

MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NAS CONFLUÊNCIAS DO RIO DOCE, APÓS O DESASTRE DE MARIANA – MG, BRASIL

TWO-DIMENSIONAL MODELING OF SEDIMENT TRANSPORT AT THE CONFLUENCES OF THE DOCE RIVER, AFTER THE MARIANA DISASTER – MG, BRAZIL

Alexandre Germano MARCIANO¹, Alessandro Luvizon BÉRGAMO¹, Paula Sayeko Souza ODA², Samara Calçado AZEVEDO¹, André Luiz Vieira BAROUCH¹

¹Universidade Federal de Itajubá. Avenida BPS, 1303. Itajubá – MG. E-mails: agermano@unifei.edu.br;

luvizon.bergamo@unifei.edu.br; samara_calcado@unifei.edu.br; avbarouch@unifei.edu.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Rodovia Presidente Dutra, Km 40. Cachoeira Paulista – SP. E-mail: paula.oda@inpe.br

Introdução
Materiais e método
Área de estudo
Bacia hidrográfica do rio Doce
Confluências
Metodologia
Dados das estações de monitoramento
Modelo Digital de Elevação (MDE)
Simulação hidrodinâmica 2D
Simulação de transporte de sedimentos 2D
Calibração e avaliação das simulações
Resultados e discussão
Calibração, ajustes e avaliação do modelo hidrodinâmica 2D
Calibração, ajustes e avaliação do modelo de transporte de sedimentos 2D
Simulação hidrodinâmica 2D
Simulação transporte de sedimentos 2D
Conclusões
Referências

RESUMO - Em 5 de novembro de 2015, o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana-MG, liberou 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos, impactando severamente o rio Doce. Para compreender a recuperação do rio, foram aplicados modelos hidrodinâmicos 2D e de transporte de sedimentos 2D nas confluências do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo e do rio do Carmo com o rio Piranga. Os modelos indicaram que escoamentos rápidos promovem erosão, enquanto escoamentos lentos favorecem a deposição de sedimentos. O rio do Carmo exerce um papel essencial na diluição dos sedimentos transportados pelo rio Gualaxo do Norte, contribuindo para a mitigação dos impactos na qualidade da água. Esse processo auxilia na reestabilização do ecossistema e na recuperação da biodiversidade. Os resultados destacam a importância dos afluentes na recuperação do rio Doce, demonstrando que a dinâmica hidrossedimentar pode influenciar positivamente a qualidade da água. O estudo reforça a relevância do monitoramento contínuo e da modelagem hidrodinâmica para a gestão ambiental, visando minimizar os efeitos do desastre e promover estratégias eficazes para a recuperação do ecossistema impactado.

Palavras-chave: HEC-RAS. Modelo hidrodinâmico 2D. Modelo de transporte de sedimentos 2D. Barragem de rejeitos de Fundão.

ABSTRACT - On November 5, 2015, the collapse of the Fundão dam in Mariana, MG, released 32 million cubic meters of tailings, severely impacting the Doce River. To understand the river's recovery, 2D hydrodynamic and 2D sediment transport models were applied at the confluences of the Gualaxo do Norte River with the Carmo River and the Carmo River with the Piranga River. The models indicated that fast flows promote erosion, while slow flows favor sediment deposition. The Carmo River plays a crucial role in diluting the sediments transported by the Gualaxo do Norte River, helping mitigate the impacts on water quality. This process aids in ecosystem re-stabilization and biodiversity recovery. The results highlight the importance of tributaries in the Doce River's recovery, demonstrating that hydrosedimentary dynamics can positively influence water quality. The study reinforces the relevance of continuous monitoring and hydrodynamic modeling for environmental management, aiming to minimize the disaster's effects and promote effective strategies for ecosystem restoration.

Keywords: HEC-RAS. 2D hydrodynamic model. 2D sediment transport model. Fundão tailings dam.

INTRODUÇÃO

No dia 5 de novembro de 2015, a barragem de Fundão, localizada em Mariana (MG), na região Central do estado de Minas Gerais, colapsou, liberando aproximadamente 32 milhões de m³ de rejeitos de mineração (IBAMA, 2016). A tragédia resultou na morte de 19 pessoas e causou

impactos ambientais severos (Dias et al., 2019; Rojas & Pereira, 2020). Considerado o maior desastre tecnológico do Brasil, o rompimento da barragem teve consequências devastadoras para ecossistemas, comunidades e economias locais (Bowker, 2015; Foesch et al., 2020).

A lama atingiu a barragem de Santarém e devastou o distrito de Bento Rodrigues, avançando pelo córrego Santarém e pelos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce, percorrendo cerca de 570 km até o oceano Atlântico (ANA, 2016). Segundo a Samarco S/A, 90% dos rejeitos sedimentaram entre as barragens de Fundão e Risoleta Neves, mas o restante atingiu o rio Doce, elevando a turbidez e causando graves impactos ambientais (IBAMA, 2016). Embora estudos indicassem ausência de toxicidade (CPRM & ANA, 2016), o desastre afetou pescadores, indígenas e comunidades ribeirinhas, resultando em perdas habitacionais, sociais e econômicas (Mauri et al., 2019).

Desde o desastre, diversos estudos analisaram seus impactos. Saadi & Campos (2015) reconstituíram sua trajetória, enquanto Silva et al. (2015) avaliaram os efeitos no solo e na vegetação. Santos et al. (2022) estudaram prejuízos agrícolas, e Carvalho et al. (2017) investigaram a contaminação do rio Doce por metais pesados. Evangelista et al. (2022) confirmaram que rejeitos atingiram Abrolhos, causando danos irreversíveis. Os impactos econômicos, sociais e ambientais persistem, especialmente na qualidade da água para abastecimento urbano. A restauração e limpeza da bacia do rio Doce são estimadas em US\$ 54 bilhões (Garcia et al., 2017; Burritt & Christ, 2018).

Para mitigar os impactos, diversas entidades intensificaram o monitoramento hídrico. O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), por meio do Projeto Águas de Minas, ampliou a análise da água superficial com base nas características dos rejeitos (IGAM, 2017). O Serviço Geológico do Brasil (SGB) e a Agência Nacional de Águas (ANA) realizaram medições para monitorar a turbidez e a qualidade da água, coletando dados sobre vazão, nível d'água, temperatura, OD, pH, turbidez e concentração de sedimentos (CPRM & ANA, 2016). A Fundação Renova coordena o PMQQS, um programa permanente de monitoramento quali-quantitativo da água e sedimentos em 59 estações, avaliando riscos toxicológicos e ecotoxicológicos (Santana et al., 2021).

A disponibilidade de dados após rompimentos de barragens de rejeitos é escassa na literatura científica (Palu & Julien, 2019). A maioria das pesquisas concentra-se na caracterização da inundação (Kumar et al., 2022; Abdelghani et al., 2023; Nistoran & Simionescu, 2023), havendo lacunas nos estudos sobre o transporte de sedi-

mentos e a qualidade da água, especialmente em confluências. Assim, o desastre de Mariana oferece uma oportunidade para aprofundar essas análises.

Modelos hidrodinâmicos são fundamentais para compreender desastres ambientais, representando matematicamente o escoamento e delimitando áreas alagáveis, além de estimar vazões, cotas e velocidades de fluxo (Marciano et al., 2018). Já os modelos de transporte de sedimentos simulam erosão e deposição, influenciando a geometria do leito fluvial (Joshi et al., 2019; Patriadi et al., 2021). Essas ferramentas são essenciais para avaliar riscos, mitigar danos e planejar a recuperação ambiental (Bressan, 2020; Rahman & Chakrabarty, 2020; Chevalier et al., 2021).

Estudos na bacia do rio Doce analisam desastres usando modelos hidrossedimentológicos. Cavalcante & Fan (2020) compararam modelos uni e bidimensionais, destacando maior sensibilidade nos unidimensionais. Palu & Julien (2020) desenvolveram uma inovação de advecção-dispersão com sedimentação para aumentar a segurança de barragens. Gressler (2022) investigou a influência do coeficiente de Manning em simulações. Almeida (2022) constatou que o transporte de sedimentos pouco impactou os primeiros quilômetros a jusante. Marciano et al. (2024) enfatizaram a importância das confluências na retenção de sedimentos.

Nesse contexto de entender a hidrodinâmica e as suas implicações para a qualidade de água e para o transporte de sedimentos, este estudo realiza simulações hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos bidimensionais para estudar as confluências do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo e do rio do Carmo com o rio Piranga. Com as análises dessas simulações, visa-se contribuir para a geração de informações relevantes à recuperação do rio impactado e para o planejamento de medidas preventivas e mitigatórias em possíveis rompimentos futuros.

A simulação bidimensional de transporte de sedimentos nos afluentes do rio Doce oferece contribuições científicas, especialmente após o desastre de Mariana-MG.

Essa abordagem permite a reconstrução da dinâmica do fluxo de rejeitos, com a identificação de trajetórias, velocidades e áreas de deposição de sedimentos, além de fornecer subsídios para a avaliação da dispersão de contaminantes e dos impactos na morfologia fluvial. A simulação bidimensional de transporte de sedimento é

fundamental para o planejamento e monitoramento de possíveis ações de remediação locais, tais como dragagem e revegetação, contribuindo para a eficácia dessas intervenções.

Este estudo avança no desenvolvimento de modelos bidimensionais de transporte de sedimentos, especialmente em sistemas fluviais com

elevada carga sedimentar e suscetíveis a eventos extremos. Essas contribuições são essenciais para a gestão ambiental, a recuperação sustentável do rio Doce e a mitigação de impactos futuros, promovendo benefícios tanto para os ecossistemas aquáticos quanto para as comunidades locais.

MATERIAIS E MÉTODO

Área de estudo

Bacia hidrográfica do rio Doce

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) está localizada na região sudeste do Brasil, entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste (Figura 1).

A maior parte da área de drenagem está no estado de Minas Gerais, correspondendo a 86%, enquanto os outros 14% se encontram no estado

do Espírito Santo, com uma área de drenagem de 82.600 km² e, que envolve 230 municípios (CBH DOCE, 2016).

O curso d'água principal da BHRD percorre 888 km e é formado pelo rio Piranga e pelo rio Doce.

O rio Doce nasce da confluência do rio do Carmo e do rio Piranga, e se estende por 570 km até desaguar no oceano Atlântico (Coelho, 2007; Consórcio Ecoplan-Lume, 2010).

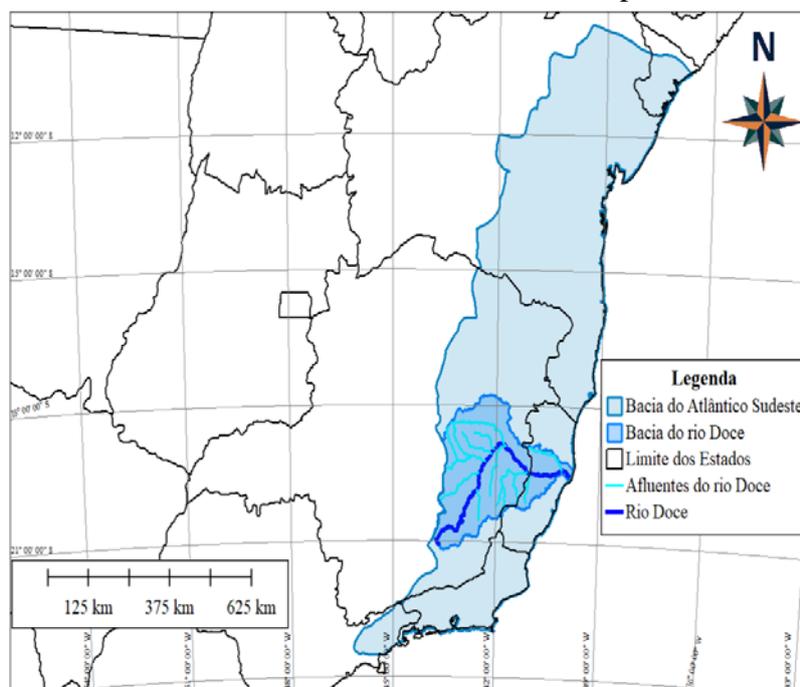


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Doce.

Confluências

Esse estudo engloba duas confluências, a confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo e a confluência do rio do Carmo com o rio Piranga, que estão localizadas no quadrilátero ferrífero. O quadrilátero ferrífero é uma região no centro-sul do estado de Minas Gerais, que possui a maior produção de ferro bruto do Brasil. Essas confluências são formadas por duas sub bacias hidrográficas, são elas:

- Sub-bacia hidrográfica do rio Piranga – possui uma área de drenagem de 6.612 km², o rio Piranga é o principal curso d'água, com 238 km de extensão e sua foz situa-se na confluência com

o rio do Carmo.

- Após essa confluência o curso d'água recebe o nome de rio Doce (Consórcio Ecoplan-Lume, 2010).

- Sub-bacia hidrográfica do rio do Carmo – possui uma área de drenagem de 2.279 km², o rio do Carmo é o principal curso d'água, com 185 km de extensão e sua foz situa-se na confluência com o rio Piranga. (Consórcio Ecoplan-Lume, 2010).

A figura 2 mostra a área de estudo, a confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo e a confluência do rio do Carmo com o rio Piranga.

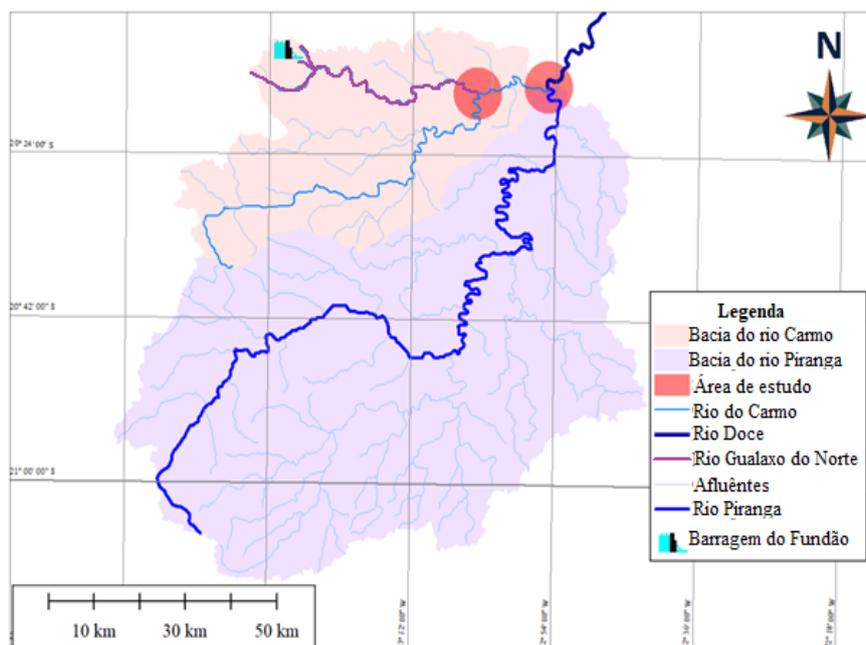


Figura 2 – Localização da área de estudo – confluência do rio do Carmo com o rio Piranga.

Metodologia

A metodologia está apresentada em cinco etapas, sendo elas: Dados das estações de monitoramento; Modelo Digital de Elevação (MDE); Simulação hidrodinâmica 2D; Simulação de transporte de sedimentos 2D e; Calibração e avaliação das simulações.

Dados das estações de monitoramento

Neste estudo, foram utilizados os dados hidrológicos, sedimentológicos e de qualidade de água disponíveis na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) da Agência Nacional das Águas (ANA) e os dados do PMQQS da Fundação RENOVA. As estações que estão à montante das confluências serviram como entrada de dados para gerar o modelo, enquanto as que estão à jusante serviram para calibração do modelo.

A princípio foi feita a seleção das estações que

estão dentro da área de estudo, em seguida foi feito um teste de consistência de dados, buscando possíveis inconsistências ou falhas, que não foram observadas. Os dados ratificados foram organizados por data e horário, em formato de planilha Excel para geração de gráficos. Após esses procedimentos foram criados os hidrogramas e as curvas de sedimentos para serem inseridos no programa de simulação. O período levantado das estações de monitoramento foi de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2020, abrangendo o período anterior, durante e posterior ao desastre de Mariana – MG.

As estações foram definidas de acordo com a quantidade de dados e pela localização na área de estudo. Foram feitos teste de consistência nos dados das estações para oferecerem confiança na simulação. A figura 3 mostra a localização das estações de monitoramento.

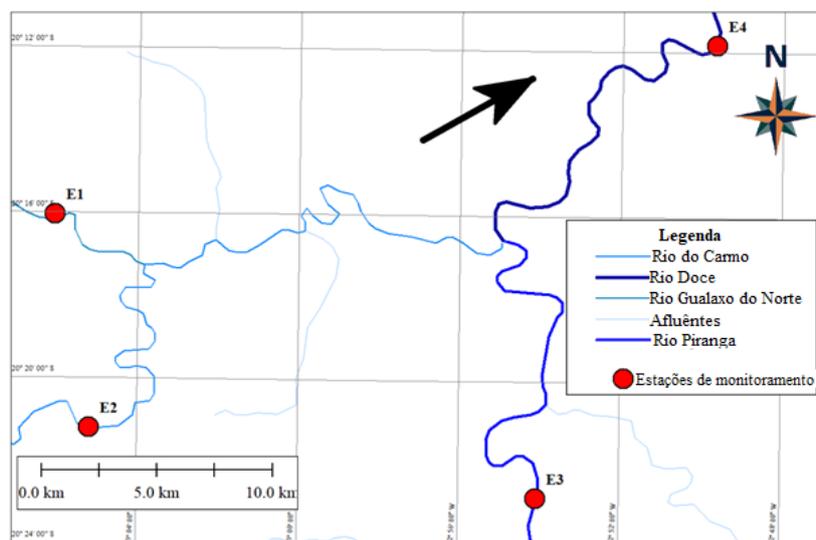


Figura 3 – Localização das estações de monitoramento

Com os dados das estações de monitoramento foram feitas as planilhas com os hidrogramas. As figuras 4, 5, 6 e 7 mostram os hidrogramas de cada estação. A estação E1, do rio Gualaxo do Norte, trouxe os rejeitos de minério de ferro do desastre de Mariana – MG, no período de 5 a 8 de novembro de 2015. As estações do rio do Carmo (E2) e do rio Piranga (E3) não foram

afetadas pelo desastre. A estação E4, localizada na barragem da Risoleta Neves, teve a vazão amortecida pela barragem. Em janeiro de 2020 teve um evento de cheia em todos os rios, os quais foram detectados pelas estações. Os dados de E1, E2 e E3 foram usados como dados de entrada no programa HEC-RAS. E4 foi usada para calibrar o modelo.

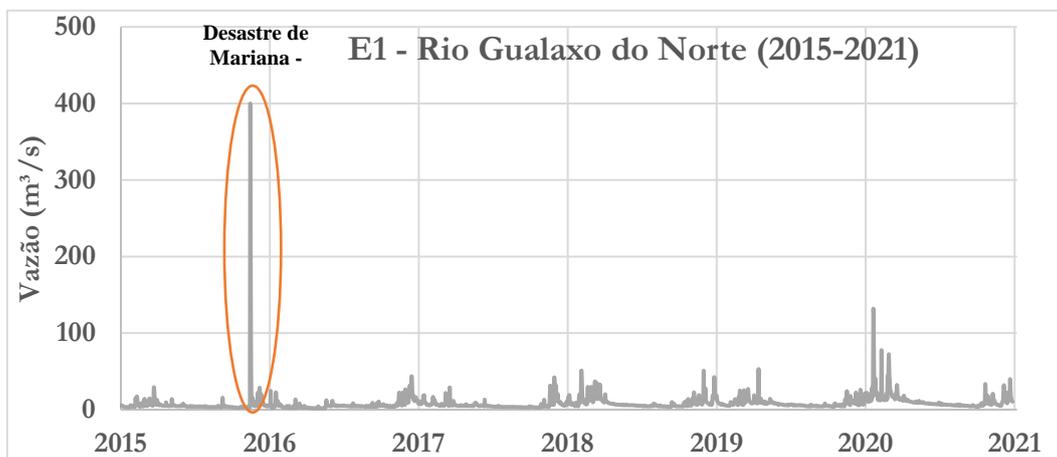


Figura 4 – Estação E1 do rio Gualaxo do Norte.

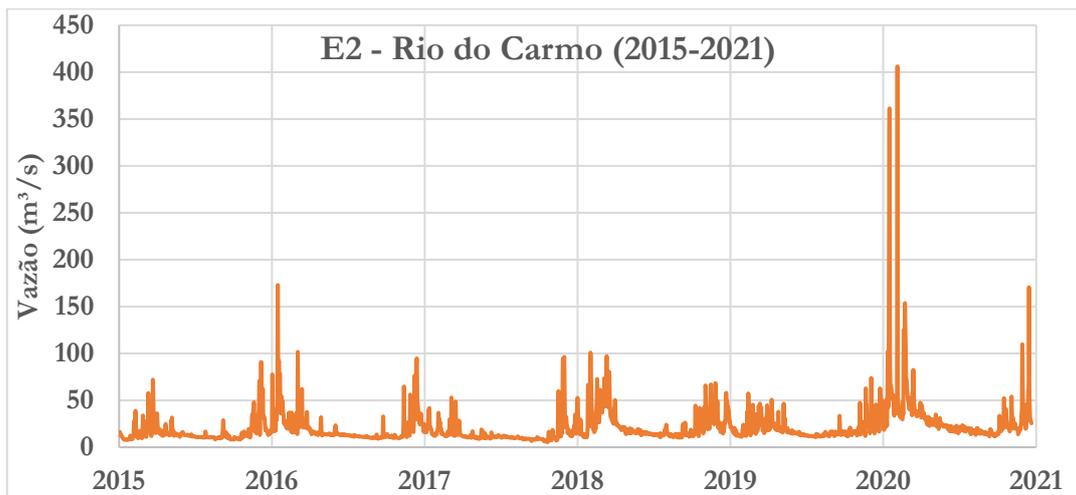


Figura 5 – Estação E2 do rio do Carmo.

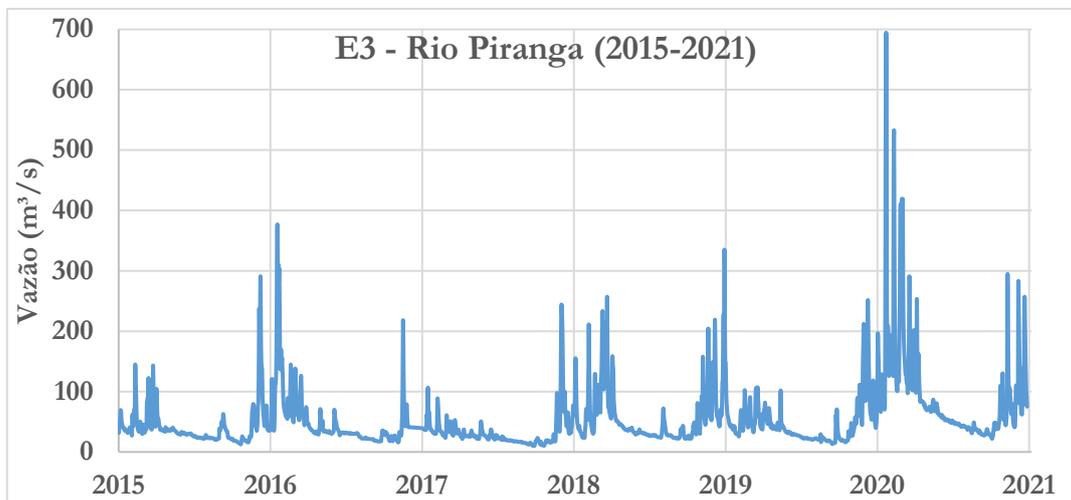


Figura 6 – Estação E3 do rio Piranga

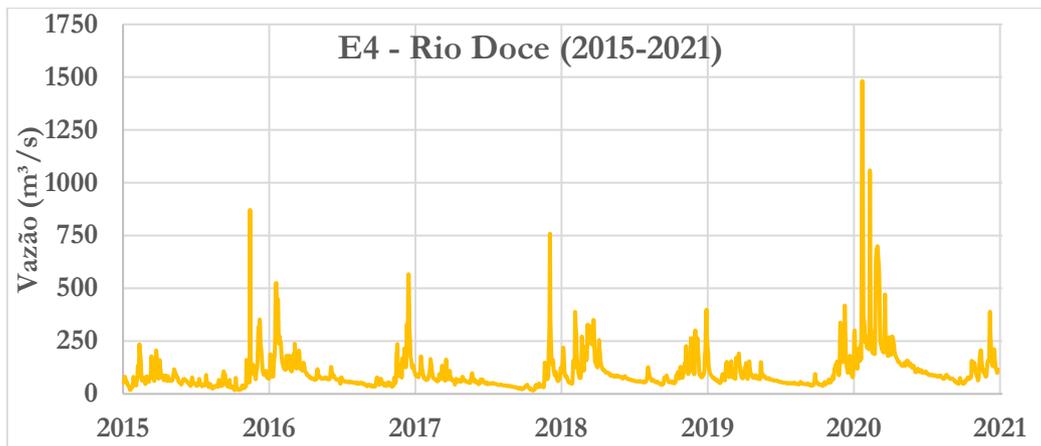


Figura 7 – Estação E4 do rio Doce.

As estações de monitoramento são usadas para gerar hidrogramas para estudos hidrodinâmicos e sedimentológicos (Fagundes, 2018; Lemos et al., 2022). A estação E1 foi usada nos estudos de Pulu & Julien (2020) e Macedo et al. (2021) para análise de sedimentos. A estação E2 foi usada por Barbosa (2004) para regionalização das vazões da bacia do rio do Carmo, e Macedo et al. (2021) usaram para estudos de sedimentos. A estação E3 foi usada por Serrano et al. (2020) e Veiga (2022) para avaliarem a qualidade da água e por Araújo et al (2021) para modelagem hidrológica. Palu & Julien (2019) e Aires et al (2022) fizeram estudos de transporte de sedimentos, e Coelho et al (2022) fizeram um relatório técnico para um sistema de alerta contra enchentes, usando os dados da estação E4.

Modelo digital de elevação (MDE)

Para a criação do MDE da área de estudo, foram utilizados os conjuntos de dados obtidos através da coleta de campo, do catálogo de metadados da ANA e das imagens do radar do satélite ALOS PALSAR-2.

Esse processo de criação do MDE foi feito com intuito de representar a superfície dos escoamentos dos rios, detalhando as características físicas encontradas pelos levantamentos de dados.

Primeiramente, foi feito o tratamento dos dados para importar para um programa de SIG (Sistema de Informações Geográficas). E seguida foi feita a criação das calhas dos cursos d'água, através de interpolação das seções topobatimétricas, gerando a superfície. Os dados do satélite ALOS PALSAR-2 foram para complementar as lacunas da superfície.

Os levantamentos topográficos têm um custo elevado e demandam tempo na execução, o que dificulta a realização de estudos hidrológicos, hidráulicos e hidrossedimentológicos (Marciano, 2019). Por esses motivos, foram utilizados os

dados principais coletados em campo e os dados secundários adquiridos de outras fontes.

Foram realizadas coletas de dados na área de estudo, com o objetivo de caracterizar a topografia, sendo feitas as seguintes atividades: Levantamento planialtimétrico das seções; Medições dos parâmetros físicos da água; Medições de vazões e; coletas do sedimento nas margens e no fundo dos rios. Foram utilizados os seguintes equipamentos: Receptores GNSS modelo Leica CS09, L1, L2 e GLONASS, para as coletas de pontos topográficos e georreferenciamento; Sonda multiparâmetro Hanna modelo HI9828 para medição dos parâmetros físicos e químicos da água; medidor de vazão Qliner V3 para levantamento das seções topobatimétricas e das vazões e; Amostradores do tipo Van Veen para coleta do sedimento das margens e do fundo.

A figura 8 mostra alguns equipamentos utilizados nos lavamentos de dados em campo.

Um dos dados secundários utilizados foi a fonte do catálogo de metadados da ANA, que é uma plataforma com dados variados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Nesse estudo foram utilizados os dados das seções topobatimétricas da bacia hidrográfica do rio Doce. Esses dados foram coletados, processados e apresentados por uma empresa privada contratada por um consórcio de empresas (CBG-DOCE, IBIO Doce e ANA), para fazer serviços de topografia e batimetria.

Outra fonte de dados secundário utilizada foi do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) PALSAR-2 (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*), que possui imagens, com resolução espacial de 12,5 m, no formato GEO TIFF (*Georeferenced Tagged Image File*), disponibilizados gratuitamente pelo site ASF/NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).



Figura 8 – Equipamentos utilizados no trabalho de campo: A) Amostrador do tipo Van Veen; B). Sonda multiparâmetro Hanna HI9828; C) Medidor de vazão Qliner V3 e; D) Receptor GNSS Leica LI e L2.

Para o MDE gerado, desconsiderou-se o efeito de vegetação em virtude da não obtenção desses dados brutos na área analisada. Apesar da vegetação contribuir para uma representação mais realista do comportamento hidrológico em áreas naturais, pois altera o padrão de escoamento, criando áreas de velocidade reduzida e zonas de recirculação (Lima, 2023). Neste estudo esse efeito foi negligenciado por não ser tão significativo no modelo que se preocupa com a elevada carga sedimentar.

A vegetação pode ter um impacto significativo no MDE, dependendo de como o modelo é gerado e da densidade, do tipo e da altura da vegetação presente na área analisada. É ciente que a presença de vegetação altera o padrão de escoamento, criando áreas de velocidade reduzida e zonas de recirculação, como foi mostrado no estudo de Lima (2023). A vegetação retarda o escoamento superficial, promovendo uma distribuição mais uniforme da água isso reduz a erosão e o transporte de sedimentos, além de aumentar a retenção de água no terreno.

O MDE com vegetação oferece uma representação mais realista do comportamento

hidrológico em áreas naturais, considerando os efeitos da rugosidade, interceptação e infiltração. No entanto, a complexidade envolvida na coleta e na filtragem de dados brutos é consideravelmente extremamente elevada.

O MDE foi gerado através dos dados principais que foram coletados em campo e dos dados secundários que foram adquiridos de outras fontes. A figura 9 mostra a confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo e as seções topobatimétricas.

A figura 10 mostra a confluência do rio Carmo com o rio Piranga e as seções topobatimétricas. Nessa região, foi verificada a presença de diversas ilhas que impactam o fluxo e a velocidade da corrente.

Dentre elas, destacaram aquelas de caráter perene, compostas por rochas, e as temporárias constituídas por sedimentos, que se formaram em decorrência dos eventos de inundação ou cheia.

A existência dessas ilhas presentes criou-se um obstáculo ao estudo do transporte de sedimentos, em virtude da multiplicidade de variáveis envolvidas e da complexidade na obtenção de informações.

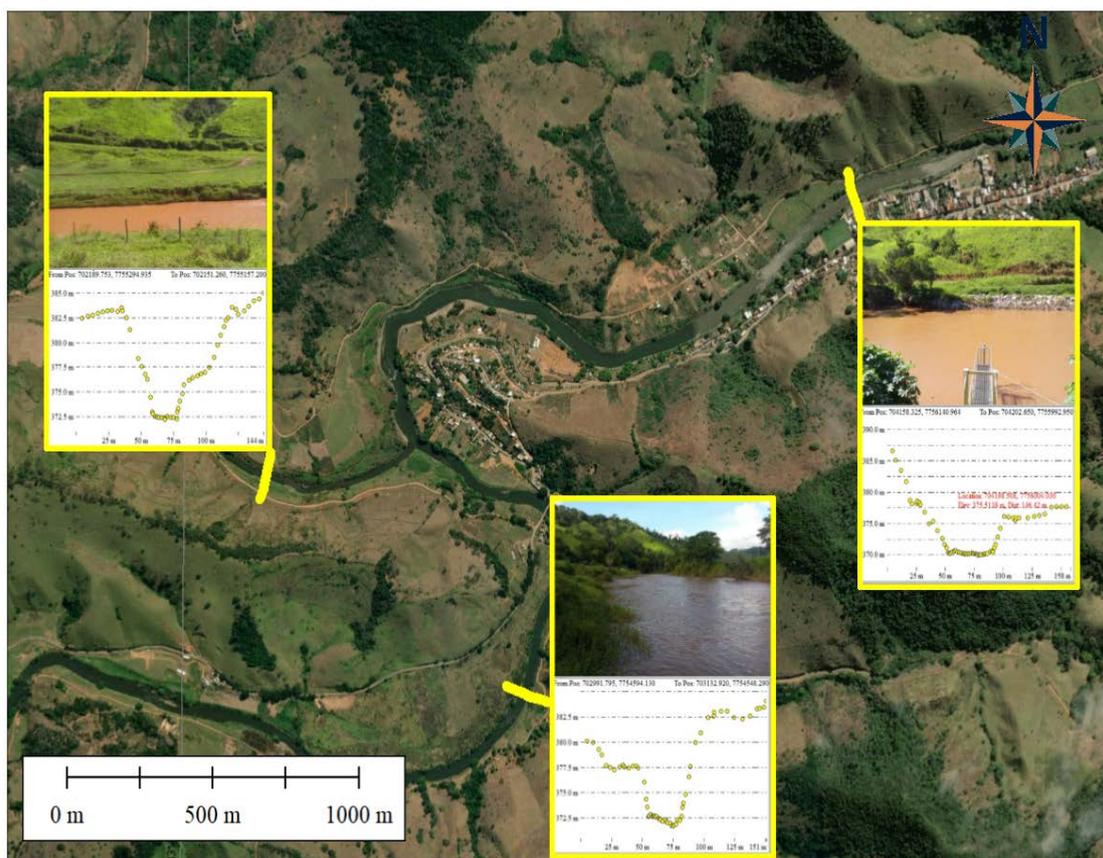


Figura 9 – Confluência do rio do Gualaxo do Norte com o rio do Carmo e seções topobatimétricas.

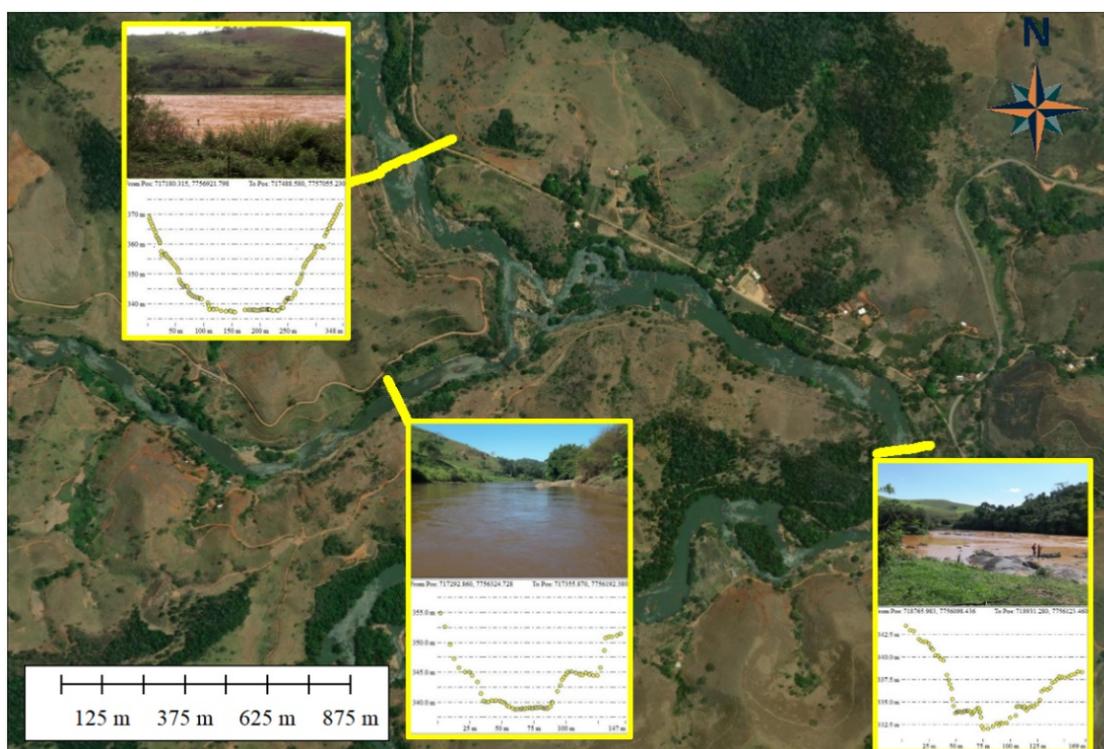


Figura 10 – Confluência do rio do Carmo com o rio Piranga e seções topobatimétricas

O MDE da área de estudo foi feito a partir das seções topobatimétricas e das declividades. As figuras 11 e 12 mostram as áreas do MDE das confluências, com as imagens do satélite. Os MDEs foram feitos para caracterizar as calhas principais e as calhas secundárias dos rios, não

foi dada importância para as partes mais altas. Buscou-se representar as ilhas, pois elas são importantes no estudo do escoamento e do transporte de sedimentos. Não houve necessidade de representar a parte mais alta, pois não foi usada na simulação.

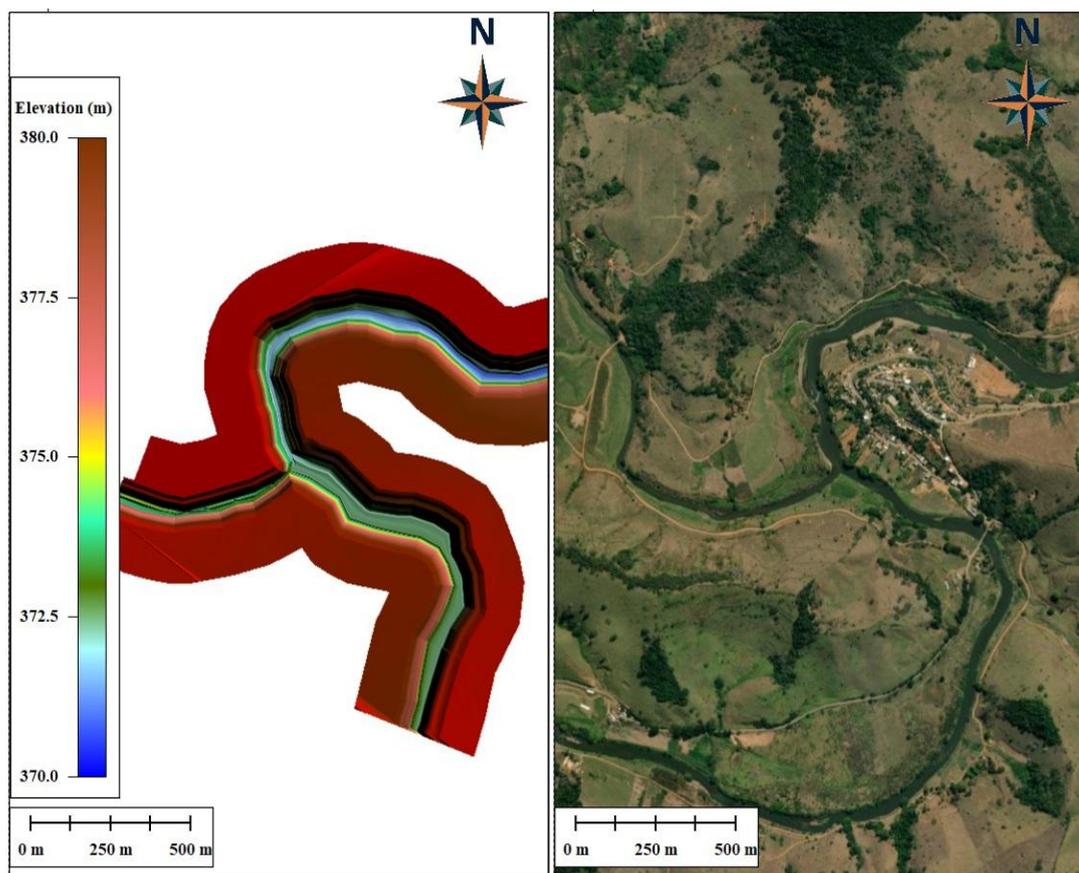


Figura 11 – MDE da confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo.

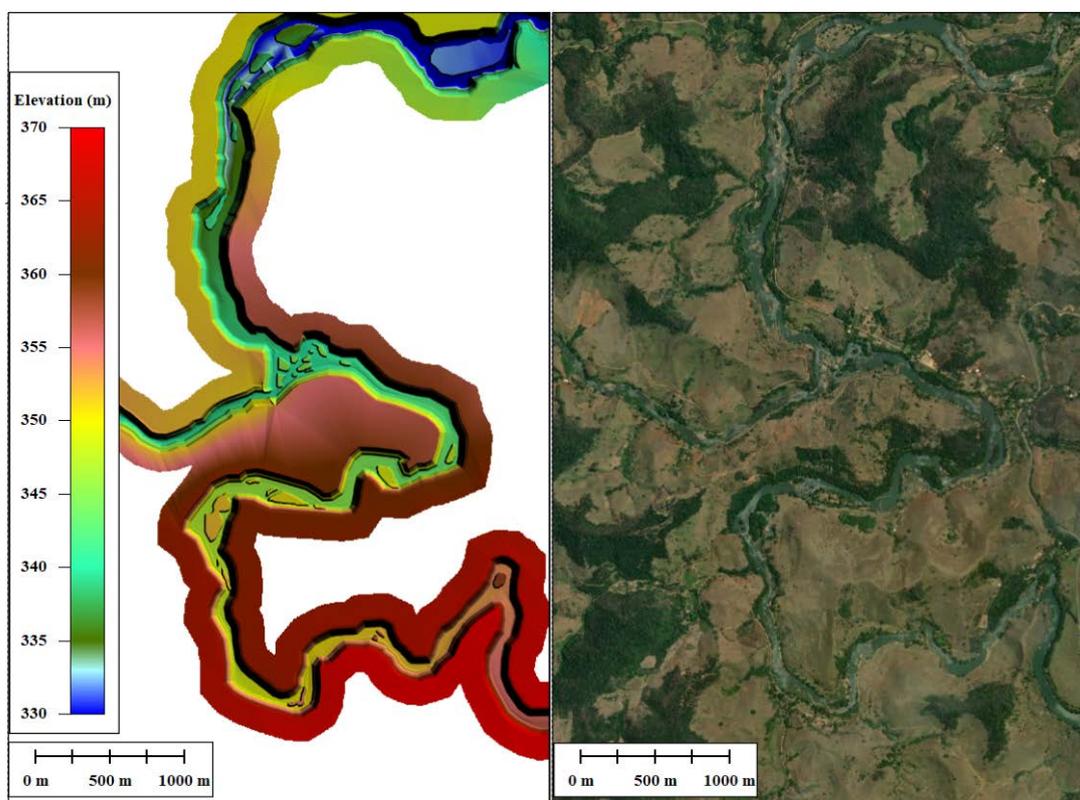


Figura 12 – MDE da confluência do rio do Carmo com o rio Piranga.

Simulação hidrodinâmica 2D

O programa utilizado para a simulação foi o HEC-RAS, que resolve as equações de conservação de massa e do momento usando um

esquema implícito de diferenças finitas desenvolvido por Holly & Preissmann (1977) e Chen & Falconer (1992).

Esse modelo é baseado na solução da equação

da energia, onde as perdas por atrito são avaliadas pela equação de Manning (USAGE, 2020) As equações bidimensionais podem ser obtidas das equações unidimensionais, integrando a vertical entre o fundo e a superfície,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad 1$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + u \frac{\partial uh}{\partial x} + v \frac{\partial uh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2}{h^{\frac{7}{3}}} |u|u + 2\omega \text{sen}\varphi h v + A_t \nabla^2 hu \quad 2$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + u \frac{\partial vh}{\partial x} + v \frac{\partial vh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2}{h^{\frac{7}{3}}} |v|v + 2\omega \text{sen}\varphi h u + A_t \nabla^2 hv \quad 3$$

Onde: h é a profundidade; u, v são as velocidades médias nas direções de x e y ; H é a elevação da água; ω é a velocidade angular da terra; φ é a latitude e; A_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta.

Os dados de entradas no programa HEC-RAS são os dados trabalhados anteriormente, que foram inseridos pelo editor de dados geométricos, para criar as mechas de 20 m por 20 m na calha principal e 50 m por 50 m na calha secundária. Foi feito um teste de refinamento da

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad 4$$

O coeficiente de viscosidade utilizado no modelo para calcular as tensões de Reynolds, que influenciam a dissipação e o transporte de energia cinética no escoamento, foi configurado com um valor constante de 1.0 m²/s. Esse valor foi definido devido ao tamanho da área e período simulado. Esse valor é indicado para escoamentos uniformes ou moderadamente turbulentos.

Os hidrogramas foram inseridos através de tabelas obtidas das estações de monitoramento e foi considerado o período de 01/01/2015 a 31/12/2020. Não foram inseridas as presenças de

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h C_{tk}}{\beta_{tk}} \right) + \nabla \cdot (h U C_{tk}) = \nabla \cdot (\epsilon_{tk} h \nabla C_{tk}) + E_{tk}^{HF} - D_{tk}^{HF} + S_{tk} \quad 5$$

Onde: C_{tk} é a carga total de concentração de sedimentos; β_{tk} é o fator de correção de carga total para a classe de grãos; U é a velocidade média em profundidade em m/s; h é a profundidade da água em m; ϵ_{tk} é o coeficiente de difusão (mistura) de carga total; E_{tk}^{HF} é a taxa de erosão de carga total; D_{tk}^{HF} é a taxa de deposição de carga total e; S_{tk} é o termo fonte/sumidouro de carga total.

Os dados de entrada são os dados da simulação hidrodinâmica 2D, além disso, são

considerando as direções cartesianas x e y . As equações 1, 2 e 3 são as soluções das equações das conservações de massa e do momento, em um plano paralelo ao fundo do canal (USAGE, 2020; Andrade, 2020).

malha empiricamente para avalia a precisão e estabilidade dos resultados, equilibrando precisão e custo computacional, com intuito de garantir resultados confiáveis e com eficiência.

Foram selecionados os valores de rugosidade de Manning para calha principal e secundária, conforme a proposta de Chow (1959) onde n é determinado pela caracterização física do canal, conforme equação 4. Para estipular os valores $n_0; n_1; n_2; n_3; n_4$ e m_5 foi usado a tabela do estudo Chow (1959).

estruturas hidráulicas (pontes) por não ser de interesse do estudo.

Simulação de transporte de sedimentos 2D

O modelo de transporte de sedimentos 2D do programa HEC -RAS resolve a Equação 5 de transporte de carga de material do leito, mas separa a carga de material do leito em carga de fundo e cargas suspensas com fórmulas empíricas. A Equação 5 é resolvida com um esquema implícito de volume finito na mesma malha do modelo hidrodinâmico 2D (Nelson et al., 2022; USAGE, 2022 e 2023).

inseridos os dados de sedimentos. A equação de transporte de sedimento aplicada na simulação foi a de Wu (2004) devido à profundidade dos rios. A equação de classificação do grão foi escolhida a de Copeland & Thomas (1989) devido à extensa capacidade de calcular o tamanho do grão. A equação de velocidade de queda escolhida foi de Wu & Wang (2006), que leva em consideração a forma da partícula. A granulometria foi inserida para cada curso d'água de acordo com os dados coletados pelo

levantamento de campo. A condição de contorno utilizada foi a de contorno carga de equilíbrio, pois os outros modos necessitam de dados adicionais, que não foram coletados.

Calibração e avaliação das simulações

O procedimento adotado para calibração das simulações hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos, foi feito empiricamente “por tentativa e erro”.

A calibração do modelo hidrodinâmico foi elaborada para encontrar o melhor ajuste entre o hidrograma simulado com o hidrograma da estação observada. Para calibração foram utilizados 2 períodos, um com evento extremo de cheia e o outro com vazões médias. A calibração foi feita no programa HEC-RAS, ajustando o

coeficiente de Manning para todas as secções, de 0,030 a 0,070.

Para selecionar o coeficiente de Manning, foi feita uma comparação dos hidrogramas simulados com o hidrograma medido, usando a estatística. A precisão da calibração foi avaliada utilizando o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), uma estatística normalizada que compara a variância residual de um modelo hidrológico com a variância dos dados observados, conforme proposto por Nash & Sutcliffe (1970). O NSE é amplamente empregado para medir a precisão das simulações de vazão em relação aos valores observados. A fórmula do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é expressa como (Equação 6):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_o^t - \underline{Q_o^t})^2} \quad 6$$

Onde Q_o^t representa a vazão observada no tempo (t); Q_m^t representa a vazão simulada pelo modelo no tempo (t); $\underline{Q_o^t}$ é a média das vazões observadas e; n é o número total de observações.

O valor do NSE varia de $-\infty$ a 1, onde um valor de 1 indica uma correspondência perfeita entre as vazões simuladas e observadas, enquanto valores próximos de zero ou negativos sugerem que o modelo não é eficaz na representação das condições observadas.

A calibração do modelo de transporte de sedimento 2D é essencial para garantir que os resultados simulados representem adequadamente os processos físicos observados no campo. A calibração morfológica foi feita ajustando a função de transporte e método de velocidade no programa HEC-RAS.

A função de transporte, descreve a taxa na qual os sedimentos são transportados ao longo do canal. Essa equação leva em consideração diversos fatores, como a características do fluxo (velocidade da água, profundidade e gradiente de energia), propriedades dos sedimentos (diâmetro das partículas e densidade), e condições do leito (rugosidade).

O método de velocidade calcula a velocidade da água utilizada na equação de transporte de sedimentos. Essa velocidade pode ser a média da seção transversal do canal, a velocidade próxima ao leito do rio, ou a velocidade que mais influencia o transporte de sedimentos de fundo.

Além disso foi feita a comparação das imagens obtidas de satélite, com as imagens geradas pela simulação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração, ajustes e avaliação do modelo hidrodinâmico 2D

Inicialmente, foram feitas simulações para todos os coeficientes de Manning escolhidos. Os hidrogramas simulados resultantes foram comparados com os dados observados da estação fluviométrica E4 - Rio Doce, durante os eventos escolhidos.

Após rodada de simulação o comportamento estatístico do modelo era avaliado através do coeficiente de eficiência de NSE (Nash & Sutcliffe, 1970).

O coeficiente de NSE é um dos mais

importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos, isto porque o valor do NSE é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, ou seja, quão mais próximo de um ajuste perfeito o NSE estiver (próximo de 1) significa que o modelo apresenta bons ajustes para as cheias (Moriassi et al., 2007).

O coeficiente de Manning que apresentou o NSE mais próximo de 1, foi de 0,045 para a calha principal com 0,81, e 0,12 para calha secundária com o 0,76. Os valores de 0,81 e 0,76, indicam que o modelo tem boa precisão em relação aos dados observados, com pouca variação.

Tabela 1 - Coeficientes de desempenho NSE para cada coeficientes de Manning.

Calha Principal		Calha Secundária	
Coeficientes de Manning (n)	NSE	Coeficientes de Manning (n)	NSE
0,065	0,71	0,09	0,60
0,055	0,76	0,10	0,71
0,045	0,81	0,11	0,74
0,035	0,77	0,12	0,76

No caso específico do Rio Doce, estudos têm sido realizados para determinar os valores apropriados do coeficiente de Manning (Teixeira et al, 2024 e Marciano et al, 2024), dada a variabilidade de suas características ao longo de sua extensão. Estes estudos destacam que a escolha do valor adequado do coeficiente de Manning é complexa devido aos diversos fatores que afetam esse coeficiente em cursos d'água naturais. Valores de 0,045 é típico de rios com fundo relativamente regular e pouca vegetação nas margens, representa condições onde o leito do rio possui material como cascalho fino ou areia grossa, com poucas obstruções ao fluxo. E valores de 0,12 é significativamente mais alto e geralmente associado a rios com leitos muito irregulares, presença abundante de vegetação aquática ou detritos, e margens densamente vegetadas, tais condições aumentam a resistência ao fluxo, resultando em velocidades menores da água.

A determinação precisa do coeficiente de Manning para o Rio Doce requer uma análise detalhada das condições locais, incluindo a composição do leito, a presença de vegetação e a morfologia do canal. Estudos específicos, como o mencionado anteriormente, são essenciais para fornecer valores mais precisos do coeficiente de

Manning, permitindo uma modelagem hidráulica mais confiável e eficaz.

A figura 13 mostra a comparação dos hidrogramas, simulado e observado, pela estação de monitoramento E4 – rio Doce. O hidrograma simulado apresenta diferenças em relação ao hidrograma observado devido a múltiplos fatores relacionados à entrada de dados, limitações do modelo e incertezas inerentes ao processo de simulação hidrodinâmica. Entre as principais causas identificadas está a ampla extensão da área de estudo, que abrange mais de 848 km². Essa causa identificada amplia a complexidade da modelagem, aumentando as incertezas.

Além dessas causas, há outras inerentes ao programa HEC-RAS, que é definição do hidrogramas de entrada e o parâmetro hidráulicos. A precisão na definição dos hidrogramas de entrada, especialmente nas condições de montante, é crucial, pois existe incertezas e simplificações nos dados de entradas, que podem levar a discrepâncias significativas entre os hidrogramas simulados e observados. E os parâmetros hidráulicos, que são os coeficientes de rugosidade podem influenciar diretamente a propagação do fluxo no modelo, valores inadequados desses parâmetros podem resultar em diferenças notáveis entre as simulações e as observações.

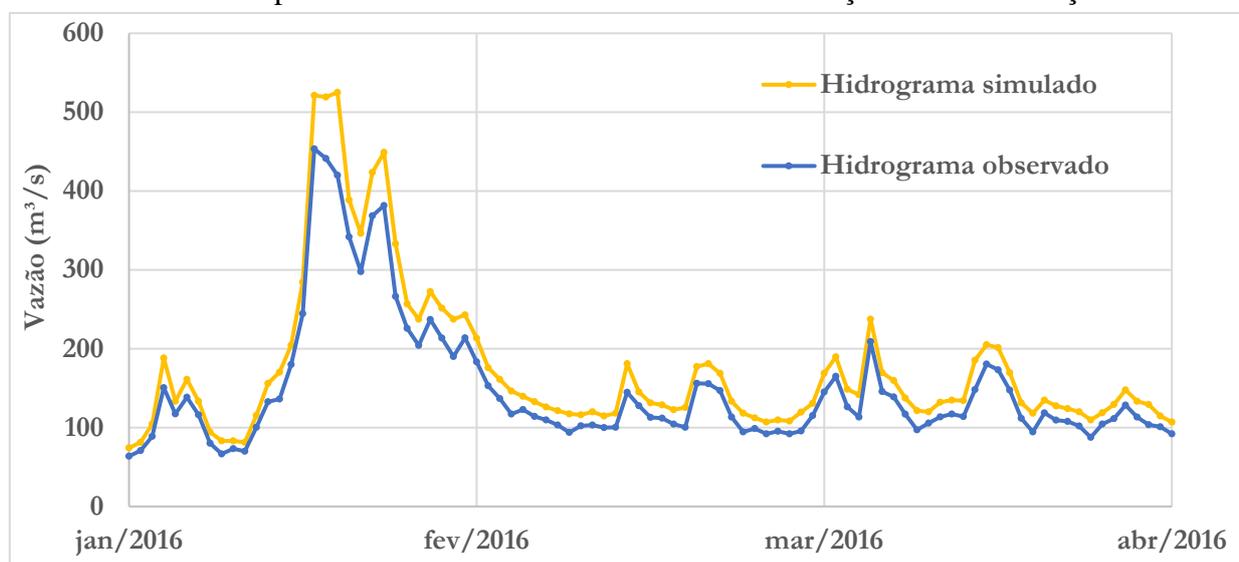


Figura 13 – Comparação dos hidrogramas, simulado e observado, pela estação de monitoramento E4 -rio Doce.

A figura 13 mostra que houve uma subestimação sistemática do modelo, apresentando uma tendência em subestimar as vazões, que em média foi de 15% entre vazão observada para a vazão simulada. Em relação ao volume total do evento, observou-se uma diferença média de 12% entre os valores simulados e os observados. Essa discrepância é evidenciada pelo hidrograma (Figura 13), no qual a linha correspondente à simulação (amarela) permanece acima da linha do hidrograma observado (azul) ao longo de todo o período analisado

Apesar dessas limitações e diferenças, a avaliação do modelo foi considerada satisfatória, uma vez que os resultados obtidos foram considerados coerentes com os padrões do hidrograma. Esse reconhecimento enfatiza a importância da calibração e validação cuidadosas, bem como do uso de metodologias complementares para reduzir os efeitos das incertezas e melhorar a representatividade dos resultados

Calibração, ajustes e avaliação do modelo de transporte de sedimentos 2D

Além de fazer a calibração do modelo por meio do coeficiente de Manning, foi ajustando a função de transporte e o método de velocidade. A função de transporte escolhida foi as equações: de Ackers & White (1973), que é adequada a diversos tamanhos de partículas, e que utiliza variáveis hidráulicas, como profundidade e velocidade, para prever o transporte. Vale ressaltar que outros autores, como Carvalho (2012) e Brunne & Ras (2016) aplicaram essas equações em outros estudos.

As equações de Ackers & White (1973) foram desenvolvidas com base em um extenso conjunto de dados experimentais e fundamentam-se em princípios físicos e empíricos do transporte de sedimentos em canais naturais. Diferentemente de outras equações que assumem um comportamento fixo para o transporte sedimentar, o modelo proposto por Ackers & White (1973) incorpora a influência do diâmetro dos sedimentos e do regime de escoamento (laminar, transicional ou turbulento), conferindo-lhe maior flexibilidade para a modelagem de diferentes condições de fluxo. Além disso, essa abordagem se mostra particularmente eficaz para sedimentos de granulometria fina a média em cenários de escoamento moderado a intenso, tornando-se mais representativa para a área analisada neste estudo.

Para o método de velocidade, foram avaliados

todos os métodos disponíveis para o cálculo da velocidade de queda das partículas, sendo selecionado o método proposto por Wu & Wang (2006). Este método considera a forma das partículas sedimentares, demonstrando melhor desempenho na representação da velocidade de queda dos sedimentos analisados.

O método de Wu & Wang (2006) combina formulações físicas e dados experimentais para modelar o transporte de sedimentos de maneira mais realista, considerando tanto a carga de fundo quanto a carga em suspensão. Dessa forma, proporciona uma abordagem mais abrangente do processo de transporte sedimentar. Diferentemente de métodos mais simplificados, esse modelo incorpora diretamente a influência da velocidade do fluxo na mobilização e no transporte de sedimentos, aprimorando a precisão da modelagem em cenários nos quais a variação da velocidade desempenha um papel determinante na erosão e deposição sedimentar. Além disso, o método é capaz de representar uma ampla gama de tamanhos de partículas, desde sedimentos finos até materiais mais grossos, conferindo-lhe maior flexibilidade e tornando-o particularmente adequado para ambientes fluviais heterogêneos, como a área analisada neste estudo.

De acordo com a calibração do modelo de transporte de sedimento 2D, a avaliação e a validação dos resultados obtidos, foi feito com foco em compreender os efeitos do transporte de sedimentos nas confluências. Devido há algumas incertezas, como a propriedades dos sedimentos, topografia, batimetria, imprecisão numéricas das equações, dentre outras.

As incertezas na simulação do transporte de sedimentos podem comprometer a precisão dos resultados, sendo fundamental reconhecê-las e avaliá-las adequadamente. A variabilidade na distribuição do tamanho dos sedimentos no leito do rio pode não ser completamente representada devido às limitações na amostragem. A precisão dos dados hidrológicos, como vazões e hidrogramas, é essencial para a modelagem, pois erros nesses parâmetros podem se propagar ao longo da simulação. Além disso, a topografia do canal fluvial sofre alterações ao longo do tempo devido a processos de erosão e deposição, tornando-se um fator crítico caso os dados utilizados estejam desatualizados ou imprecisos.

A seleção da equação de transporte sedimentar representa outro desafio, uma vez que cada formulação possui suposições e limitações

específicas, e nenhuma equação é universalmente aplicável a todas as condições. Os processos de erosão e deposição são altamente complexos e influenciados por diversos fatores, como vegetação, geologia e ações antrópicas, dificultando sua representação precisa no modelo. Por fim, a calibração e validação do modelo são etapas essenciais para garantir a confiabilidade dos resultados, porém, a escassez de dados de campo adequados pode limitar a eficácia desse processo.

Esse estudo se conteve na utilização de análise visual para comparação entre a mancha observada e as manchas obtidas a partir das simulações. O motivo dessa escolha é a falta de informações de velocidade e de profundidade durante o evento simulado. Em concordância com Rocha (2015), a análise visual representa uma ferramenta importante e é de difícil aplicação, o que resulta em avaliações subjetivas do desempenho do modelo.

Diante da dificuldade na análise visual, verificou-se que ambas as manchas estavam corretamente georreferenciadas no mesmo sistema de coordenadas. Para fazer a sobreposição das

manchas simuladas e observadas, utilizando um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG), possibilitando uma comparação espacial mais precisa. Além disso, foram realizadas a identificação e a avaliação dos padrões observados nas imagens, permitindo uma análise mais detalhada das discrepâncias entre as imagens.

A análise da simulação de transporte de sedimento 2D foi realizada por meio da comparação de imagens, para avaliar qualitativamente os padrões de concentração e a deposição de sedimentos simulados no dia 11 de novembro de 2015. A figura 14 mostra a comparação da área da confluência, sete dias depois do desastre de Mariana – MG. A análise da imagem de satélite evidencia a permanência de rejeitos nos cursos d'água após o desastre, conforme indicado pela coloração amarronzada observada no leito dos rios na região de confluência na imagem (A). A imagem (B) apresenta os resultados da simulação, demonstrando a distribuição da concentração de sedimentos, conforme indicado pela escala lateral, permitindo a comparação entre os dados observacionais e os resultados simulados.

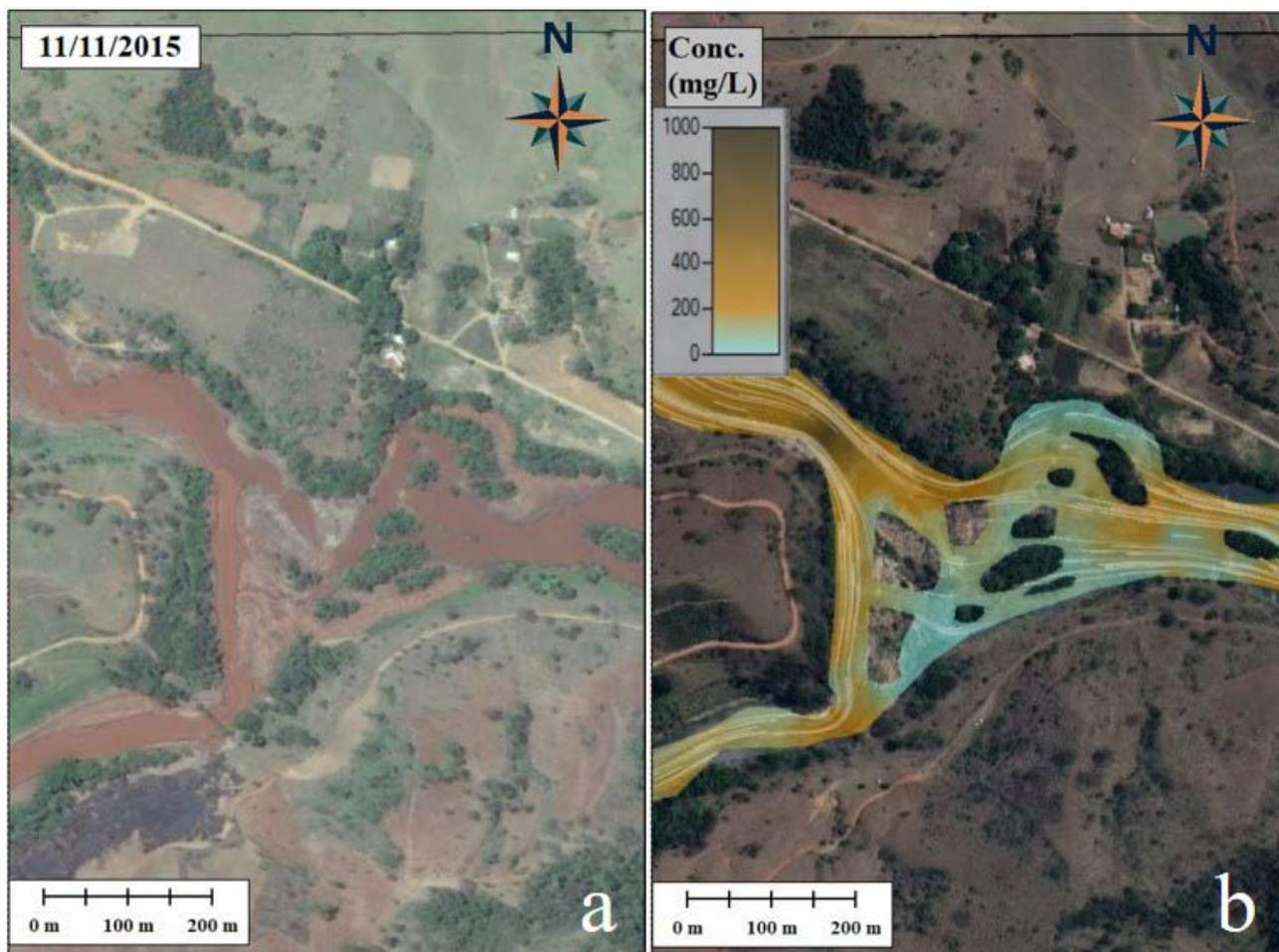


Figura 14 – Imagem área do dia 11/11/2015 (a) e imagem do resultado da simulação do transporte de sedimento 2D (b) da confluência do rio do Carmo com o rio Piranga.

A simulação reproduziu o padrão de concentração de sedimento na lateral e o campo de fluxo. Na confluência do rio do Carmo com o rio Piranga, as ilhas interferiram no escoamento da confluência. Nos locais que tem fluxo rápido, houve maior concentração de sedimentos e nos locais com fluxo lento, menos concentração de sedimentos. As comparações das imagens de satélite com as imagens da simulação mostraram algumas semelhanças no trajeto do sedimento no desastre de Mariana- MG.

Simulação hidrodinâmica 2D

Na confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo houve um represamento das águas do rio do Carmo, mesmo o rio Gualaxo do Norte tendo uma vazão menor. apesar da menor vazão do rio Gualaxo, sua maior velocidade foi suficiente para gerar um represamento temporário do rio do Carmo. Esse comportamento pode ser explicado pelas propriedades hidrodinâmicas

(Tucci, 2007 e Andrade et al., 2019).

No desastre de Mariana, a elevada velocidade das águas carregadas de rejeitos do rio Gualaxo provocou o desvio do curso natural do rio do Carmo, alterando sua dinâmica e ampliando a área inundada.

Best (1988) e Kleinhans (2010) analisam o comportamento das confluências, demonstrando que a interação entre rios com características hidrodinâmicas distintas (como velocidade, vazão e carga de sedimentos) pode levar a represamentos temporários, mudanças na morfologia fluvial e no padrão de fluxo.

Esses estudos também destacam que rios com maior velocidade têm maior capacidade de adentrar no curso do rio com menor energia, mesmo que apresentem um menor volume de água. A figura 15 mostra a velocidade do escoamento dos rios e a área inundada no desastre de Mariana – MG.

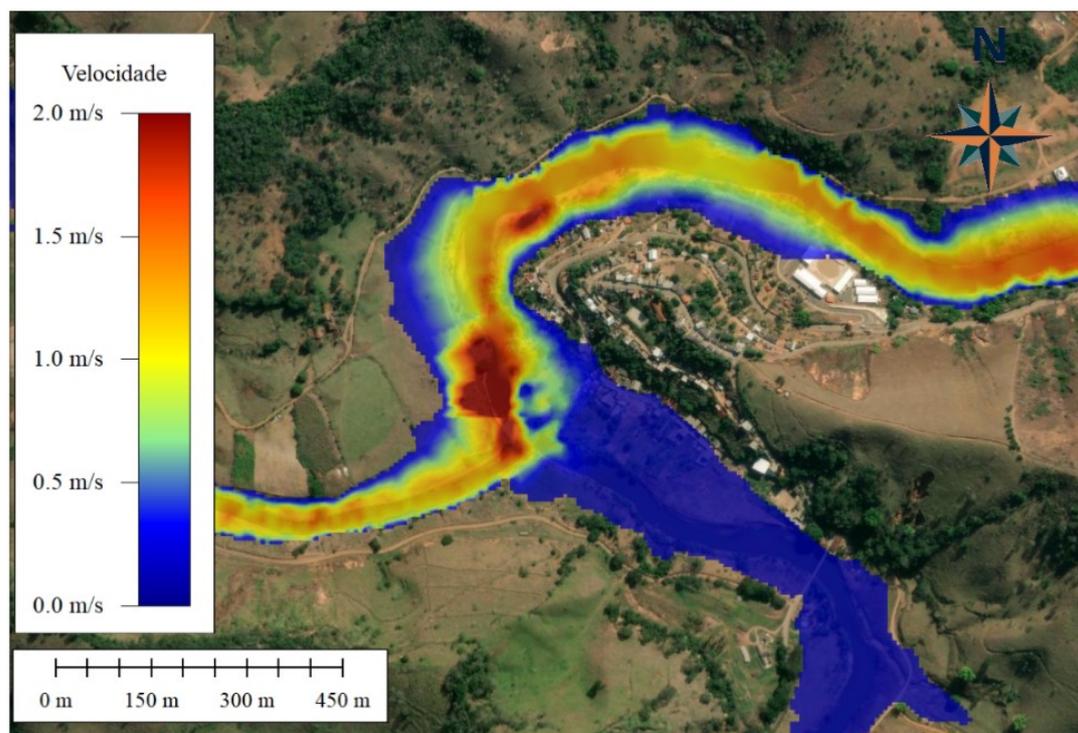


Figura 15 – Área inundada do desastre de Mariana – MG na confluência do rio Gualaxo com o rio do Carmo.

Na confluência do rio do Carmo com o rio Piranga, as ilhas servem com obstáculos para as águas do rio do Carmo. Essas ilhas atuaram como barreiras naturais, alterando os fluxos dos rios e promovendo o represamento temporário das águas do rio Piranga, enquanto as águas do rio do Carmo foram direcionadas para o lado esquerdo, aumentando sua velocidade e intensidade. Grande parte das águas do rio do Carmo são escoadas pela esquerda, fazendo a velocidade aumentar, enquanto as águas do rio Piranga são forçadas a

escoar pelo lado direito.

Pereira (2022) e Bezerra et al. (2021) discutem como a presença de ilhas fluviais e barreiras naturais pode intensificar as diferenças de velocidade e direção do fluxo em confluências. Essas barreiras forçam os rios a se dividirem desigualmente, levando a represamentos temporários, erosão localizada e inundações de áreas adjacentes, como ocorreu nas ilhas do rio Piranga.

Best (1988) e Richardson & Thorne (2001) abordam a complexidade hidrodinâmica em

confluências, destacando o papel das barreiras geomorfológicas, como ilhas e bancos de sedimentos, na redistribuição dos fluxos.

Esses estudos mostram que as diferenças de energia e direção dos rios em confluência são intensificadas por tais obstáculos, o que pode levar ao represamento de um dos rios e à inundação de áreas vulneráveis.

Além disso, trabalho como o de Kleinhans (2010) enfatiza que o represamento em confluências ocorre, muitas vezes, devido ao contraste entre fluxos de alta velocidade (com maior energia cinética) e fluxos mais lentos, como foi o caso do rio do Carmo e do rio Piranga.

No desastre de Mariana – MG, a carga de rejeitos transportada pelas águas do rio do Carmo aumentou sua densidade e velocidade, exacerbando o impacto na confluência com o rio Piranga. As ilhas, que já atuavam como barreiras naturais, intensificaram o represamento, forçando o escoamento desigual e contribuindo para a inundação de áreas adjacentes. Esse comportamento reflete a dinâmica descrita acima, evidenciando que elementos geomorfológicos desempenham um papel crucial na redistribuição de fluxos

durante eventos extremos.

Assim, a situação observada no rio do Carmo e no rio Piranga reforça o conhecimento existente sobre a interação de fluxos fluviais em confluências com barreiras naturais, destacando a relevância de considerar esses fatores em estudos de impacto ambiental e planejamento de mitigação. O modelo hidrodinâmico 2D do programa HEC-RAS foi eficiente para a simulação de áreas inundadas, com hidrogramas observados e simulados apresentando alta semelhança. Isso valida o uso desse modelo em estudos semelhantes, especialmente em situações de desastres ambientais.

Os estudos de Machado (2017) e Almeida (2019) simularam a propagação da onda de enchente causada da ruptura da barragem do Fundão até a proximidade do km 10 do desastre. Este estudo, é uma continuação da simulação hidrodinâmica, que se inicia nas proximidades da confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo até o reservatório Risoleta Neves.

A figura 16 mostra a velocidade do escoamento na confluência do rio do Carmo com o rio Piranga.

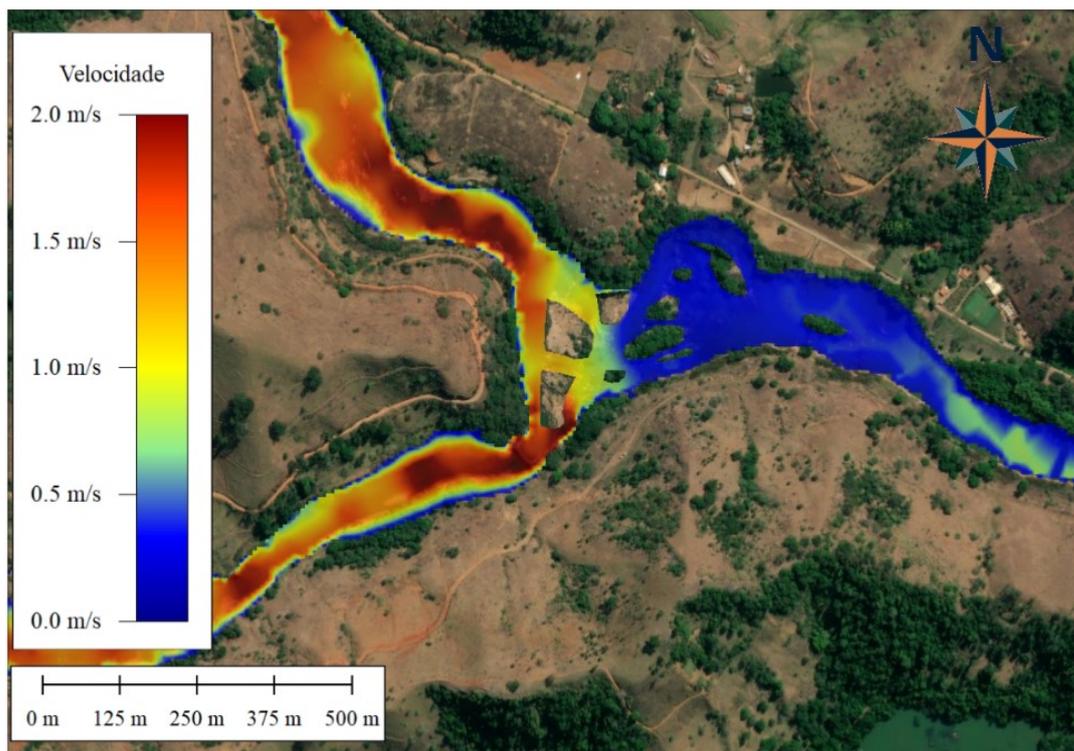


Figura 16 – Área inundada do desastre de Mariana – MG, na confluência do rio do Carmo com o rio Piranga.

O resultado da simulação mostrou a área inundada do desastre de Mariana – MG até o reservatório Risoleta Neves. No reservatório a inundação se torna diferente, pois as características físicas do terreno mudam bruscamente, o escoamento deixa de ser rápido e passa a ser

lento. De acordo com a simulação, o volume remanescente do desastre poderia ter sido detido pela barragem, uma vez que a capacidade da barragem comportaria o volume de 12 milhões de metros cúbicos remanescente do desastre de Mariana – MG. No entanto, devido às incertezas

de eventos anômalos e emergenciais, o armazenamento da lama acarretaria grandes prejuízos econômico e ambiental, podendo até encerrar a

atividade da barragem. A figura 17 mostra a área inundada pelo desastre no reservatório Risoleta Neves.



Figura 17 – Área de inundação do desastre de Mariana – MG, no reservatório Risoleta Neves.

Estudos como o de Pereira et al. (2019) abordam como as barragens de rejeitos em mineração desempenham um papel crucial na retenção de resíduos e controle de fluxos em caso de desastres. Contudo, esses estudos também alertam para os riscos associados ao armazenamento excessivo de sedimentos e o impacto ambiental resultante da retenção de grandes volumes de rejeitos. A possibilidade de deter os impactos a jusante através do armazenamento na barragem é uma solução comum, mas com consequências negativas, como a contaminação e sedimentação excessiva nos reservatórios, o que pode comprometer a vida útil da barragem e prejudicar a biodiversidade local.

Estudos como o de Zhao et al. (2017) e Zhang et al. (2018) demonstram que barragens de rejeitos têm o potencial de armazenar grandes volumes de sedimentos, mas a retenção de material como lama pode reduzir a capacidade do reservatório e alterar os ecossistemas aquáticos de maneira irreversível. A retenção desses sedimentos também pode gerar efeitos adversos a jusante, como o assoreamento de rios e a contaminação da água, comprometendo a qualidade da água para consumo humano e a biodiversidade local.

A liberação de comportas em situações de emergência, como o ocorrido no desastre de Mariana, é uma prática comum para evitar a sobrecarga do reservatório, mas deve ser cuidadosamente planejada, pois a liberação súbita de

grandes volumes de rejeitos pode causar inundações severas e danos a ecossistemas ribeirinhos. Kjeldsen et al. (2014) discutem que, em situações extremas, uma abordagem mais controlada e planejada poderia reduzir os impactos negativos a jusante, ao mesmo tempo em que se evitam danos irreversíveis à estrutura da barragem.

O uso da barragem como mecanismo de contenção pode ser uma solução de curto prazo para reduzir os impactos do desastre, mas apresenta grandes desafios a longo prazo. A simulação aplicada ao desastre de Mariana – MG contribui para compreender essas dinâmicas, reforçar a importância de considerar os impactos ambientais e econômicos ao avaliar estratégias de gestão de barragens de rejeitos.

Simulação transporte de sedimentos 2D

Após a simulação hidrodinâmica 2D, foi feita a inserção de dados de sedimentos no programa HEC-RAS. A granulometria foi inserida de acordo com o processamento dos dados levantados em campo.

A figura 18 apresenta distribuição granulométrica. O Rio Gualaxo do Norte mostra uma distribuição de partículas mais variadas, com uma quantidade significativa de partículas maiores, que pode ser resultante do desastre de Mariana – MG.

O rio Piranga tem uma distribuição de sedimentos com uma tendência a partículas menores, indicando que os sedimentos são predominan-

temente finos. O rio do Carmo apresenta uma distribuição similar ao Rio Piranga, mas com partículas levemente maiores. O Rio Doce apresenta uma distribuição de partículas mais homogênea, com partículas que variam consideravelmente em tamanho.

Estudos como os de Lima et al. (2006) e Ferreira et al. (2010) sugerem que a distribuição granulométrica dos sedimentos fluviais pode ser influenciada por diversos fatores, como a topografia, a geologia da bacia hidrográfica, a dinâmica do escoamento e as características de erosão e deposição nos rios. De acordo com essas análises, rios com maior dinâmica de erosão, como o rio

Piranga, tendem a transportar sedimentos mais finos, enquanto rios com menos turbulência ou mais processos de deposição, como o rio Gualaxo do Norte, podem ter uma maior proporção de partículas maiores (Figura 18).

Bunte & Abt (2001) e Kondolf (2000) afirmam que os sedimentos mais finos, como os observados no rio Piranga, podem ser transportados por longas distâncias, enquanto os sedimentos mais grossos, como os encontrados no rio Gualaxo do Norte, tendem a se depositar em zonas de baixa energia, como nas confluências ou em áreas com vazões mais lentas (Figura 18).

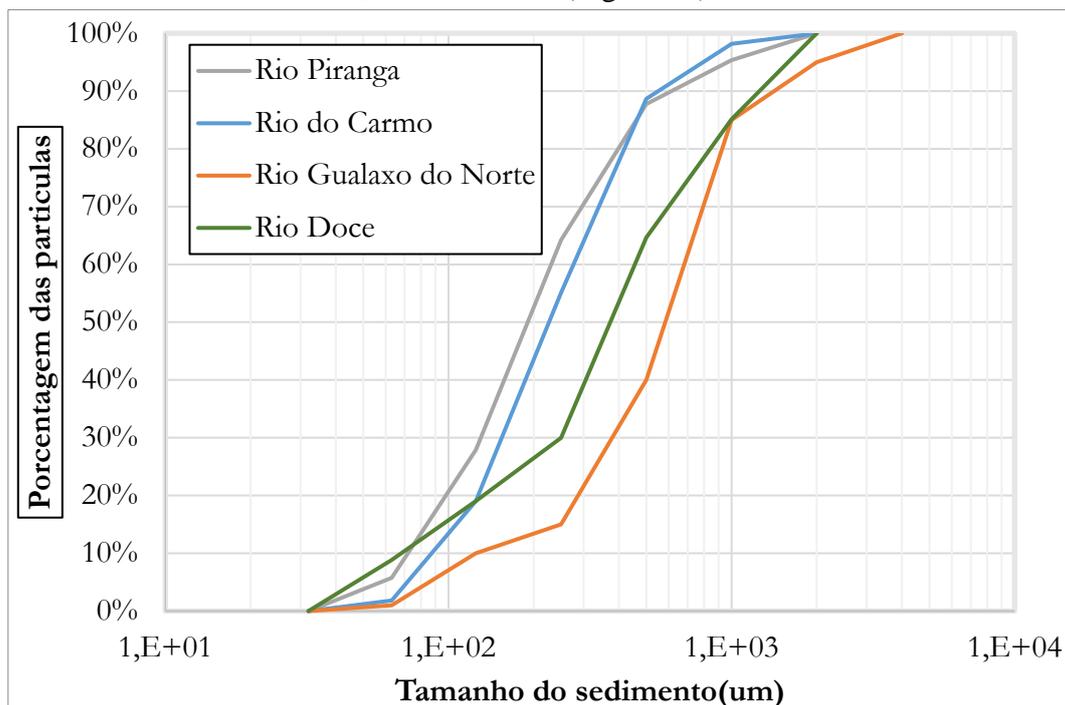


Figura 18 – Distribuição granulométrica dos rios

O resultado da simulação de transporte de sedimentos, mapeou a deposição e a erosão na confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo, revela importantes dinâmicas de sedimentos entre os dois rios. A figura 19 mostra os locais onde ocorreram deposição e erosão de sedimentos. A deposição no rio Gualaxo do Norte, devido à menor granulometria das partículas em comparação com o rio do Carmo, segue um padrão típico de rios com dinâmica mais lenta. A erosão observada no rio Gualaxo do Norte e a deposição após a confluência são consistentes com processos naturais de transporte de sedimentos em ambientes fluviais.

Ferreira & Araujo (2014) e Paula et al. (2020) destacam que em áreas com confluências de rios, a diferença na velocidade do escoamento e na granulometria pode gerar zonas de deposição

onde as águas mais lentas favorecem o acúmulo de sedimentos finos, como ocorre no caso do rio Gualaxo do Norte.

A deposição média de 0.70 m ao longo de 5 anos está de acordo com as observações feitas por Júnior & Barros (2020) em regiões do estado de Minas Gerais, onde processos de sedimentação são mais pronunciados em zonas de baixa energia hidrodinâmica, como confluências e áreas de alargamento de canais (Figura 19).

Por outro lado, a erosão de 0.60 m no rio Gualaxo do Norte é um indicativo da alta energia do escoamento, especialmente em rios com maior dinâmica de fluxo, como observado por Silva (2012), reportam erosões significativas em rios com velocidade de escoamento elevada, o que favorece o transporte de partículas maiores (Figura 19).

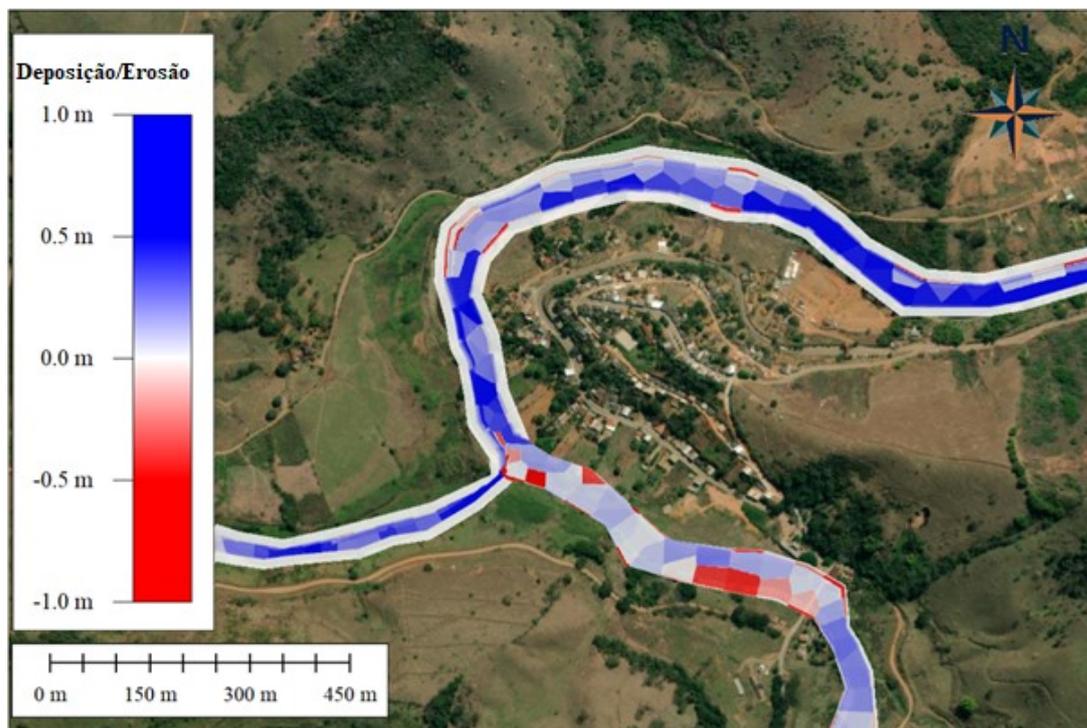


Figura 19 – Área de deposição e de erosão de sedimentos na confluência do rio Gualaxo do Norte com rio do Carmo.

Bunte & Abt (2001) abordam fenômenos semelhantes em rios com confluências. A deposição de sedimentos em áreas de baixa velocidade de fluxo, como a observada no rio Gualaxo do Norte, é um processo amplamente documentado, com estudos indicando que, em tais ambientes, partículas finas tendem a ser depositadas mais rapidamente após a mistura com águas mais lentas de um tributário.

Williams & Wolman (1984) também descrevem como a granulometria das partículas influencia diretamente a dinâmica de erosão e deposição, com partículas finas sendo mais suscetíveis a se depositar em áreas de baixa energia (Figura 19).

A figura 20 mostra os locais onde houve deposição e erosão de sedimentos na confluência do rio do Carmo com o rio Piranga. A simulação mostra que a deposição de sedimento acontece no rio Piranga, possivelmente por causa das ilhas que interferem no escoamento. A erosão que ocorre no rio do Carmo, pode estar associada a declividade alta nesse trecho.

Souza et al. (2017), identificaram padrões semelhantes em confluências fluviais, destacando que a deposição ocorre em locais onde o fluxo é obstruído por obstáculos naturais, como ilhas, ou quando há diminuição da velocidade do escoamento. A deposição observada no rio Piranga devido às ilhas é corroborada por Araujo et al. (2015), que apontam que essas feições geomorfológicas reduzem a capacidade de

transporte de sedimentos (Figura 20).

A erosão observada no rio do Carmo (Figura 20), possivelmente associada à alta declividade, também é consistente como o estudo de Freitas et al. (2019), que relacionam a declividade acentuada ao aumento das forças erosivas no leito do rio, especialmente em trechos montanhosos.

Estudos como os de Best (1988) sobre confluências fluviais mostram que a deposição em zonas de fluxo divergente (como o espraiamento no rio Doce) é comum, especialmente quando o canal principal aumenta sua área molhada, resultando em menor velocidade e maior deposição. Mosley (1976) descreve que a presença de ilhas em confluências cria zonas de fluxo divergente e convergente que intensificam a deposição em algumas áreas e a erosão em outras, dependendo da dinâmica local de velocidade e turbulência. Esses processos são similares aos observados no trecho da confluência do rio do Carmo com o rio Piranga (Figura 20).

A deposição média de 1,10 m em cinco anos também está de acordo com valores médios relatados por Syvitski & Saito (2007) em regiões onde ocorre redução significativa da velocidade de escoamento em rios sedimentares (Figura 20).

O estudo possui uma concordância com a pesquisa de Palu & Julien (2019), de que os parâmetros de sedimentos influenciaram significativamente no volume de sedimentos mobilizados no reservatório Risoleta Neves. No estudo de

Palu & Julien (2019), a deposição de sedimentos foi o que gerou alterações na topografia do reservatório Risoleta Neves. Foi calculado que o

volume confinado pelas barragens Risoleta Neves foi de 7 hm³, causando uma perda de 17 % do volume total do reservatório.

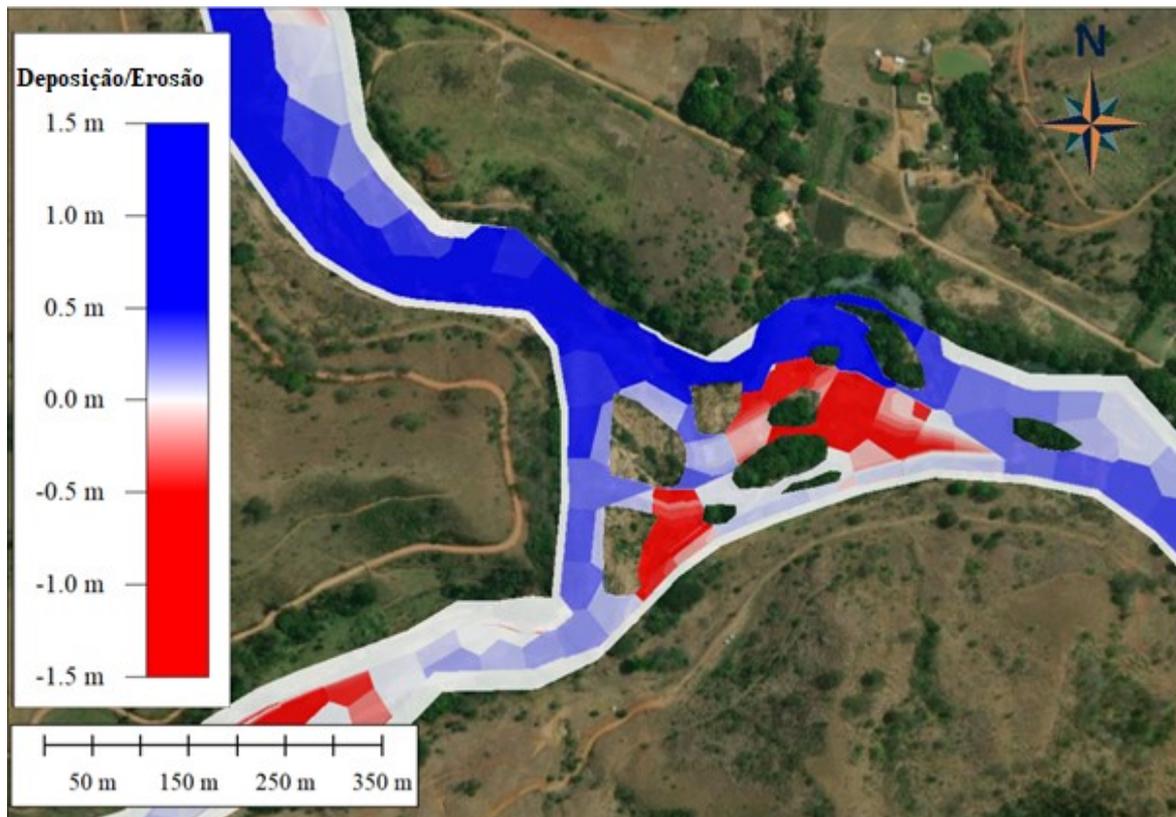


Figura 20 – Área de deposição e de erosão de sedimentos na confluência do rio do Carmo com rio do Piranga.

Enquanto esse trabalho calculou que o volume confinado pela barragem foi 5 hm³, causando uma perda 12% ao longo de 1 ano. Essa diferença entre os cálculos pode estar associada à metodologia, enquanto os cálculos de Palu & Julien (2019) foram feitos por modelos unidimensional e os deste trabalho foram feitos por modelos bidimensionais.

Pode haver ainda outras divergências, como a área e a topografia utilizada na simulação. A figura 21 mostra a erosão e a deposição de sedimentos calculada após 1 ano do desastre de Mariana – MG, no reservatório Risoleta Neves.

Estudos de Syvitski et al. (2005) demonstraram que a deposição de sedimentos em reservatórios após desastres ambientais pode levar a perdas de capacidade de armazenamento na ordem de 10-20% em curtos períodos de tempo, dependendo da magnitude do evento, das características do reservatório e da modelagem utilizada. A variação de 12% a 17% observada nos estudos comparados reflete as condições específicas do desastre de Mariana (Figura 21).

A aplicação do modelo de transporte de sedimento 2D, embora recente, mostrou-se promissora, confirmando sua utilidade em larga

escala e sua praticidade em relação a outros modelos, conforme discutido por Rahul & Sharma (2023).

O modelo do programa HEC-RAS, em comparação com outros programas de simulação de transporte de sedimentos bidimensionais, destaca-se pela sua integração com a modelagem hidrodinâmica e pela flexibilidade na escolha das equações de transporte. Essas características tornam o programa HEC-RAS uma ferramenta acessível e eficiente para simulações de transporte de sedimentos bidimensionais. Por fim, o programa HEC-RAS é disponibilizado de forma gratuita, o que o torna uma opção de custo-benefício significativo para a realização de simulações de transporte de sedimentos.

No Brasil, estudos de modelagem de sedimentos ainda são amplamente baseados em modelos 1D, devido à complexidade dos modelos 2D e à dificuldade em obter dados de alta resolução.

Trabalhos como o de Mantovani et al. (2018) e Costa (2019) demonstraram que, apesar das limitações topobatimétricas, modelos numéricos podem ser úteis para identificar padrões de transporte, erosão e deposição de sedimentos.

mentos, a precisão dos dados hidrológicos, os detalhes da topografia do canal fluvial e a seleção da equação de transporte sedimentar. Esses fatores influenciam diretamente a calibração e validação do modelo, reduzindo a confiabilidade dos resultados.

No entanto, apesar da escassez de dados de campo, este estudo não se limita por essa restrição, pois apresenta uma nova abordagem metodológica para a modelagem do transporte de sedimentos bidimensional, contribuindo para o avanço das pesquisas nessa área.

A simulação hidrodinâmica 2D se mostrou eficiente. Os hidrogramas, simulado e observado, foram bem semelhantes. A área inundada pelo desastre de Mariana – MG foi bem parecida a encontrada na literatura e pelas imagens de satélite. O estudo insinua que a barragem de Risoleta Neves poderia ter comportado os rejeitos do desastre de Mariana se as comportas estivessem fechadas, oferecendo *insights* importantes para a gestão de barragens e prevenção de futuros desastres.

A simulação de transporte de sedimento 2D é recente no programa HEC-RAS. Existem poucos trabalhos onde utilizaram essa tecnologia. Essa Simulação é fácil de trabalhar quando comparado com outros modelos, pois possui ferramentas descomplicada e práticas.

A simulação de transporte de sedimento 2D na área de estudo foi concluída com sucesso, porém o tempo de processamento foi longo devido ao tamanho da área de estudo e da quantidade de mechas criadas para os cálculos da simulação.

Além disso, mostrou que as confluências exercem uma importante função na recuperação do rio Doce. Principalmente o rio do Carmo, que exerce uma função de mistura e diluição dos sedimentos transportados pelo rio Gualaxo do Norte.

Em escoamento rápido ocorre maior erosão e no escoamento lento ocorre a deposição de sedimentos. Em algumas áreas ocorreram erosão de 1 m, mas isso não pôde ser validado pela falta de dados topobatimétricos.

As confluências desse estudo desempenham um papel importante na sua recuperação do rio Doce, especialmente considerando o impacto ambiental causado pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), em 2015. Esses rios contribuem para a recuperação do rio Doce, com diluição de poluentes e equilíbrio no transporte de sedimentos, reduzindo concentrações

excessivas de partículas e contaminantes provenientes do rompimento da barragem.

Sugere-se que estudos futuros realizem um acompanhamento de médio e longo prazo das seções topobatimétricas onde estão localizadas as estações de monitoramento. Esse acompanhamento é fundamental para a avaliação da evolução morfológica dos cursos d'água e para a calibração de modelos hidrossedimentológicos.

O monitoramento contínuo permitirá a identificação de mudanças na largura e na profundidade da seção transversal, resultantes de processos de erosão e deposição, além de possibilitar a análise do deslocamento das margens devido à erosão lateral. A observação das modificações no perfil longitudinal do rio contribuirá para a compreensão da dinâmica sedimentar e da estabilidade do canal ao longo do tempo.

Recomenda-se a realização de simulações de transporte de sedimentos em áreas menores e com períodos reduzidos no HEC-RAS, pois essa abordagem possibilita uma representação mais detalhada dos processos locais, aumentando a precisão e a resolução espacial da modelagem.

Além disso, períodos menores facilitam a identificação de eventos hidrológicos específicos, permitindo uma análise mais precisa dos impactos na erosão e na deposição de sedimentos.

Outras vantagens incluem a redução do tempo de processamento, a maior disponibilidade de dados para calibração e um melhor controle dos parâmetros hidráulicos, tornando a simulação mais eficiente e confiável.

E que sejam feitas simulações de transporte de sedimentos em áreas menores e com períodos menores no programa HEC-RAS devido a diversas vantagens para aprofundar a compreensão dos processos hidrossedimentológicos.

Com as áreas menores é possível reduzir a complexidade do modelo, permitindo uma representação mais detalhada dos processos locais, aumentando a precisão e a resolução espacial do modelo, permitindo observar detalhes do transporte de sedimentos.

Com períodos menores é mais fácil identificar eventos hidrológicos, como enchentes ou secas, avaliando com mais precisão o impacto dessas condições na erosão e deposição de sedimentos.

Além disso, existe outras vantagens com a redução do tempo de simulação, maior disponibilidade de dados: e melhor controle dos parâmetros hidráulicos.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHANI, L. Modeling of dam-break flood wave propagation using HEC-RAS 2D and GIS: case study of Taksebt dam in Algeria. **World Journal of Engineering**, (ahead-of-print), 2023. <https://doi.org/10.1108/WJE-10-2022-0405>
- ACKERS, P. & WHITE, W. R. Sediment transport: new approach and analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 99, n. 11, p. 2041-2060, 1973. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JYCEAJ.0003791>.
- ALMEIDA, B.C.M. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do Fundão através do modelo numérico HISTAV**. 2019. Monografia (Graduação de Engenharia Civil), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
- ALMEIDA, J.; PINHO, J.L.; VENÂNCIO, S.S.; VIEIRA, J.M. Avaliação do transporte sedimentar no estuário do rio Douro em diferentes cenários hidrodinâmicos. **Rev. Gestão Costeira Integr.**, v. 13, n. (2013), p. 317-328, 2015. <https://hdl.handle.net/1822/43262>
- ALMEIDA, T.V.P. **Toxicidade de sedimentos contaminados por rejeitos da mineração no Rio Doce em embriões do Zebrafish (Danio rerio)**. 2022 Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular, Universidade Federal de Minas Gerais.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Guia Prático de Pequenas Barragens**. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens - v VIII - Brasília, 2016. https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=124737&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=68807&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0
- ANDRADE, A.C.F. Mapeamento e caracterização do sistema rio-planície da Amazônia central via sensoriamento remoto e modelagem hidráulica. Porto Alegre, 2020. Tese (Doutorado), Instituto de pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ANDRADE, M.P.; DE MELO RIBEIRO, C.B.; DE MELLO HONÓRIO, L.; MARCATO, A.L.M.; MOREIRA, J.C.; WESTIN, L.G.F. Caracterização Física e Hidrológica da bacia de Contribuição da UHE de Itapebi. **Sustentare**, v. 3, n. 1, p. 18-28, 2019. <http://dx.doi.org/10.5892/st.v3i1.5710>
- ARAÚJO, A.A.; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D.D.; RAVANELLO, M.M.; SOUZA, S.A.D.; CARVALHO, T.L.L.D.; ALVES, M.E.P. Prova de conceito de estimativa de vazões para pequenas bacias sem dados usando modelagem hidrológica distribuída: estudo para o Rio Doce (MG). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 24, 2021, Belo Horizonte. **Anais...Belo Horizonte**. ABRHidro, 2021. <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/233898/001135279.pdf?sequence=1>.
- ARAUJO, I.; LIMA, A.M.; SANTOS, C. Caracterização hidrogeomorfológica das paisagens componentes da bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 22, 2015 <https://www.conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/1710/1634>
- BARBOSA, S.E.D.S. **Análise de dados hidrológicos e regionalização de vazões da bacia do rio do Carmo**. Ouro Preto, 2004. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto.
- BEST, J.L. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. **Sedimentology**, v. 35, n. 3, p. 481-498, 1988. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1988.tb00999.x>.
- BEZERRA, A.; DE MELO, C.R.; DE MONTE, Í.B.; SOUZA, M.S.; ALMEIDA, L.F. Análise dos aspectos Geomorfológicos Fluviais no trajeto rio Branco – AC/Cruzeiro do Sul – AC Arigó. **Revista do Grupo PET e Acadêmicos de Geografia da Ufac**, v. 4, n. 01, 2021. <https://periodicos.ufac.br/index.php/arigoufac/article/view/3570/4076>.
- BOWKER, L.N. **Samarco dam failure: Largest by far in recorded history**. Bowker Associates, Science & Research in The Public Interest. 2015. <https://lindsaynewlandbowker.wordpress.com/2015/12/12/samarco-dam-failure-largest-by-far-in-recorded-history/>
- BRESSAN, F.; MANTILLA, R.; SCHILLING, K.E.; PALMER, J.A.; WEBER, L. Hydrologic-hydraulic modeling of sediment transport along the main stem of a watershed: role of tributaries and channel geometry. **Hydrological sciences journal**, v. 65, n. 2, p. 183-199, 2020. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1687897>
- BRUNNER, G. & RAS, H. **River Analysis System Hydraulic: Reference Manual**. Davis: USACE's Hydrologic Engineering Center, 538 p. 2016. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- BRUNNER, G.W. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 6.0**. US Army Corps of Engineers. 2020. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest>
- BUNTE, K. & ABT, S.R. Sampling frame for improving pebble count accuracy in coarse gravel-bed streams 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 4, p. 1001-1014, 2001. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05528.x>
- BURRITT, R. L. & CHRIST, K.L. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. **Journal of cleaner production**, v. 178, p. 196-205, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.042>
- CARVALHO, D.C.D.; PEREIRA, M.G.; GUARESCHI, R.F.; MARANHÃO, D.D.C. Estoque de Carbono e Nitrogênio e Abundância Natural de $\delta^{13}C$ na Estação Ecológica de Pirapitinga, MG. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. <https://www.scielo.br/j/floram/a/zQcTvJpFjQRdvdwcmVVJj/b/abstract/?lang=pt>.
- CARVALHO, E.M.D. **Análise diagnóstica de indicadores de erosão do solo na bacia hidrográfica do Córrego João Dias, Aquidauana/MS**. Rio Claro, 2012. Tese (Doutorado), Pós-graduação Geografia, Universidade Estadual Paulista (Unesp).
- CAVALCANTE, T.L. & FAN, F.M. Comparação de abordagem unidimensional e bidimensional para a modelagem de vazões e níveis no Rio Doce usando o Modelo Delft3D. In CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL & 10ª REUNIÃO DE ESTUDOS AMBIENTAIS, 2020. **Anais...** Porto Alegre: Bacias hidrográficas e gestão de recursos naturais, v. 2, 2020. <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/217126/001118802.pdf?sequence=1>
- CHAVARRÍAS, V.; OTTEVANGER, W.; SCHIELEN, R.; BLOM, A. A well-posed model for 2D mixed-size sediment morphodynamics. In: 11th RIVER, COASTAL AND ESTUARINE MORPHODYNAMICS SYMPOSIUM, RCEM, 2019, p. 30-30. https://research.utwente.nl/files/169574671/Chavarrrias2019well_posed.pdf
- CHEN, Y. & FALCONER, R.A. Advection-diffusion modelling using the modified QUICK scheme. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 15, n. 10, p. 1171-1196, 1992. <https://doi.org/10.1002/flid.1650151003>.
- CHEVALIER, G.G.; LOCATELLI, F.; MASSON, E.; BLANPAIN, O. Silting in the Grand Canal in the Domain of Chantilly (Oise, France)—Catchment-Scale Hydrogeomorphological Reconnaissance and Local-Scale Hydro-Sedimentary Transport Modelling. **Water**, v. 13, n. 14, p. 1989, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13141989>
- CHOW, V.T. **Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill Book Company. New York, p. 507-510, 1959. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260469707>
- COELHO, A.L. **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES**. Niterói, 2007. Tese (Doutorado).

- Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia).
- COELHO, J.A.P.F.; MATOS, A.J.S.; DAVIS, E.G. **Sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Doce: relatório técnico de operação do ano hidrológico 2021/2022**. CPRM. <http://abrh.s3.amazonaws.com/Eventos/Trabalhos/65/PAP021.pdf>.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE – CBH-DOCE. **Deliberação ao Normativa CBH-Doce Nº 51/2016**, 2016. Disp. 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>.
- 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**. 2010. http://agerh.es.gov.br/Media/agerh/Documenta%C3%A7%C3%A3o%20CBHs/PIRH_Doce_Volume_II2.pdf]
- COPELAND, R.R. & THOMAS, W.A. **Corte Madera Creek sedimentation study: Numerical model investigation**. TR-HL-89-6. US Army Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS. USA. 1989. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA254685>.
- CPRM & ANA. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce (Hidrometria, Sedimentometria e Qualidade da Água nas Estações Fluviométricas da RHN após a Ruptura da Barragem de Rejeito No. IV. Belo Horizonte, Brazil: Serviço Geológico do Brasil - Agência Nacional de Águas. 2016. http://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/21590/1/riodoce_relatorio4.pdf.
- DIAS, C.A.; DA COSTA, A.S.V.; GUEDES, G.R.; DE MATOS UMBELINO, G.J.; DE SOUSA, L.G.; ALVES, J.H.; SILVA, T.G.M. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**. 2018 <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952940>.
- EVANGELISTA, H.; VALERIANO, C. DE M.; PARAVIDINI, G.; GONÇALVES JUNIOR, S.J.; SODRÉ, E.D.; NETO, C.C.A.; HEILBRON, M. Using Nd Sr isotopes in suspended sediments in the Abrolhos coral-reef (SW Atlantic, Brazil) to assess potential contamination from the 2015 Fundão dam collapse. **Science of The Total Environment**, v. 807, p. 151231, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151231>.
- FAGUNDES, H. DE O. **Modelagem Hidrossedimentológica de Grandes Bacias Com Apoio de Dados In Situ e Sensoriamento Remoto**. Porto Alegre, 2018. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FERREIRA, C.W.S. & DE ARAÚJO, M.D.S.B. Influência do Uso do Solo e da Drenagem no Transporte de Sedimentos para um Reservatório de Água no Semiárido de Pernambuco I. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 06, p. 1229-1243, 2014. <https://scholar.archive.org/work/5sbnirsgevaqj57gdxlrmfce/access/wayback/https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbffe/article/download/233609/27199>
- FERREIRA, F.J.F.; CANDIDO, A.G.; ROSTIROLLA, S.P. Correlação gamaespectrométrica de afloramentos e poços: estudo de caso na Formação Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, p. 371-396, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000300005>
- FOESCH, M.D.S.; FRANCELINO, M.R.; ROCHA, P.A.; GOMES, A.R.L. River water contamination resulting from the Mariana disaster, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 27, 2020. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.013218>.
- FREITAS, A.S.F. & BRENDA, T.V. (). NARRATIVAS CARTOGRÁFICAS: quando o mapa vira texto. **Revista Brasileira de Educação em Geografia**, v. 9, n. 18, p. 106-124, 2019. <https://revistaedugeo.com.br/revistaedugeo/article/view/667/382>
- GARCIA, L.C.; RIBEIRO, D.B.; DE OLIVEIRA ROQUE, F.; OCHOA-QUINTERO, J.M.; LAURANCE, W.F. Brazil's worst mining disaster: corporations must be compelled to pay the actual environmental costs. **Ecological applications**, v. 27, n. 1, p. 5-9, 2017. <https://doi.org/10.1002/eap.1461>.
- GRESSLER, M. **Alternativas de simulação de rompimento de barragem de rejeitos no software HEC-RAS: uma análise comparativa**. 2022. Trabalhos de Conclusão de Curso de Graduação. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Escola de Engenharia. Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HOLLY JR, F.M. & PREISSMANN, A. Accurate calculation of transport in two dimensions. **Journal of the Hydraulics division**, v. 103, n. 11, p. 1259-1277, 1977. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004870>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE. **Lauda Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Brasília, 2016. <https://am37.files.wordpress.com/2016/01/laudo-preliminardo-ibama-sobre-mariana.pdf>.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Rio Doce no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte –MG**. 2017. <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2/monitoramento-da-qualidade-das-aguas-superficiais-do-rio-doce-no-estado-de-minas-gerais>.
- JOSHI, N.; LAMICHHANE, G.R.; RAHAMAN, M.M.; KALRA, A.; AHMAD, S. Application of HEC-RAS to study the sediment transport characteristics of Maumee River in Ohio. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2019: **Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis**, p. 257-267. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482353.024>.
- JÚNIOR, A.P.M. & DE PAULA BARROS, L.F. **Hidrogeomorfologia: formas, processos e registros sedimentares fluviais**. Editora Bertrand Brasil, 2020. https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=YGXTDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP18&dq=Hidrogeomorfologia:+formas,+processos+e+registros+sedimentares+fluviais&ots=odZT6IIHXA&sig=toFsDyv5k_cHi3hXq3l0DeG6a2E
- KJELSDEN, T. R.; WOLTERS, H.; VANNEUVILLE, W. **Historical flood events in Europe: European case studies based on the reporting under the Floods directive**. 2014. <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/historical-flood-events-in-europe-european-case-studies-based-on-kleinmans>
- KLEINHANS, M.G. Sorting out river channel patterns. **Progress in physical geography**, v. 34, n. 3, p. 287-326, 2010. <https://doi.org/10.1177/0309133310365300>
- KONDOLF, G.M. Historical changes to the San Francisco bay-delta watershed: Implications for ecosystem restoration. **River Restoration in Europe**, n. 327, 2000. <https://www.researchgate.net/profile/Bocian-Jan-2/publication/233988404>
- KUMAR, B.S.N.; USHA, K.; KANCHANA, M.S. Hydrological Review and Dam Break Analysis of Suvaranavathi Dam Using HEC-RAS. In: Nandagiri, L., Narasimhan, M.C., Marathe, S., Dinesh, S. (eds) **Sustainability Trends and Challenges in Civil Engineering**. Lecture Notes in Civil Engineering, v. 162. Springer, Singapore. 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2826-9_46
- LEMOES, A.T.; OSADCHIEV, A.; MAZZINI, P.L.; MILL, G.N.; FONSECA, S.A.; GHISOLFI, R.D. Spreading and accumulation of river-borne sediments in the coastal ocean after the environmental disaster at the Doce River in Brazil. **Ocean and Coastal Research**, v. 70, 2022. <https://www.scielo.br/j/ocr/a/prcWP5mMLz773zByFFRjYdg/abstract/?lang=en>.
- LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.D.; CARVALHO, N.D.O. Comparação de modelos matemáticos para o traçado de curvas granulométricas de sedimentos do leito de rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 1, p. 91-98, 2006. <https://biblat.unam.mx/hevila/Revistabrasileiraderecursoshidricos/2006/vol11/no1/8.pdf>
- LIMA, P.H.S. **Fluidodinâmica Computacional aplicada a escoamentos em canais com vegetação**. Campo Grande, 2023. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Tecnologias

- Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. MACEDO, D.R.; JUNIOR, A.P.M.; CARVALHO, R.P.B.; FELIPPE, M.F. Impactos do rompimento da barragem de Fundão (Mariana - MG) na geometria hidráulica do Rio Gualaxo do Norte. **Recursos Hídricos: gestão, planejamento e técnicas em pesquisa**, v. 1, n. 1, p. 92-111, 2021. <https://doi.org/10.37885/210705526>.
- MACHADO, N.C. **Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação**. Belo Horizonte, 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.
- MANTOVANI, V.A.; DA SILVA AMORIM, J.; RODRIGUES, A.F.; JUNQUEIRA, R.; CARVALHO, RN.; DE OLIVEIRA, A.S. Estimativas da Taxa de Entrega de Sedimentos e Áreas Susceptíveis à Erosão em uma Bacia Hidrográfica no Sul De Minas Gerais-BRASIL. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 2, 2018. <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v16i2.5061>
- MARCIANO, A.G. **Modelagem Hidrodinâmica com a integração do mapeamento das inundações do rio Sapucaí do município de Itajubá/MG**. Itajubá, 2019 Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- MARCIANO, A.G.; ASSIREU, A.T.; AZEVEDO, S.C.D.; SILVA, B.C.D.; ABREU, A.T.D.; NALINI, H.A. Dramatic changes in the confluence morphology driven by an extreme hydrologic pulse: impacts to River Doce restoration. **RBRH**, v. 29, n. e9. 2024. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420.230139>.
- MARCIANO, A.G.; BARBOSA, A.A.; MONI, A.P.S. Study of scenarios in the simulation of flood events on the Piranguçu River and its influence on the industrial district of Itajubá – MG. **Brazilian Magazine of Renewable Energies**, v. 7, n. 1, p. 1-5, 2018. <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v7i1.57961>.
- MAURI, G.D.N.; MORETO, E.R.; GOMES, V.A.D.P.; DE FREITAS, R.R. Uma análise da pesca artesanal e o rompimento da barragem de rejeito da mineração em Mariana, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 15, n. 7, 2019. <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v15i7.5258>.
- MORIAZI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- MOSLEY, M.P. An experimental study of channel confluences. **The journal of geology**, v. 84, n. 5, p. 535-562, 1976. <https://doi.org/10.1086/628230>
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970
- NELSON, A.; GIBSON, S.A.; SANCHEZ, A. **Development of a two-dimensional HEC-RAS sediment model for the Chippewa River, Wisconsin, for software development and sediment trend analysis**. 2022. <http://dx.doi.org/10.21079/11681/44561>.
- NISTORAN, D.E.G.; IONESCU, C.S.; SIMIONESCU, Ș.M. Influence of dam break scenarios on flood wave characteristics. Case study—Paltinu Dam, Romania. In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 2023. **IOP Publishing**... Romania, v. 1136, n. 1, p. 012031, 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012031>.
- PALU, M.C. & JULIEN, P.Y. Modeling the sediment load of the Doce River after the Fundão tailings dam collapse, Brazil. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 145, n. 5, p. 05019002, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001582](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001582).
- PATRIADI, A.; SOEMITRO, R.A.A.; WARNANA, D.D.; WARDOYO, W.; MUKUNOKI, T.; TSUJIMOTO, G. The influence of sembayat weir on sediment transport rate in the estuary of Bengawan Solo River, Indonesia. **GEOMATE Journal**, v. 20, n. 81, p. 35-43, 2021. <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/183/1195>.
- PAULA, W.C.D.S.; DA CUNHA, S.B.; DE SOUZA, C.A. Variáveis Hidrodinâmicas e sedimentológicas e no baixo curso do rio Cabaçal em Cáceres - MT. **Revista Equador**, v. 9, n. 1, p. 57-78, 2020. <https://doi.org/10.26694/equador.v9i1.9434>
- PEREIRA, A.R.A. **Monitoramento da Eutrofização no rio Poti em Terezina, Piauí, Brasil**. Terezina, 2022. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal do Piauí.
- PEREIRA, L.F.; DE BARROS CRUZ, G.; GUIMARÃES, RM.F. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 122-129, 2019. <https://core.ac.uk/download/pdf/228888187.pdf>
- RAHMAN, S.A. & CHAKRABARTY, D. Sediment transport modelling in an alluvial river with artificial neural network. **Journal of Hydrology**, v. 588, p. 125056, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125056>.
- RAHUL, P.R. & SHARMA, P.K. A review on sediment transport modelling using HEC-RAS 2D Sediment Technical Reference Manual. **Water and Energy International**, v. 66, n. 1, p. 1-10, 2023. http://www.incold.co.in/conf_2022/Papers/A%20review%20on%20sediment%20transport%20modelling%20using%20HEC-RAS.pdf
- RICHARDSON, W.R. & THORNE, C.R. Multiple thread flow and channel bifurcation in a braided river: Brahmaputra–Jamuna River, Bangladesh. **Geomorphology**, v. 38, n. 3-4, p. 185-196, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00080-5)
- ROCHA, L.T. Avaliação da viabilidade de uso de precipitações obtidas por sensoriamento remoto em simulações hidrológicas na bacia do rio Japarutuba/SE. Aracaju. 2015. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Universidade Federal de Sergipe.
- ROJAS, C. & PEREIRA, D. B. O rompimento da barragem de Fundão e a ascensão do capitalismo de desastre no Brasil. **Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**, v. 32, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.15446/rcgd.v32n1.94479>.
- SAADI, A. & CAMPOS, J.C.F. Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015, Mariana–MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, n. 1-2, 2015. <https://periodicos.ufmg.br/index.php/mhnb/article/view/6262>.
- SANTANA, F.C.; FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, C.E.; VELOSO, G.V.; FERNANDES-FILHO, E.I.; SANTANA, A.D.J.; TIMO, L.B.; ROSA, A.P. Water quality of the Gualaxo do Norte and Carmo rivers after the Fundão dam collapse, Mariana, MG. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05113-3>.
- SANTOS, E.A.; DE ANDRADE, Á.A.X.; DA CUNHA, D.A. Mudanças climáticas e vulnerabilidade na agricultura familiar da região Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. **Geosul**, v. 37, n. 81, p. 229-251, 2022. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2022.e76585>
- SERRANO, L.D.O.; BORGES, A.C.; PRUSKI, F.F.; MELO, M.C.D. A new approach to use load duration curves to evaluate water quality: A study in the Doce River Basin, Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 811, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030811>.
- SILVA, D.L.; FERREIRA, M. C.; SCOTTI, M. R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Região (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, n. 1-2, 2015. <https://periodicos.ufmg.br/index.php/mhnb/article/view/6264>.
- SILVA, J.B. Erosão e escoamento pluvial superficial: Uma experiência na bacia hidrográfica da Glória em Uberlândia-MG. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, v. 3, n. 2, p. 2, 2012. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5059178.pdf>
- SOUZA, C.F.; PERTILLE, C.T.; CORRÊA, B.J.S.; VIEIRA, F.S. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Iváí-Paraná. **Geoambiente On-Line**, v. 29, 2017. <https://doi.org/>

10.5216/revgeoamb.v0i29.50602

- SYVITSKI, J.P. & SAITO, Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. **Global and Planetary Change**, v. 57, n. 3-4, p. 261-282, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.12.001>
- SYVITSKI, J.P.; KETTNER, A.J.; CORREGGIARI, A.; NELSON, B.W. (). Distributary channels and their impact on sediment dispersal. **Marine Geology**, v. 22, p. 222-223, 2005. <https://research.tudelft.nl/en/publications/distributary-channels-and-their-impact-on-sediment-dispersal>
- TEIXEIRA, E.K.D.C.; COELHO, M.M.L.P.; PINTO, E.J.D.A.; DINIZ, J.G.; SALIBA, A.P.M. Coeficiente de rugosidade de Manning para o Rio Doce. **RBRH**, 23, e52. 2018. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180013>
- TUCCI, M.C.E. Hidrologia, Ciência e Aplicação. (2007. <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=4&LIVRO=102>
- WILLIAMS, G.P. & WOLMAN, M.G. Effects of dams and reservoirs on surface-water hydrology; changes in rivers downstream from dams. US Geological Survey **Professional Paper**, v. 1286, p. 83, 1984. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/12/2285>
- WU, W. Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels. **Journal of hydraulic engineering**, v. 130, n. 10, p. 1013-1024, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:10\(1013\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(1013)).
- WU, W. & WANG, S.S. Formulas for sediment porosity and settling velocity. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 8, p. 858-862, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:8\(858\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(858)).
- ZHANG, T.; PENG, L.; FENG, P. Evaluation of a 3D unstructured-mesh finite element model for dam-break floods. **Computers & Fluids**, v. 160, p. 64-77, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.10.013>
- ZHAO, X.; LIANG, D.; MARTINELLI, M. Numerical simulations of dam-break floods with MPM. **Procedia Engineering**, v. 175, p. 133-140 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.041>

Submetido em 30 de janeiro de 2025

Aceito para publicação em 23 de abril de 2025