18GkH5X81XcC >. Acesso em 20 abr. 2024.

FOESCH, Meri Diana Strauss. **CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR REJEITOS DE MINERAÇÃO: O CASO DE MARIANA, MG**. Dissertação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; 76p. 2017.

FRANZINELLI, Elena. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). **Brazilian Journal of Geology**, v. 41, n. 04, p. 587-596, 2011.

FUNDAÇÃO RENOVA, 2018. PG-25-Programa de recuperação da área ambiental 1, nos municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado – MG. 2018.

GAMARO, Paulo E.; MALDONADO, Luiz H. ESTUDO CONFLUENCIA IGUAÇU E PARANÁ E SEU EFEITO NOS NIVEIS A SUA MONTANTE. **XXI Sbrh - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília, DF, p. 1-8, nov. 2015. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP020885.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2024.

GAO, B. C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sens. Environ.** V. 58, p. 257–266.

GEOPIXEL (empresa). **Relatório Semestral de Atividades**. São José dos Campos, 2022. 234 p.

GOMES, MARYJANE DINIZ DE ARAUJO; ROMAN, RODRIGO MAXIMO SANCHEZ; RUA, ALFONSO TORRES; ALVES, ELVIS DA SILVA; MCKEE, MAC. COMPARAÇÃO DO NDVI OBTIDO POR MEIO DE DRONE E SATÉLITE NAS FASES FENOLÓGICAS DA VIDEIRA. **IRRIGA**, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 605–619, 2021. DOI: 10.15809/irriga.2021v26n3p605-619. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4460>. Acesso em: 10 set. 2024.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. Processamento digital de imagem. **Pearson, ISBN-10: 8576054019**, v. 10, p. 11-27, 2010.

GUILLÉN-LUDEÑA, Sebastián et al. Evolution of the hydromorphodynamics of mountain river confluences for varying discharge ratios and junction angles. **Geomorphology**, v. 255, p. 1-15, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.006>. Acesso em: 10 set. 2024.

GRIMALT J.O., FERRER M., MACPHERSON E. The mine tailing accident in Aznalcollar. **Sci. Total Environ.**, 242, pp. 3-11. 1999.

HAFNER, E. D., BARTON, P., DAUDT, R. C., WEGNER, J. D., SCHINDLER, K., AND BÜHLER, Y.: Automated avalanche mapping from SPOT 6/7 satellite imagery with deep learning: results, evaluation, potential and limitations, *The Cryosphere*, 16, 3517–3530. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-16-3517-2022>, 2022. Acesso em: 10 set. 2024.

HANNA, D.E.L., RAUDSEPP-HEARNE, C., BENNETT, E.M. Effects of land use, cover, and protection on stream and riparian ecosystem services and biodiversity. *Conserv*, 34, 244–255. 2020.

HATJE, Vanessa et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 10706, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>. Acesso em: 20 set. 2024.

HAMIMECHE, Mohamed et al. Identification and mapping of Algerian island vegetation using high-resolution images (Pléiades and SPOT 6/7) and random forest modeling. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 9, p. 617, 2021.

HUDSON-EDWARDS, Karen A. et al. Sources, distribution and storage of heavy metals in the Rio Pilcomayo, Bolivia. **Journal of geochemical exploration**, v. 72, n. 3, p. 229-250, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00164-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00164-9). Acesso em: 29 out. 2024.

IBAMA, **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. 26 nov. 2016. Ibama: Brasília, 2016. Disponível em: www.ibama.gov.br. Acesso: 14 jun. 2022.

IBAMA. **Laudo Técnico Preliminar**. 2015. <https://am37.files.wordpress.com/2016/01/laudo-preliminardo-ibama-sobre-mariana.pdf>. Acesso: 14 de jun. 2022.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. (2010) Relatório Monitoramento da Qualidade das águas Superficiais da Bacia do Rio das Velhas 2009 Belo Horizonte, MG.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Um tributo Sino-Brasileiro aos recursos naturais de nosso planeta. São José dos Campos, abr. 1995.

IWATA, Tomoya et al. Lagrangian tracking measurements revealed the temporal dynamics of nitrogen and phosphorus spiralling in a large Japanese river. **Limnology**, v. 21, p. 379-391, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00612-4>. Acesso: 14 de jun. 2022.

JAMALABAD, M.S.; ABKAR, A.A. Forest Canopy Density Monitoring, Using Satellite Images. In Proceedings of the 20th ISPRS Congress. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, 12–23 Jul., pp. 12–23. 2004.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, tradução José Carlos Neves Epiphânio (coord.). 598 p. 2009.

KENWORTHY, S. T., AND RHOADS, B. L. Hydrologic Control of Spatial Patterns of Suspended Sediment Concentration at a Stream Confluence. **J Hydrol**, V. 168, 251-263. 1995.

KOMINECKI, A. Processos hidrogeomorfológicos em confluências fluviais: algumas considerações. (L. Redin Vestena, Ed.) XX Encontro Nacional de Geógrafos e Geógrafas. 20 jul. 2022.

KOSSOFF, David et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied geochemistry**, v. 51, p. 229-245, 2014.

LI, Zhiwei et al. Experimental study of development and erosion of gravel mid-channel bar. **Advances in Water Science**, v. 25, n. 6, p. 797-805, 2014.

LIESENBERG, Veraldo; PONZONI, Flávio Jorge; GALVÃO, Lênio Soares. Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do cerrado com índices de vegetação dos sensores MODIS/TERRA e AQUA. **Revista Árvore**, v. 31, p. 295-305, 2007.

LIMA, Júlia Piazi de. **PRESERVAÇÃO DAS ZONAS RIPÁRIAS E QUALIDADE DAS ÁGUAS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO PIRANGA-MG**. Orientador: Frederico Wagner de Azevedo Lopes. 2020. 177 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Instituto de Geociências - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, MG, 2020.

LONG, J., LI, H., WANG, Z., WANG, B., e XU, Y. Three decadal morphodynamic evolution of a large channel bar in the middle Yangtze River: Influence of natural and anthropogenic interferences. **Catena**, v. 199, p. 105128, 2021.

LOI, Duong Thi; CHOU, Tien-Yin; FANG, Yao-Min. Integration of GIS and remote sensing for evaluating forest canopy density index in Thai Nguyen Province, Vietnam. **International journal of environmental science and development**, v. 8, n. 8, p. 539-542, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.8.1012>. Acesso: 14 jun. 2023.

MACKLIN, M.G. Metal pollution of soils and sediments: a geographical perspective M.D. Newson (Ed.), **Managing the Human Impact of the Natural Environment**, **Belhaven Press**, London, pp. 172-195. 1992.

MACKLIN, M.G. Fluxes and storage of sediment-associated heavy metals in floodplain systems: assessment and river basin management issues at a time of rapid environmental change. M.G. Anderson, D.E. Walling, P.D. Bates (Eds.), **Floodplain Processes**, Wiley, Chichester, pp. 441-460. 1996.

MACKLIN, M.G., PAYNE, I., PRESTON, D., SEDGWICK, C. **Review of the Porco mine tailings dam burst and associated mining waste problems, Pilcomayo basin, Bolivia**. Report to the UK Overseas Development Agency, p. 33. 1996.

MACKLIN, Mark G. et al. Physical stability and rehabilitation of sustainable aquatic and riparian ecosystems in the Rio Guadiamar, Spain, following the Aznalcóllar mine tailings dam failure. In: **Mine Water and Environment, International Congress, International Mine Water Association**. 1999. p. 13-17.

MACKLIN, Mark G. et al. The long term fate and environmental significance of contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramureş County, upper Tisa Basin, Romania. **Applied Geochemistry**, v. 18, n. 2, p. 241-257, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00123-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00123-3). Acesso: 14 jun. 2023.

MACKLIN, Mark G. et al. A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. **Geomorphology**, v. 79, n. 3-4, p. 423-447, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.024>. Acesso em: 6 mai. 2023.

MARANHÃO, N. **Termo de referência para elaboração do plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce. Anexo 1 - Diagnóstico consolidado da Bacia**. 2005. Disponível em: <http://www.riodoce.cbh.gov.br/Diagnostico2005>. Acesso em: 6 mai. 2023.

MARCIANO, Alexandre Germano. **Caracterização da hidrodinâmica, da qualidade da água e do transporte de sedimentos, nas confluências do rio doce com seus três principais afluentes, por meio da modelagem numérica e da observação**. 266f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024.

MARCIANO, Alexandre Germano et al. Dramatic changes in the confluence morphology driven by an extreme hydrologic pulse: impacts to River Doce restoration. **RBRH**, v. 29, p. e9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230139>. Acesso em: 2 mai. 2023.

MARQUES FILHO, Ogê; VIEIRA NETO, Hugo. **Processamento Digital de Imagens**, Rio de Janeiro: Brasport, ISBN 8574520098. 1999.

MHANGARA, Paidamwoyo; MAPURISA, Willard; MUDAU, Naledzani. Comparison of image fusion techniques using satellite pour l'Observation de la Terre (SPOT) 6 satellite imagery. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1881, 2020.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 17: 1425-1432. 1996.

MCFEETERS, S. K. Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: a practical approach. **Remote Sensing**, v. 5, n. 7, p. 3544-3561, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs5073544>. Acesso em: 2 mai. 2023.

MENDES, Rafaella Gouveia et al. A partial least squares-path model of environmental degradation in the Paraopeba River, for rainy seasons after the rupture of B1 tailings dam, Brumadinho, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 851, p. 158248, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158248>. Acesso em: 10 fev. 2024.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MOSLEY M. P. An experimental study of channel confluences, Unpublished Ph.D. thesis, Colorado State University. 1975.

MOSLEY, M. P. An experimental study of channel confluences. **Journal of Geology**. 1976.

NANDI, Ketan Kumar et al. Exploring the influence of vegetated mid-channel bar on flow and turbulence in bifurcated channels: An experimental approach. **Advances in Water Resources**, v. 189, p. 104727, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104727>. Acesso em: 10 fev. 2024.

NANNI, A.; BARROS, S. D.; DESCOVI FILHO, L.; SOUZA, M. S.; PEREIRA FILHO, N. S.; GOVEIA, S. S. 2017. QGIS User Guide, Versão 2.18. 473 p. Disponível em: https://docs.qgis.org/2.18/pdf/pt_BR/QGIS-2.18-UserGuide-pt_BR.pdf. Acesso em: 01 de set. 2023.

NOGUEIRA, E. M. Desenvolvimento inicial de espécies florestais nativas em tecnossolo formado por rejeito de mineração de ferro na Bacia do Rio Doce. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

NOVELLI, Guillaume; GUIGAND, Cédric M.; ÖZGÖKMEN, Tamay M. Technological advances in drifters for oil transport studies. **Marine Technology Society Journal**, v. 52, n. 6, p. 53-61, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.52.6.9>. Acesso em: 01 de set. 2023.

NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org). Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais. Brasília: Universidade de Brasília. 2001.

ÖZELKAN, E. Water Body Detection Analysis Using NDWI Indices Derived from Landsat-8 OLI. **Polish Journal of Environmental Studies**, 29(2), 1759-1769. 2020. <https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>. Acesso em: 01 de set. 2023.

PAES, R. J. 2007. **Análise da dinâmica do fluxo na Confluência dos rios Paraná e Paranapanema**. Dissertação—Universidade Guarulhos - UnG.

PALU, Marcus Cristiano. **FLOODWAVE AND SEDIMENT TRANSPORT ASSESSMENT ALONG THE DOCE RIVER AFTER THE FUNDÃO TAILINGS DAM COLLAPSE (BRAZIL)**. Ph.D. tese, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Colorado State Univ, 155p. 2019.

PARSONS, Daniel R. et al. Large river channel confluences. **River confluences, tributaries and the fluvial network**, p. 73-91, 2008.

PARSONS, Daniel R. et al. Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence–difffluence, Rio Paraná, Argentina. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group**, v. 32, n. 1, p. 155-162, 2007.

PEREIRA, L. F.; GUIMARÃES, R. M. F. Mapeamento multicategórico do uso/cobertura da terra em escalas detalhadas usando Semi-automatic Classification

Plugin. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 4, p. 379–385, 2018. DOI: 10.24221/jeap.3.4.2018.2016.379-385. Acesso em: 23 out. 2023.

PESSI, Dhonatan Diego. Sensoriamento remoto com sensores de aeronaves remotamente pilotadas para aplicações de agricultura de precisão e gestão ambiental. 2019.

PISSARRA, Teresa Cristina Tarlé et al. Role of mine tailings in the spatio-temporal distribution of phosphorus in river water: the case of B1 Dam break in Brumadinho. **Water**, v. 14, n. 10, p. 1572, 2022. DOI: 10.3390/w14101572. Acesso em: 9 out. 2024.

PLANETEK Italia – GeoEye-1. Disponível em: https://www.planetek.it/prodotti/tutti_i_prodotti/geoeye_1. Acesso em: 4 out. 2024.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 160 p. 2012.

RADEMANN, Lucas Krein; TRENTIN, Romario; ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; BREUNIG, Fabio Marcelo. AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE BANCOS DE AREIA COM IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO NO RIO AREAL DO LIMEIRA, SUL DO BRASIL. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, [S. l.], v. 57, p. 3–22, 2023. DOI: 10.5380/raega.v57i0.87358. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/87358>. Acesso em: 12 ago. 2024.

REGO, Bruno Nogueira. Análise multicritério espacial como ferramenta para avaliação de projeto de restauração florestal realizado nos municípios de Mariana/MG e Barra Longa/MG, afetados pelo rompimento da barragem de Fundão. 2023.

RESENDE, Maria da Conceição Caetano Melo; CARVALHO, Breylla Campos; GUERRA, Josefa Varela. Variabilidade morfológica de bancos de sedimentos nos canais de maré de Barra de Guaratiba (baía de Sepetiba, RJ, Brasil). 2015.

RHOADS, Bruce L. The dynamic basis of geomorphology reenvisioned. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 96, n. 1, p. 14-30, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2006.00496.x>. Acesso em: 1 ago. 2024.

RIBEIRO, Paula Godinho et al. Spectral and soil quality index for monitoring environmental rehabilitation and soil carbon stock in an Amazonian sandstone mine. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 597, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020597>. Acesso em: 1 ago. 2024.

RIBEIRO, Máisa Mello et al. Mapeamento de Áreas Favoráveis a Sedimentação a partir de Derivadores Rastreados por Satélite e Imagens de Alta Resolução. 2023. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/05.03.14.14/doc/156027.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

RIKIMARU, A., MIYATAKE, S. Development of Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model using Indices of Vegetation, Bare soil and Shadow. Paper

presented at the Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) 1997, Kuala Lumpur, Malaysia. 1997.

RIKIMARU, A. et al. Tropical forest cover density mapping. **Tropical ecology**, v. 43, n. 1, p. 39-47, 2002.

DE FARIA ROCHA, Marcelo Henrique Fernandes et al. Avaliação do Índice de Qualidade das águas e da contaminação por tóxicos do Ribeirão do Carmo em Monsenhor Horta, distrito de Mariana–MG. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e110101018680-e110101018680, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.18680. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18680>. Acesso em: 2 set. 2024.

RODRIGUES, Aline Sueli de Lima et al. Adequação e avaliação da aplicabilidade de um Protocolo de Avaliação Rápida na bacia do rio Gualaxo do Norte, Leste-Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, p. 231-244, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.872>. Acesso em: 6 fev. 2023.

ROUIBAH, K., BELABBAS, M. Applying Multi-Index Approach from Sentinel-2 Imagery to Extract Urban Areas in Dry Season (Semi-Arid Land in North East Algeria). **Revista de Teledetección**, 56, 89-101. 2020. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13787>. Acesso em: 6 fev. 2023.

RUDORFF, Natalia et al. Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the Doce River plume off the eastern Brazilian coast. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 349-361, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.013>. Acesso em: 17 out. 2023.

RUMORA, Luka; MILER, Mario; MEDAK, Damir. Contemporary comparative assessment of atmospheric correction influence on radiometric indices between Sentinel-2A and Landsat 8 imagery. **Geocarto International**, v. 36, n. 1, p. 13-27, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1590465>. Acesso em: 4 jun. 2024.

SAMIR, Fatma; BADAWY, Neveen; EL SERSAWY, Hossam. Assessment of hydro-morpho dynamics of the Nile River confluence scour. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 29, n. 5, p. 661-673, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/09715010.2022.2134741>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.V.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F.C. (2001). Hidrometria Aplicada. Curitiba-PR, 372p.

SCHAEFER, Carlos Ernesto G. Reynaud et al. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnosolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. **Arquivos do museu de história natural e jardim botânico da UFMG**, v. 24, n. 1-2, 2015.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. Conceitos de Bacias Hidrográficas: teorias e aplicações. Ilhéus, BA : Editus, 2002. 293p.

SCOTTI, Maria Rita et al. Remediation of a riparian site in the Brazilian Atlantic forest reached by contaminated tailings from the collapsed Fundão dam with native woody species. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 669-675, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ieam.4272>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SENA JÚNIOR, Darly G. de et al. Avaliação de métodos automáticos de limiarização para imagens de plantas de milho atacadas por Spodoptera frugiperda. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 359-366, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200030>. Acesso em: 13 jul. 2023.

SILVA, Edênio Sebastião Faria et al. Evolução das feições morfológicas do rio Paraguai no Pantanal de Cáceres-Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 4, 2012. DOI: 10.20502/rbg.v13i4.299. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/299>. Acesso em: 14 set. 2024.

SILVA, Flaviane Cristina. Caracterização de poluições orgânicas por pesquisa de coliformes na região da bacia hidrográfica do rio Doce D01: rio Piranga. **Além dos Muros da Universidade**, v. 3, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.70615/alemur.v3i3.916>. Acesso em: 15 jul. 2024.

SISEMA. Rio Paraopeba 2021 Ações de recuperação da bacia do rio Paraobepa – 3 anos. Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Governo de Minas Gerais. 2021.

SMOLDERS, A. J. P. et al. Effects of mining activities on heavy metal concentrations in water, sediment, and macroinvertebrates in different reaches of the Pilcomayo River, South America. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 44, p. 0314-0323, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-002-2042-1>. Acesso em: 30 jul. 2024.

SOBREIRA, Frederico. Mineração do ouro no período colonial: alterações paisagísticas antrópicas na serra de Ouro Preto, Minas Gerais Gold mining in the colonial period: landscape anthropic changes at serra de Ouro Preto, Minas Gerais. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, n. 1, p. 55-65, 2014.

SOUZA, Leonardo Andrade de; SOBREIRA, Frederico Garcia. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DO CARMO: ATRIBUTOS MORFOMÉTRICOS, EQUAÇÃO DE CHUVA INTENSA E TEMPO DE CONCENTRAÇÃO, E ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 7, ed. 69, p. 1355-1370, 08. 2017.

STEVANUX, J.C., LATRUBESSE, E.M. Geomorfologia fluvial. Oficina de Textos. 2017.

SZABO, SZILARD & GÁCSI, ZOLTÁN & BERTALAN-BALAZS, BOGLARKA. 2016. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. **Landscape & Environment**. 10. 194-202. DOI: 10.21120/LE/10/3-4/13. Acesso em: 30 jul. 2024.

TAGLIARINI, Felipe de Souza Nogueira. Imagens de drone e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para classificação segmentada em Áreas de Preservação Permanente (APP). 2020.

TAMWING, D. S.; MONTEFUSCO, C.; IRURETA, O. O. A.; MESQUITA, A. A.; SERRANO, R. O. P.; MOREIRA, J. G. V.. Relação cota-vazão e ajuste da curva-chave: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Acre, Brasil. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.13, n.1, p.129-140, 2022. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179_6858.2022.001.0011. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/geo/article/view/4405>. Acesso em: 15 jan. 2024.

TEIXEIRA, C. A.; OLIVEIRA, E. M. de; PIMENTEL, J. da S. 2024. Software qgis na produção de mapas temáticos para análise da microrregião de Boquirá-BA. *Geopauta*, V. 2, n. 3, p. 35-44, 2018. DOI: 10.22481/rg.v2i3.4405. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/geo/article/view/4405>. Acesso em: 15 jun. 2024.

TOLA, E., AL-GAADI, K.A., MADUGUNDU, R. 2019. Employment of GIS techniques to assess the long-term impact of tillage on the soil organic carbon of agricultural fields under hyper-arid conditions. **PLOS ONE**, 14, e0212521. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212521>. Acesso em: 30 jul. 2024.

TURNER, J.N. 2003. **A Geomorphological–Geochemical Assessment of the Impact of the Aznalcóllar Tailings Dam Failure on the Río Guadiamar, Southwest Spain**. Dissertação de PhD. University of Wales Aberystwyth, UK, p. 318.

FUNDAÇÃO RENOVA; UFMG; UFV;. Definição de áreas prioritárias para restauração florestal na Bacia do Rio Doce, 2018.

UNEP. Spill of liquid and suspended waste at the Aural S.A. retreatment plant in Baia Mare. United Nations Environment Programme (UNEP) and Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA) assessment mission to Romania, Hungary, Federal Republic of Yugoslavia report. Geneva. 2000.

VAZ, Ana Carolina; JUNIOR, Osmar Olinto Möller; DE ALMEIDA, Tabajara Lucas. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. **Atlântica (Rio Grande)**, v. 28, n. 1, p. 13-24, 2006.

GAUTAM, Vivek Kumar et al. Assessment of surface water Dynamics in Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and KT transformation. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 739-746, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15000966>). Acesso em: 15 jun. 2024.

WEN, Zhaofei et al. Remotely sensed mid-channel bar dynamics in downstream of the three Gorges Dam, China. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 409, 2020.

WEVOLVER. 2024. EBee Classic. Disponível em: [eBee Classic \(wevolver.com\)](http://wevolver.com) Acesso em: 25 set. 2024.

XIE, Z., HUANG, H., YU, G., e ZHANG, M.: Quantifying the effects of dramatic changes in runoff and sediment on the channel morphology of a large, wandering river using remote sensing images. **Water**, V. 10, 1-27, 2018.

ZAIDAN, Ricardo Tavares. Geoprocessamento conceitos e definições. **Revista de Geografia-PPGEO-UFJF**, v. 7, n. 2, 2017.

ZANOTELLI, Cláudio Luiz. Efeitos permanentes da poluição oriunda da ruptura da barragem da empresa Samarco em Mariana (Minas Gerais) sobre a planície costeira do Rio Doce, Espírito Santo. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia**, n. 62, 2024.

ZHANG, Tao; FENG, Minquan; CHEN, Kailin. Hydrodynamic characteristics and channel morphodynamics at a large asymmetrical confluence with a high sediment-load main channel. **Geomorphology**, v. 356, p. 107066, 2020.

ZHAO, Hongmei; CHEN, Xiaoling. Use of normalized difference bareness index in quickly mapping bare areas from TM/ETM+. In: **International geoscience and remote sensing symposium**. 2005. p. 1666. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Hong-Mei-Zhao/publication/4183057_Use_of_normalized_difference_bareness_index_in_quickly_mapping_bare_areas_from_TM/links/5a3440a0a6fdcc769fd235f5/Use-of-normalized-difference-bareness-index-in-quickly-mapping-bare-areas-from-TM-ETM.pdf. Acesso em: 18 out. 2024.

ZHENG, Yuanmao; TANG, Lina; WANG, Haowei. An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. **Journal of Cleaner Production**, v. 328, p. 129488, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488>. Acesso em: 18 out. 2024.

ZHU, Xin-Ming et al. Impact of atmospheric correction on spatial heterogeneity relations between land surface temperature and biophysical compositions. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 59, n. 3, p. 2680-2697, 2020.doi: 10.1109/TGRS.2020.3002821. Acesso em: 3 out. 2024.