

DOI: <https://10.59824/rmrh.v7.355>

MODELAGEM BIDIMENSIONAL DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA CONFLUÊNCIA DO RIO MANHUAÇU COM RIO DOCE, APÓS DESASTRE DE MARIANA (MG), BRASIL

Two-dimensional modeling of sediment transport at the confluence of the Manhuaçu and Doce rivers following the Mariana dam failure (MG, Brazil)

Alexandre Germano Marciano^{1*}

André Luiz Vieira Barouch²

Alessandro Luvizon Bérghamo³

Alex Takeo Yasumura Lima Silva⁴

RESUMO

Em novembro de 2015, o município de Mariana (MG), Brasil, foi cenário do maior desastre envolvendo barragens de rejeitos da história do país. A ruptura da barragem de Fundão resultou na liberação de aproximadamente 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos, desconsiderando o volume de água, ocasionando impactos ambientais e socioeconômicos severos ao longo da bacia do rio Doce. Desde então, diversos estudos vêm sendo conduzidos com o propósito de compreender a magnitude dos danos e propor estratégias de mitigação e recuperação ambiental. Entre as metodologias adotadas para investigar a dinâmica do desastre, com ênfase na perspectiva hidrodinâmica, destaca-se a aplicação de modelos computacionais. Este estudo emprega modelos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos

¹ Doutorado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade e Mestrado em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduação em Administração pela Faculdade Cenecista de Varginha. Servidor público da Universidade Federal de Itajubá – e-mail: agermano@unifei.edu.br
*Autor correspondente.

² Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Vale do Rio Verde. Técnico de Laboratório em Geomática Aplicada pela Universidade Federal de Itajubá – e-mail: avbarouch@unifei.edu.br

³ Doutorado e Mestrado em Oceanografia Física pela Universidade de São Paulo (USP). Bacharel em Física pela Universidade Estadual de Londrina. Docente do Instituto de Recursos Naturais – e-mail: luvizon.bergamo@unifei.edu.br

⁴ Doutorado e Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduação em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Professor Adjunto na Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira – e-mail: alex.takeo@uol.com.br

bidimensionais (2D) na região de confluência dos rios Manhuaçu e Doce, com o objetivo de avaliar a contribuição dos afluentes nos processos de recuperação e restabelecimento da funcionalidade do sistema hidrográfico do rio Doce. O modelo hidrodinâmico 2D demonstrou adequada representação dos hidrogramas obtidos nas estações de monitoramento, além de permitir a delimitação da área inundada durante o evento catastrófico. Os resultados das simulações do transporte de sedimentos indicaram uma deposição média de 1,06 metro e um processo erosivo médio de 0,86 metro ao longo de um período de cinco anos. Verificou-se, ainda, o acúmulo de 2,18 hectômetros cúbicos de sedimentos na represa de Aimorés durante o mesmo intervalo temporal. Os dados apontam que o rio Manhuaçu apresenta vazão insuficiente para promover a mistura e a diluição eficaz dos sedimentos oriundos do rio Doce. Constatou-se, também, que as barragens existentes na área de estudo exercem influência significativa sobre os processos de transporte e deposição de sedimentos, alterando a dinâmica hidrossedimentológica natural da bacia.

Palavras-chave: HEC-RAS; Simulação hidrodinâmica bidimensional; Simulação bidimensional do transporte de sedimentos; Desastre de Mariana; Bacia do rio Doce.

ABSTRACT

In November 2015, the municipality of Mariana (MG), Brazil, experienced the largest tailings dam disaster in the country's history. The failure of the Fundão dam released approximately 32 million cubic meters of mining tailings, excluding water volume, causing severe environmental and socioeconomic impacts throughout the Doce River basin. Since then, numerous studies have sought to assess the magnitude of the damage and to propose mitigation and environmental recovery strategies. Among the approaches used to investigate the disaster dynamics, computational modeling has played a central role, particularly from a hydrodynamic perspective. This study applies two-dimensional (2D) hydrodynamic and sediment transport modeling to the confluence of the Manhuaçu and Doce rivers, aiming to evaluate the contribution of tributaries to recovery processes and to the reestablishment of the functional dynamics of the Doce River system. The 2D hydrodynamic model adequately reproduced observed hydrographs at monitoring stations and enabled the delineation of the inundated area associated with the catastrophic event. Sediment transport simulations indicated an average deposition of 1.06 m and an average erosion of 0.86 m over a five-year period. In addition, an estimated accumulation of 2.18 hm³ of sediments was identified in the Aimorés reservoir during the same interval. The results indicate that the discharge of the Manhuaçu River is insufficient to promote effective mixing and dilution of sediments derived from the Doce River. Furthermore, the presence of dams within the study area significantly influences sediment transport and deposition processes, altering the natural hydrosedimentological dynamics of the basin.

Keywords: HEC-RAS; Two-dimensional hydrodynamic modeling; Two-dimensional sediment transport modeling; Mariana dam failure; Doce River basin.

Data de submissão: 24/04/2025

Data de aprovação: 05/12/2025

1 INTRODUÇÃO

No dia 5 de novembro de 2015, houve ruptura da barragem de Fundão, em Mariana (MG), ocasionando, segundo Foesch *et al.* (2020), o maior desastre ambiental Brasileiro com a liberação de 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração de ferro (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente - IBAMA, 2016; Ávila *et al.*, 2021). A lama percorreu cerca de 570 km, afetando o córrego Santarém, rios Gualaxo do Norte e Carmo, até alcançar o rio Doce e o Oceano Atlântico. Os impactos ambientais foram severos, incluindo remoção de vegetação, perda de solo, morte de peixes e contaminação da água, afetando 424 mil pessoas em 12 municípios (Agência Nacional de Águas - ANA, 2016; IBAMA, 2016; Roja; Pereira, 2023). Aproximadamente 90% dos rejeitos se depositaram entre as barragens de Fundão e Candonga, e o restante alterou significativamente a concentração de sólidos em suspensão no rio Doce, gerando consequências irreversíveis (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM; ANA, 2016).

Os impactos socioeconômicos foram significativos, com danos a comunidades ribeirinhas, pescadores e povos indígenas, afetando suas atividades produtivas e qualidade de vida (Mauri *et al.*, 2019). Estudos indicaram também contaminação por metais pesados e impactos em ambientes marinhos protegidos, como o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (Carvalho *et al.*, 2017; Evangelista *et al.*, 2022).

Em resposta, diversas entidades governamentais e a iniciativa privada intensificaram o monitoramento e a fiscalização da qualidade e da quantidade das águas do rio Doce. A Agência Nacional de Águas (ANA), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e o Serviço Geológico do Brasil (SGB) realizaram medições para acompanhar a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão. A Fundação Renova implementou um Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS), com avaliações permanentes (Santana *et al.*, 2021).

Estudos sobre rupturas de barragens de rejeitos geralmente se concentram nas características da inundação, mas há escassez de publicações sobre transporte de sedimentos, e a qualidade da água em canais naturais após esses eventos (Palu; Julien, 2019). O desastre de Mariana se destaca pela técnica de armazenamento de rejeito de minério ser uma das mais utilizadas e pela magnitude das consequências ocorridas.

Nesse contexto, a aplicação de modelos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos torna-se uma ferramenta essencial para a compreensão dos processos físicos associados à dispersão e à deposição de material em sistemas fluviais (Patriadi *et al.*, 2021; Chevalier *et al.*, 2021). Tais modelos permitem simular o escoamento, delimitar áreas alagáveis, estimar vazões máximas e velocidades, além de prever processos erosivos e de deposição de sedimentos.

Considerando os efeitos do desastre de Mariana, supõe-se que os afluentes do rio Doce desempenham um papel relevante na recuperação hidrossedimentológica da bacia, ao fornecerem vazões com menor carga de sedimentos. Com base nessa hipótese, o presente estudo aplica modelos bidimensionais de escoamento e transporte de sedimentos na região de confluência entre os rios Manhuaçu e Doce. Os resultados obtidos buscam subsidiar estratégias de mitigação e prevenção de futuros desastres, além de contribuir para a restauração ambiental desse importante sistema hidrográfico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Simulação do transporte de sedimentos 2D

Os sedimentos são compostos por grãos minerais e partículas orgânicas, acumulam-se no fundo de corpos hídricos e desempenham um papel crucial na manutenção dos ecossistemas aquáticos, servindo de substrato e fonte de alimento para espécies bentônicas. No entanto, também podem ser veículos de poluentes, contaminando a biota aquática quando associados a substâncias tóxicas (Carvalhos, 2008). Sua origem está principalmente no intemperismo físico-químico das rochas, sendo transportados por agentes erosivos naturais ou atividades humanas, como desmatamento, mineração e urbanização desordenada (Bartelli, 2012). O ciclo hidrossedimentológico envolve seis etapas principais: desagregação, erosão, transporte, sedimentação, deposição e consolidação, com foco nas etapas de erosão, transporte e deposição, que são frequentes e fundamentais para estudos de morfologia fluvial (Bordas; Semmelmann, 1993).

A modelagem do transporte de sedimentos no programa HEC-RAS é realizada por meio da resolução da Equação (1), que descreve o transporte no leito fluvial, considerando as frações em carga de fundo e suspensão. O modelo do programa HEC-RAS

utiliza formulações empíricas baseadas em parâmetros hidráulicos e granulométricos, adotando um esquema numérico de volumes finitos acoplado à malha hidrodinâmica. Esse modelo permite a simulação integrada dos processos de erosão, deposição e transporte de sedimentos ao longo de um canal, fornecendo informações essenciais para a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas (Nelson *et al.*, 2022).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h C_{t k}}{\beta_{t k}} \right) + \nabla \cdot (h U C_{t k}) = \nabla \cdot (\epsilon_{t k} h \nabla C_{t k}) + E_{t k}^{HF} - D_{t k}^{HF} + S_{t k} \quad (1)$$

Onde: $C_{t k}$ é a carga total de concentração de sedimentos; $\beta_{t k}$ 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; $\epsilon_{t k}$ é o coeficiente de difusão (mistura) de carga total; $E_{t k}^{HF}$ é a taxa de erosão de carga total; $D_{t k}^{HF}$ é a taxa de deposição de carga total e; $S_{t k}$ é o termo fonte/sumidouro de carga total.

2.2 Simulação hidrodinâmica 2D

Os modelos hidrodinâmicos são essenciais para simular o comportamento do escoamento em sistemas hídricos naturais e artificiais, podendo ser classificados de acordo com o regime e a distribuição espacial do escoamento. O regime pode ser permanente, quando as variáveis hidráulicas permanecem constantes, ou não permanente, mais comum em ambientes naturais devido à sua variabilidade (Azevedo Netto; Fernández, 2015). Quanto à distribuição espacial, o escoamento pode ser uniforme, quando as propriedades hidráulicas são constantes ao longo do trecho, ou não uniforme, com variação entre diferentes seções, podendo ser gradualmente variado ou bruscamente variado, dependendo das características do canal (Cirilo *et al.*, 2014; Campos, 2009).

Esses modelos são fundamentados nas equações de Saint-Venant, que derivam das equações de Navier-Stokes, e são baseados nos princípios da conservação da massa e da quantidade de movimento (Verçosa, 2019). O programa HEC-RAS 2D utiliza a equação de Manning para resolver as equações de energia e aplicar métodos numéricos baseados em diferenças finitas para fluxos não permanentes (Holly; Preissmann, 1977). Chen e Falconer

(1992) aprimoraram esses métodos para a solução das equações de águas rasas em escoamentos bidimensionais.

As equações bidimensionais derivam das equações unidimensionais ao integrar a vertical entre fundo e superfície, nas direções cartesianas x e y . As equações (2), (3) e (4) são soluções das equações de conservação de massa e de momento, num plano paralelo em relação ao fundo do canal de escoamento (Andrade, 2020).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + u \frac{\partial vh}{\partial x} + v \frac{\partial vh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gn^2}{h^3} |v|v + 2\omega \sin\varphi h u + A_t \nabla^2 hv \quad (4)$$

Onde: h é profundidade; u, v é velocidade média nas direções de x e y ; H é elevação da água; ω é velocidade angular; φ é latitude e; A_t é coeficiente da viscosidade turbulenta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

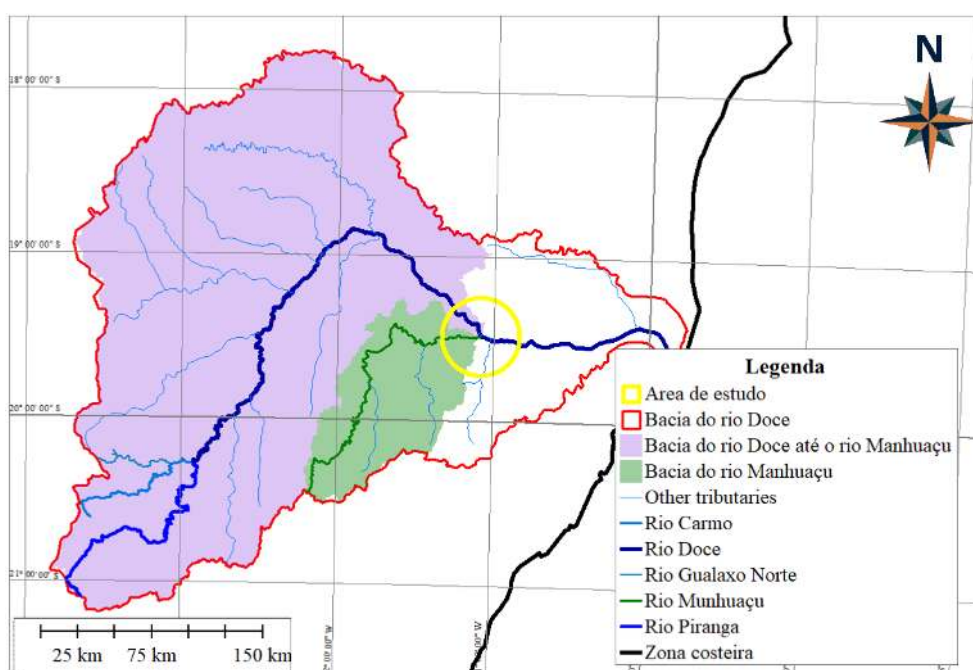
A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), localizada na região Sudeste do Brasil, abrange uma área total de aproximadamente 82.600 km². Deste total, cerca de 86% encontra-se no estado de Minas Gerais e os 14% restantes no estado do Espírito Santo, envolvendo 230 municípios (CBH-Doce, 2016). O rio Doce possui uma extensão de 888 km, originando-se da confluência dos rios Piranga e do Carmo, na Serra das Vertentes, a uma altitude aproximada de 1.200 metros. Seu curso segue em direção ao leste até sua foz no Oceano Atlântico, constituindo-se em um dos principais cursos d'água da região hidrográfica do Atlântico Sudeste, com destacada relevância ambiental, social e econômica (Consórcio EcoPlan Lume, 2010).

O presente estudo foi conduzido na confluência do rio Manhuaçu com o rio Doce, localizada no município de Aimorés, Minas Gerais. A bacia hidrográfica do rio Manhuaçu

apresenta um perímetro de aproximadamente 766 km e uma área de drenagem estimada em 8.830 km². O rio Manhuaçu, principal afluente do rio Doce em extensão, percorre cerca de 333 km desde sua nascente, no município de São João do Manhuaçu, até sua foz.

A bacia hidrográfica do rio Doce, até o ponto de confluência como rio Manhuaçu, possui um perímetro de 2.105 km e uma área de contribuição de 61.444 km². O Mapa 1 mostra a área de estudo, destacando a confluência entre os dois rios e os principais limites das bacias desse estudo.

Mapa 1– Localização da bacia hidrográfica do rio Doce e do rio Manhuaçu



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A área de estudo (Mapa 2) compreende um conjunto de estruturas hidráulicas composto por 3 barragens e 1 canal de adução, utilizados para fins de controle hídrico e geração de energia elétrica. Dentre essas estruturas, destaca-se a Usina Hidrelétrica Eliezer Batista, que dispõe de uma barragem construída em enrocamento com núcleo de terra, com aproximadamente 565 metros de comprimento e 18 metros de altura. Associado a essa usina, encontra-se um canal de adução com extensão de 12 km, localizado na margem esquerda do rio, responsável pelo desvio e transporte de água até a casa de força. Complementando o sistema, há uma barragem adicional no canal de adução, com aproximadamente 150 metros de

extensão, cuja função principal é garantir o nível de água necessário para o funcionamento adequado do canal.

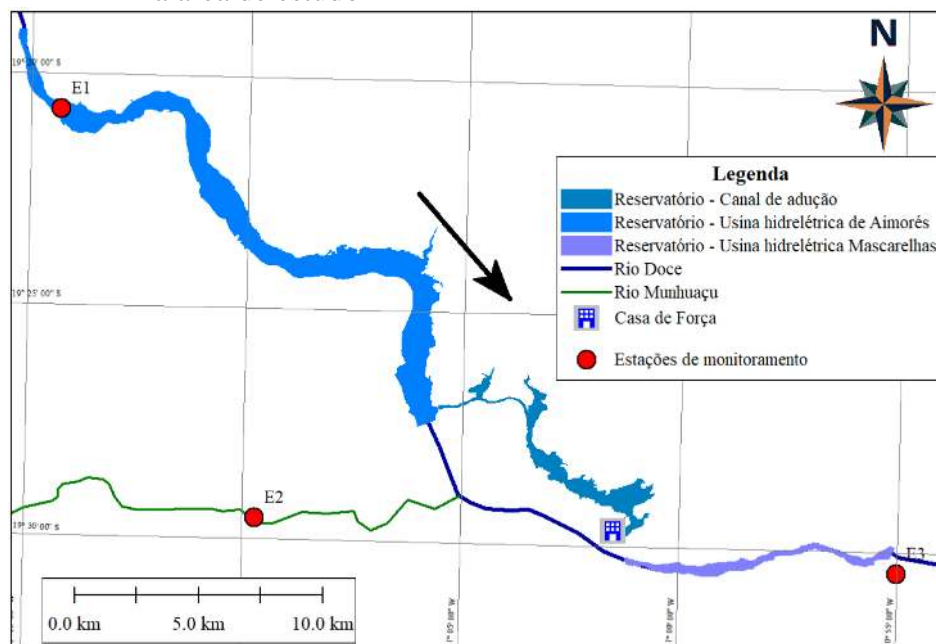
Ainda na região de estudo, situa-se a Usina Hidrelétrica Marechal Mascarenhas de Moraes, que apresenta uma barragem do tipo arco-gravidade, com cerca de 600 metros de comprimento e 22 metros de altura, caracterizando-se como uma estrutura de grande porte voltada à geração de energia hidrelétrica. Tais obras hidráulicas exercem influência direta na hidrodinâmica local e na dinâmica de transporte de sedimentos, representando, portanto, elementos fundamentais para a caracterização e a modelagem do sistema fluvial da região.

Em resposta ao desastre ocorrido em Mariana (MG), intensificou-se o monitoramento quali-quantitativo das águas do rio Doce, visando acompanhar a recuperação da bacia hidrográfica. Como parte desse esforço, estações de monitoramento pré-existent foram modernizadas e novas unidades foram implantadas ao longo do curso do rio e de seus afluentes.

Nesse estudo, foram selecionadas as estações de monitoramento localizadas na área de confluência dos rios Manhuaçu e Doce. Os dados provenientes dessas estações foram encontrados na plataforma de Hidroweb da ANA (2024), sendo organizados em planilhas eletrônicas, classificando-se os registros por data e horário. As estações fluviométricas utilizadas, são: estação E1, localizada no município de Resplendor (MG), sob o código 56338340; a estação E2, no município de Aimorés (MG), com o código 56990005; e a estação E3, no município de Colatina (ES), sob o código 56994510. A partir desses dados, foram elaborados gráficos representativos das variáveis hidrossedimentológicas, com o intuito de identificar padrões sazonais, como períodos de estiagem, eventos de cheia e o momento exato da chegada dos rejeitos oriundos da ruptura da barragem de Fundão.

Com base nas séries temporais obtidas, foram geradas curvas de sedimentos e hidrogramas, que serviram de subsídio para a parametrização e simulação do modelo hidrodinâmico e transporte de sedimentos utilizado neste estudo. O Mapa 2 mostra a localização das estações de monitoramento analisadas.

Mapa 2 – Localização da área de estudo e das estações de monitoramento na área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.2 Metodologia

3.2.1 Obtenção e tratamento dos dados topográficos

Os levantamentos topográficos fundamentais para a realização de estudos hidrossedimentológicos, apresentam elevado custo e exigem um considerável tempo de execução, o que pode dificultar sua aplicação em projetos. Com o intuito de contornar essas limitações, adotou-se a integração entre dados primários, obtidos em campo, e dados secundários, provenientes de fontes institucionais e sensoriamento remoto.

Os dados topográficos principais foram adquiridos por meio de campanhas de levantamento em campo, utilizando equipamentos geodésicos de alta precisão, com foco nas áreas de maior relevância hidrodinâmica e no trecho da confluência. Para complementar, foram utilizados dados secundários obtidos por meio de consulta ao catálogo de metadados da ANA e de Modelos Digitais de Terreno (MDT) gerados a partir de imagens do satélite ALOSPALSAR-2.

A Figura 3 apresenta os equipamentos usados para a realização da campanha de levantamento de dados em campo. A obtenção de pontos georreferenciados foi realizada com o uso de receptores GNSS, modelo CS09, os quais asseguraram alta precisão espacial nos levantamentos topográficos. A caracterização dos parâmetros físico-químicos da água foi conduzida por meio de uma sonda multiparâmetro Hanna, modelo HI9828, que possibilitou a medição simultânea de variáveis como pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, turbidez e temperatura. Para o levantamento das seções transversais e das vazões nos trechos estudados, utilizou-se um medidor de vazão Qliner, adequado para medições em rios com diferentes profundidades e velocidades de escoamento. A coleta de sedimentos do fundo dos rios e das margens foi realizada com o auxílio de um amostrador de sedimentos tipo Van Veen, equipamento amplamente empregado em estudos sedimentológicos por sua eficiência na obtenção de amostras em ambientes aquáticos.

Figura 3 – Equipamentos usados no levantamento de dados no campo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Legenda: A) Amostrador Van Veen; B) Sondamultiparâmetro marca Hanna; C) Medidor de vazão OTTQliner; D) Receptor GNSS

Como complemento aos levantamentos realizados em campo, foram utilizados dados secundários obtidos a partir do Catálogo de Metadados da ANA, acessado por meio da plataforma do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Essa

plataforma disponibiliza um acervo abrangente de dados geográficos, hidrológicos e hidráulicos relacionados à hidrografia brasileira.

Neste estudo, foram empregados dados de seções topobatimétricas encontradas dentro da bacia hidrográfica do rio Doce, previamente coletados por uma empresa, contratada por uma associação entre instituições: ANA, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce CBH-DOCE, e o Instituto BioAtlântica (IBIO). Tais dados foram originalmente obtidos com o propósito de subsidiar estudos voltados à análise de cheias e à avaliação de riscos associados a potenciais rompimentos de barragens. A utilização dessas informações permitiu complementar as lacunas existentes nos levantamentos primários e reforçar a confiabilidade dos dados empregados na modelagem hidrossedimentológica.

Outra importante fonte de dados utilizada neste estudo foi o satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), lançado em janeiro de 2006 pela agência espacial japonesa *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Dentre os sensores embarcados no satélite, destaca-se o *Phased ArrayL-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR).

As imagens obtidas pelo sensor PALSAR foram processadas pelo programa *Alaska Satellite Facility* (ASF), que realizou a correção radiométrica e a geração de produtos altimétricos de alta resolução. O produto final consiste em um MDT com resolução de 12,5 metros, disponível gratuitamente por meio da plataforma ASF/NASA (ASF, 2022). Esses dados foram empregados como base complementar para a caracterização morfométrica da área de estudo.

3.3 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para a construção do MDE, foram utilizados dados provenientes do levantamento de campo, do metadados da ANA e do Modelo Digital de Terreno (MDT) obtido a partir do satélite ALOSPALSAR-2. O objetivo desse processo foi representar a superfície de escoamento dos rios, descrevendo com precisão as características físicas observadas na bacia hidrográfica. A criação do MDE foi dividida em duas etapas principais:

- a) tratamento dos dados: os dados topobatimétricos coletados em campo, juntamente com os dados do catálogo da ANA e do MDT, foram processados e integrados para garantir a consistência e a precisão da superfície gerada;

- b) criação das calhas dos cursos d'água: foi feita a interpolação das seções topobatimétricas para gerar as superfícies representando as calhas dos rios.

Esse procedimento permitiu a obtenção de um modelo detalhado da área de estudo, essencial para a análise hidrodinâmica e para o entendimento das dinâmicas de transporte de sedimentos e escoamento nos corpos d'água da região.

3.3.1 Simulação do transporte de sedimentos 2D

Os dados de entrada utilizados no modelo sedimentológico foram previamente processados e inseridos no editor sedimentológico do programa HEC-RAS. A equação de transporte de sedimentos aplicada no modelo foi a de Wu (2004), devido à profundidade dos rios da região de estudo, que é um fator determinante na escolha do modelo mais adequado para o cálculo do transporte de partículas. Para a classificação dos grãos de sedimento, foi adotada a equação do Copeland e Thomas (1989), se destacando pela sua capacidade de calcular com precisão o tamanho dos grãos, atendendo às necessidades do estudo. A equação de velocidade de queda utilizada foi a de Wu e Wang (2006), que considera o formato das partículas, proporcionando um modelo mais realista para o comportamento do sedimento em suspensão no fluxo hídrico.

A granulometria dos sedimentos foi determinada para cada curso d'água com base nos dados obtidos durante os levantamentos de campo, bem como nas informações provenientes das estações de monitoramento instaladas ao longo da bacia. A condição de contorno adotada para o modelo foi a de carga de equilíbrio, uma vez que as demais condições de contorno exigiriam dados que não foram coletados durante a pesquisa.

3.3.2 Simulação hidrodinâmica 2D

Os dados de entrada utilizados para a simulação hidrodinâmica foram previamente processados e inseridos no editor de dados geométricos do programa HEC-RAS. Para a criação das malhas computacionais, foi adotada uma resolução de 20 m x 20 m na calha principal e de 50 m x 50 m na calha secundária, de acordo com a complexidade da topografia e a necessidade de precisão para a modelagem.

Com base nos critérios propostos por Chow (1959), a seleção dos valores da rugosidade de Manning (n) foi realizada para as calhas principais e secundárias. Esses critérios consideram características físicas do canal, como a rugosidade do leito (n_0), irregularidades da seção transversal (n_1), variações na forma e no tamanho da seção transversal (n_2), ocorrência de obstáculos (n_3), vegetação presente no leito ou nas margens (n_4) e o grau de sinuosidade do curso d'água (m), conforme descrito na Equação (5).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (5)$$

Os hidrogramas utilizados na simulação foram inseridos por meio de tabelas extraídas das estações de monitoramento. A simulação hidrodinâmica abrangeu o período de 1º de janeiro de 2015 até o dia 31 de dezembro de 2020. Durante o processo de modelagem, não foram consideradas as estruturas hidráulicas, como pontes e bueiros, uma vez que essas não constituem o foco principal deste estudo.

3.3.4 Avaliação dos modelos

A calibração dos modelos hidrodinâmicos e transporte de sedimentos foi realizada de forma empírica, por meio de um processo de tentativa e erro. Sendo executada com o objetivo de obter o melhor ajuste entre os hidrogramas simulados e os observados nas estações de monitoramento.

A calibração morfológica do modelo de transporte de sedimentos foi realizada com base na comparação entre imagens do programa Google Earth Pro e os resultados da simulação. As calhas dos rios foram vetorizadas no Google Earth Pro, permitindo a comparação entre as áreas representadas nas imagens e os resultados simulados. No programa HEC-RAS, ajustes adicionais foram feitos na função de transporte e no método de cálculo da velocidade, a fim de refinar a calibração e melhorar a precisão dos resultados.

A calibração do modelo hidrodinâmico consistiu na variação do coeficiente de Manning em todas as seções, dentro de um intervalo entre 0,030 e 0,070. A seleção do coeficiente mais adequado foi executada por meio da comparação entre hidrograma simulado e hidrograma observado. As Equações (6), (7) e (8) apresentam a comparação entre o hidrograma simulado e observado, determinando o coeficiente de ajuste (r^2). A Equação (8) é

responsável por calcular a variação entre os valores observados e os simulados (Rangel, 2021).

$$SST = \sum(y - \bar{y})^2 \quad 6)$$

$$SSE = \sum(y - \hat{y})^2 \quad 7)$$

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad 8)$$

Onde: SST é soma total dos quadrados, SSE é soma quadrática do erro; \bar{y} é média dos valores observados; y é valor observado e; \hat{y} é o valor calculado/simulado.

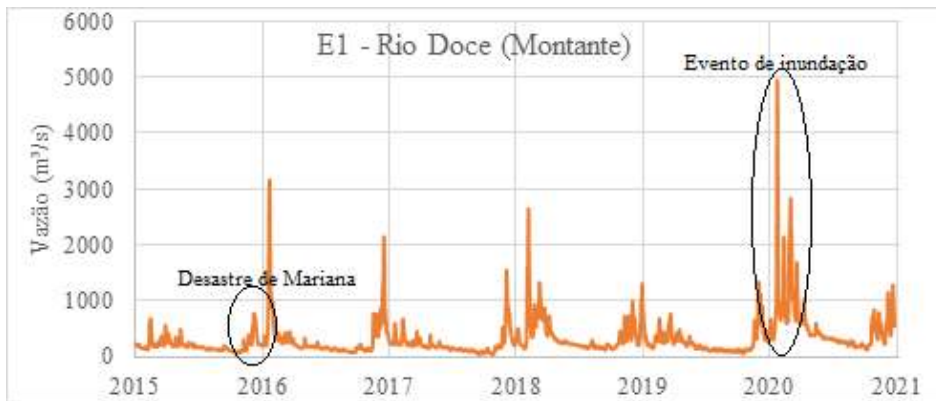
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estações de monitoramento

Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam os hidrogramas obtidos nas estações de monitoramento. A estação E1, localizada no rio Doce, registrou a passagem da onda de rejeitos de minério de ferro resultante do desastre de Mariana, ocorrido entre 16 de novembro de 2015 e 1º de dezembro de 2016. Em contraste, a estação E2, situada no rio Manhuaçu, não foi impactada por esse evento. Além disso, todas as três estações (E1, E2 e E3) detectaram um evento de inundação que aconteceu em janeiro de 2020. Os dados de vazão das estações E1 e E2 foram utilizados como entradas no programa HEC-RAS, enquanto os dados da estação E3 foram empregados para a calibração do modelo hidrodinâmico.

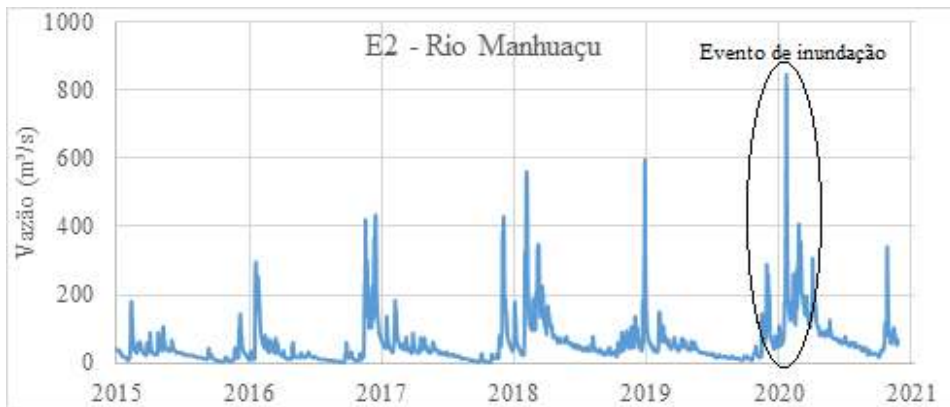
As estações de monitoramento utilizadas neste estudo têm sido empregadas de forma contínua para a elaboração de cotogramas e hidrogramas em pesquisas hidrológicas, hidrodinâmicas e sedimentológicas (Lemos *et al.*, 2022). Os estudos de Palu e Julien (2020) e Aires (2022) utilizaram a estação E1 para investigações sedimentológicas. Além disso, Aires *et al.* (2020) realizaram um estudo utilizando a estação E2 para pesquisas relacionadas a precipitações, vazões e secas. A estação E3 foi empregada na pesquisa do Goullart e Fan (2018), a qual foi realizada a análise de modelos de previsão de turbidez.

Gráfico 1 – Estação E1 do rio Doce (Jusante)



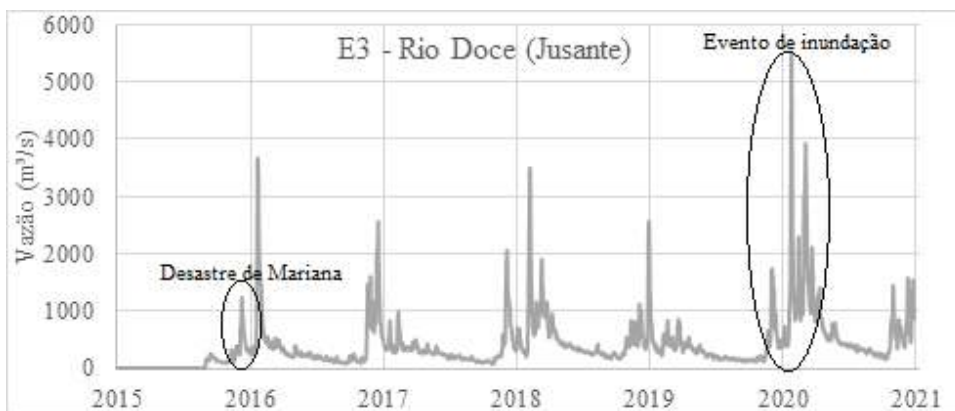
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Gráfico 2 – Estação E2 do rio Manhuaçu



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Gráfico 3 – Estação E3 do rio Doce (jusante)



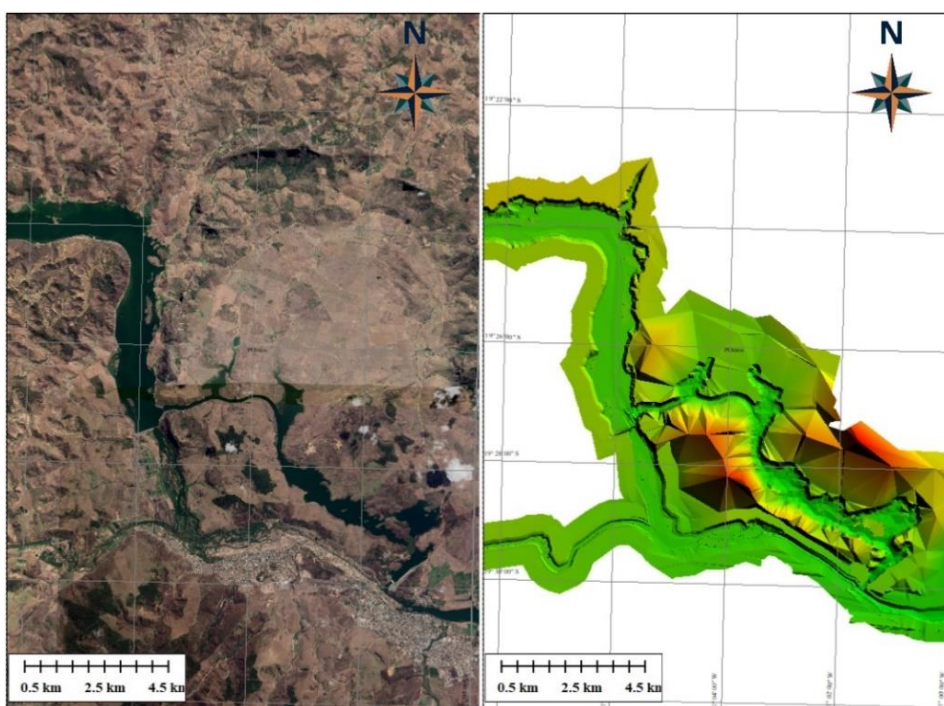
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

4.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

A análise do MDE evidenciou a presença de múltiplas ilhas ao longo do curso d'água, que exercem influência significativa sobre o padrão de escoamento e a distribuição de velocidades. Essas ilhas podem ser permanentes, constituídas por afloramentos rochosos, ou temporárias, resultantes da deposição de sedimentos durante eventos hidrológicos extremos (IMAGEM 1).

Goulart (2020) realizou simulações hidrodinâmicas bidimensionais no reservatório de Aimorés com base em MDEs obtidos por topobatimetria com resolução de 5 metros. Embora a resolução adotada no presente estudo seja inferior, a inclusão das ilhas com altitudes referenciadas ao nível do mar contribui para uma representação mais realista da área modelada, aproximando os resultados das condições físicas observadas na região.

Imagem 1 – MDE da confluência do rio Manhuaçu com rio Doce



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

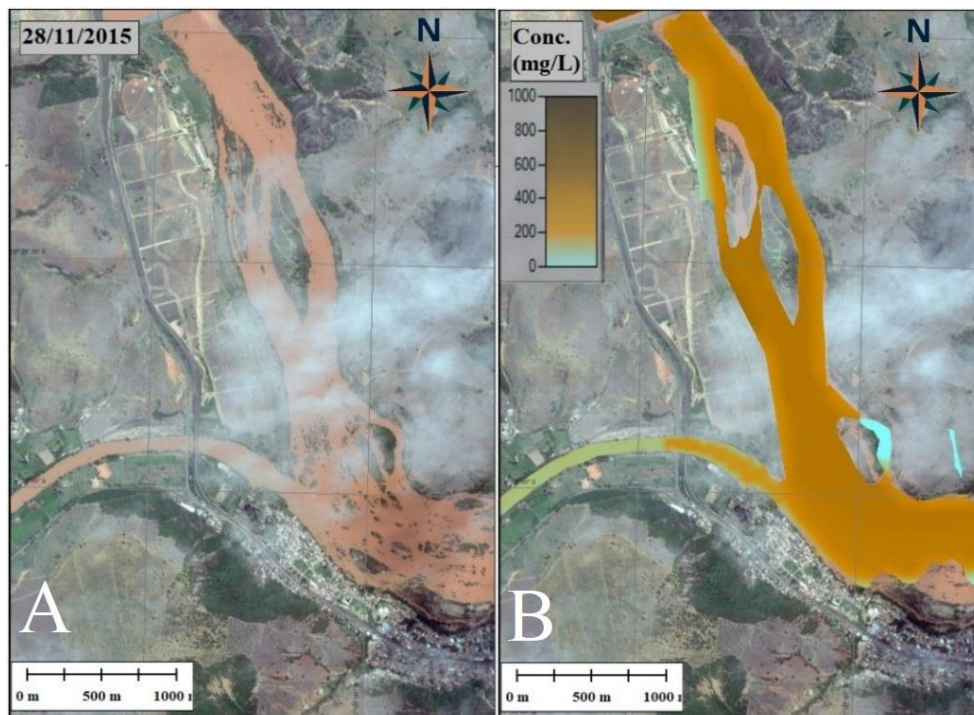
4.3 Avaliação dos modelos

A calibração da simulação do transporte de sedimentos 2D foi executada por meio da comparação qualitativa das imagens de satélite, visando avaliar a concentração e a deposição de sedimentos simulados em 28 de novembro de 2015, 23 dias após o desastre de Mariana. Naquela data, a concentração de sedimentos no reservatório da Usina Aimorés estava significativamente elevada. A Imagem 2 apresenta a comparação entre as imagens de satélite e a simulação do modelo para a mesma data na área de estudo, destacando os padrões de concentração e o campo de fluxo do escoamento.

As imagens de satélite de 28 de novembro de 2015 indicaram um aumento na área de inundação e uma maior concentração de sedimentos na confluência, com as águas do rio Doce adentrando o rio Manhuaçu. A simulação reproduziu esse fenômeno, mostrando o represamento das águas do rio Manhuaçu e o consequente aumento da concentração de sedimentos, validando a simulação com base nas imagens de satélite.

A modelagem do transporte de sedimentos revelou que os rejeitos são predominantes no rio Doce, indicando que o rio Manhuaçu não possui uma capacidade significativa para regenerar as águas do rio Doce em um curto período. Isso se deve à sua vazão, que corresponde a aproximadamente 20% da vazão média do rio Doce, limitando sua capacidade de recuperação da qualidade da água após o desastre.

Imagem 2 – Área da data de 28 de novembro de 2015 (A), resultado da modelagem do transporte de sedimento (B)

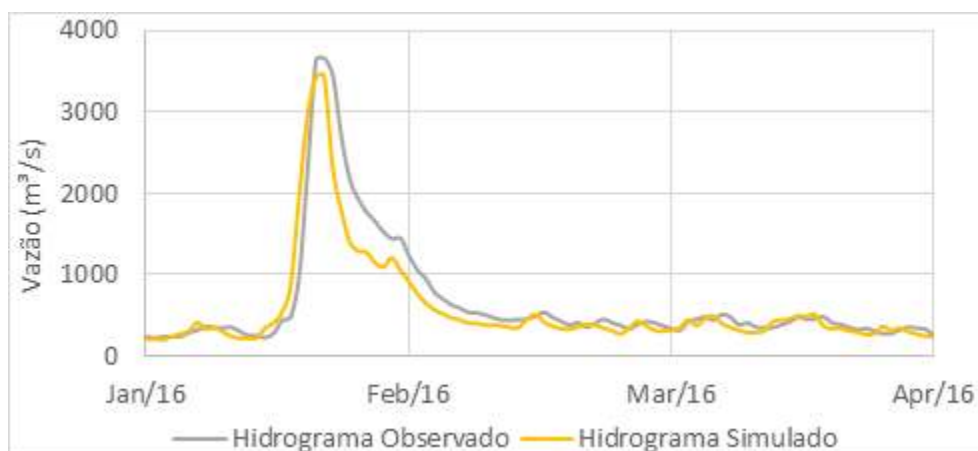


Fonte: Marciano (2024)

Para a calibração da simulação hidrodinâmica 2D foi ajustado o coeficiente de Manning, com valores calculados de 0,12 para as calhas secundárias e 0,45 para as calhas principais. O Gráfico 4 apresenta a comparação entre os hidrogramas simulado e observado pela estação E3 - rio Doce. A avaliação da modelagem foi considerada adequada, embora algumas diferenças tenham sido identificadas.

A diferença entre o pico observado e o simulado, mesmo com boa calibração em condições normais, pode ser explicada por fatores como incertezas nos dados de vazão, simplificações na topografia, parâmetros de rugosidade inadequados, além da ausência de estruturas hidráulicas (pontes, bueiros e barragens) e de processos hidráulicos complexos no modelo (transbordamentos, refluxos, armazenamento temporário em áreas alagadas e efeitos das estruturas hidráulicas). Também contribuem para essa diferença a não consideração das vazões dos afluentes e a falta de dados sobre as descargas dos reservatórios, controladas pelas usinas, que não foram incluídas na simulação. Esses fatores podem ter impactado os resultados, o que ocasionou as divergências em relação aos dados observados.

Gráfico 4 – Comparação dos hidrogramas (observado e simulado), pela estação E3 rio Doce

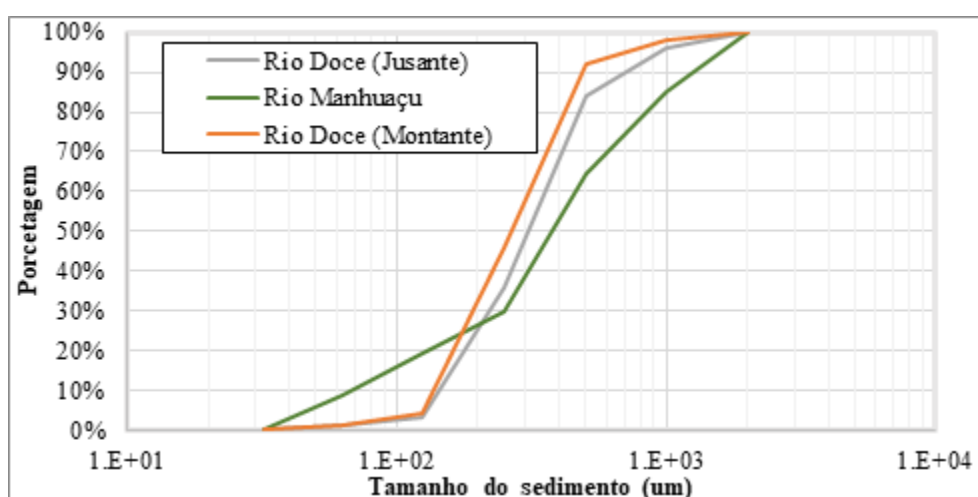


Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

4.4 Simulação do transporte de sedimentos 2D

A granulometria foi determinada com base nos dados processados pelas estações de monitoramento e nas informações obtidas por meio de coleta em campo. O Gráfico 5 mostra a distribuição granulométrica observada. Constatou-se que as granulometrias dos rios são semelhantes, entretanto, a percentagem de partículas de areia grossa e média do rio Manhuaçu é superior à do rio Doce.

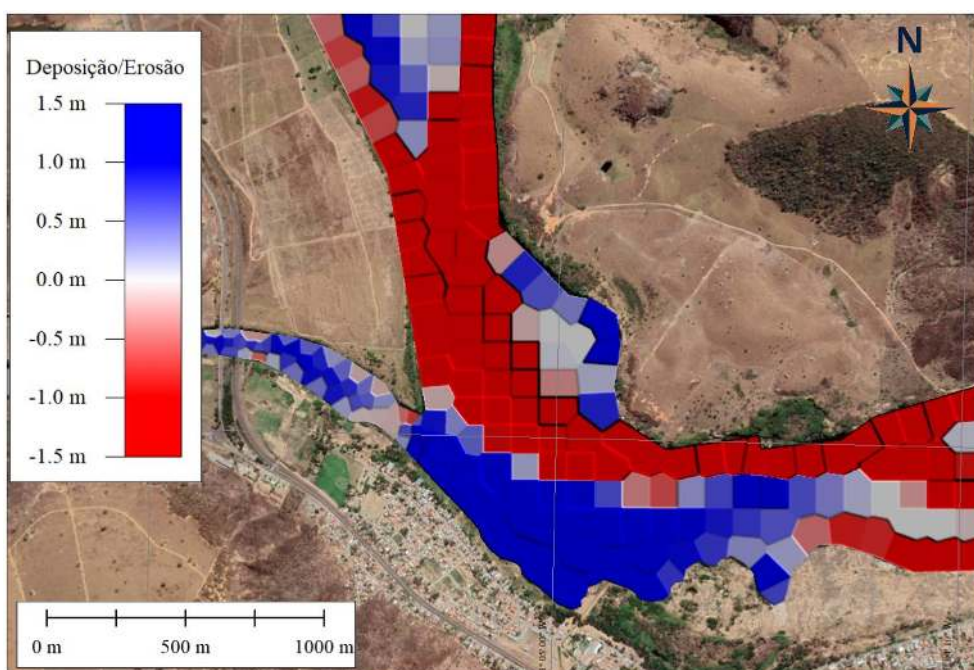
Gráfico 5 – Distribuição granulométrica dos rios



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A simulação do transporte de sedimentos mapeou os processos de erosão e deposição de sedimentos na confluência. A Imagem 3 mostra os locais de deposição e erosão de sedimentos identificados na análise. A simulação indicou que a margem direita, logo após a confluência, apresentou maior deposição de sedimentos. Este fenômeno pode ser atribuído à baixa declividade da área e à presença de ilhas, que influenciam o fluxo da água. Em contrapartida, nos trechos mais estreitos, foram observados processos de erosão. No período de cinco anos, registrou-se uma erosão média de 0,86 m e uma deposição média de sedimentos de 1,06 m nesse trecho.

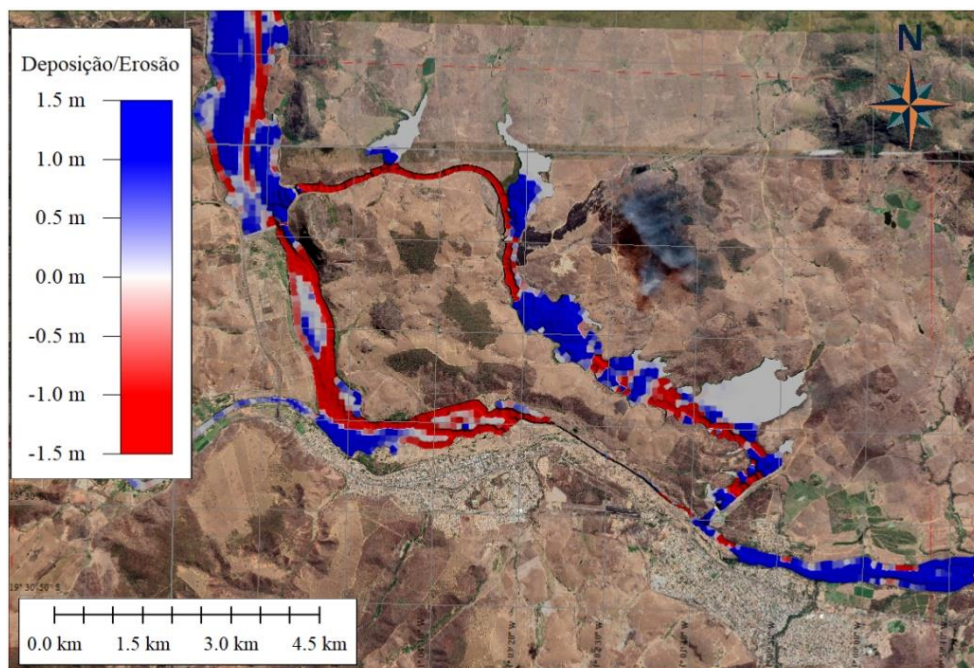
Imagem 3 – Área de deposição e de erosão na confluência do rio Manhuaçu com rio Doce



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A Imagem 4 apresenta a simulação, identificando um processo de assoreamento acelerado na represa de Aimorés, com acúmulo de 2,18 hectômetros cúbicos de sedimento ao longo de 5 anos. No canal de adução, observou-se erosão do início até o km 7, seguida de assoreamento entre os km 7 e 10, e novamente erosão até a Casa de Força. Entre a Casa de Força e o reservatório da usina Mascarenhas, houve um assoreamento acumulando 0,77 hectômetros cúbicos. Os assoreamentos podem ser explicados por ações antrópicas, como a exposição do solo, o desmatamento, a retificação de rios e o regime pluviométrico intenso.

Imagem 4 – Área de erosão e de deposição de sedimentos na confluência do rio Manhuaçu Grande com rio Doce



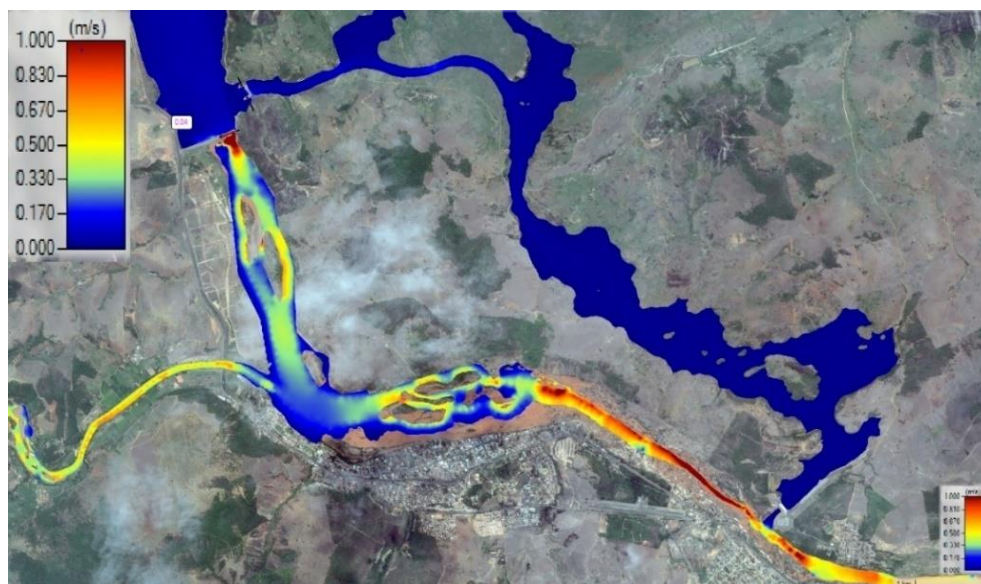
Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

4.5 Simulação hidrodinâmica 2D

A simulação foi atípica devido às condições topográficas da área, que apresentam dois canais de escoamento direcionados para os reservatórios, um canal largo e outro estreito. Os reservatórios em questão são gerenciados pelas usinas, que controlam as vazões conforme a produção de energia. Foram realizadas diversas tentativas para obter dados precisos diretamente das usinas, porém não foi dado retorno. Em virtude disso, as simulações foram realizadas com as comportas abertas.

A simulação do desastre de Mariana indicou que as águas do rio Manhuaçu foram represadas, resultando em um aumento de 0,48 m, sem ocorrer transbordamentos. A velocidade da água manteve-se estável após a confluência, variando conforme a geomorfologia do trecho: alta em regiões estreitas e reduzida em áreas represadas. A Imagem 5 mostra a extensão da inundação na zona urbana de Aimorés (MG), evidenciando os impactos locais.

Imagem 5 – Área de inundação do desastre de Mariana, município de Aimorés – MG



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

5 CONCLUSÕES

O modelo 2D de transporte de sedimentos no HEC-RAS, embora seja uma tecnologia recente e ainda pouco explorada, demonstrou ser uma ferramenta prática e de fácil utilização, devido às suas funcionalidades intuitivas. A simulação de transporte de sedimentos foi realizada com sucesso, apesar de o processamento ter sido demorado, em razão da vasta área de estudo e da grande quantidade de malhas geradas. Os resultados indicaram que, em um curto período, o rio Manhuaçu não possui vazão suficiente para diluir e misturar os sedimentos originados pelo desastre de Mariana.

O modelo do transporte de sedimentos 2D revelou o impacto significativo que as barragens geram no regime de transporte dos sedimentos. Nas barragens das usinas de Aimorés e Mascarenhas, foi observada uma aceleração dos processos de assoreamento. Durante o desastre, as comportas das barragens foram abertas, o que ajudou a mitigar os danos potenciais.

O modelo hidrodinâmico 2D mostrou-se eficaz, com hidrogramas simulados que apresentaram boa correlação com os hidrogramas observados. As áreas inundadas como resultado do desastre de Mariana foram consistentes com os dados encontrados na literatura e

nas imagens de satélite. As condições topográficas do terreno influenciaram significativamente a simulação, resultando em velocidades de escoamento mais lentas nos reservatórios e mais elevadas em trechos estreitos.

Para trabalhos futuros, sugere-se que as administrações das Usinas Hidrelétricas de Aimorés e Mascarenhas forneçam informações adicionais para os estudos acadêmicos e científicos. Esses estudos podem auxiliar na tomada de decisões em diversas áreas de interesse. Além disso, recomenda-se o monitoramento contínuo, tanto a curto, médio quanto a longo prazo, nas seções transversais das estações utilizadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DA ÁGUA (ANA). **Guia prático para pequenas barragens: manual do empreendedor sobre segurança em barragens**. Brasília: ANA, 2016. v. 3. Disponível em:

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. Acesso em: 05 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DA ÁGUA (ANA). **HidroWeb**: série histórica de estações. Sistema de Informação Hidrológica. 2024. Disponível em:

<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 05 jan. 2024.

AIRES, U. R. V. *et al.* Machine learning-based modeling of surface sediment concentration in Doce river basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 619, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129320>. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169423002627?casa_token=Lu4bOLCF4ZcAAAAA:hV2UkLCwIVvI99BqDS0DdFWOFbq0ndIT-WnckDpRJ2UrRK5diDVO8H6EUc1Qfu_gCKI5b7BhWq0, Acesso em: 05 jan. 2024.

AIRES, U. R. V. **Modelagem temporal e espacial da concentração superficial de sedimentos utilizando sensoriamento remoto orbital e aprendizado de máquina**. 2022.

Tese (Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/e70f9eeb-d815-499c-8345-4f2726ee6512>. Acesso em: 05 jan. 2024.

ANDRADE, A. C. F. **Mapeamento e caracterização do sistema rio-planície da Amazônia central via sensoriamento remoto e modelagem hidráulica**. Tese (Doutorado do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/211269>. Acesso em: 05 jan. 2024.

ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF). **ALOS PALSAR DEM** (Advanced Digital Satellite Elevation Model for Terrain Observation – L-Band Synthetic Aperture Radar). 2022. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 05 jan. 2024.

ÁVILA, J. P. *et al.* Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes. **Geotecnia**, 152, p. 435-464. 2021. DOI: https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_13. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/10013>. Acesso em: 05 jan. 2024.

AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2015. 632 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ejtRDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=Manual+de+hidr%C3%A1ulica+azevedo&ots=1uD5Ib6qGm&sig=gMM48OE1np80fUmKp5MRsmMYbZU>. Acesso em: 05 jan. 2024.

BARTELLI, G. **Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Arroio Garapiá – Maquiné, RS**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado. 2012. Disponível em: <http://www.univates.br/bdu/handle/10737/311>. Acesso em: 05 jan. 2024.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. *In*: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4 ed.. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ABRH), 2020. p. 915-943.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica, 2009. 166 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/295399806_Licoes_em_modelos_e_simulacoes_hidrologicas/link/56eca9c108aed17d09f66a81/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19. Acesso em: 05 jan. 2024.

CARVALHO, D. C. F. *et al.* Alterações de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte – MG: 2008 a 2018. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, 21, n. 76. 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1124515/1/Alteracoes-uso.pdf>. Acesso em: 05 Jan. 2024.

CHEN, Y.; FALCONER, R. A. Advection-diffusion modelling using the modified QUICK scheme. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, New Jersey, v. 15, p. 1171-1196. 1992. DOI: <https://doi.org/10.1002/flid.1650151003>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/flid.1650151003>. Acesso em: 05 jan. 2024.

CHEVALIER, G.G. *et al.* Silting in the Grand Canal in the Domain of Chantilly (Oise, France): catchment-scale hydrogeomorphological reconnaissance and local-scale hydro-sedimentary transport modelling. **Water**, Basel, v. 13, n.14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13141989>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/14/1989>. Acesso em: 05 jan. 2024.

CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. Nova York: McGraw-Hill Book Company, 1959. p. 507-510. Disponível em: <https://heidarpour.iut.ac.ir/sites/heidarpour.iut.ac.ir/files/u32/open.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2024.

CIRILO, J. A. *et al.* Suporte de informações georreferenciadas de alta resolução para implantação de infraestrutura e planejamento territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 4, p. 755-763. 2014. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/69b9/0d90c9427eaf7596b7066da6c00e0aa379b9.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2024.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH-DOCE). **Deliberação Normativa CBH-Doce nº 51/2016**. 2016. Disponível: <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: 05 jan. 2024.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce**: relatório 4: monitoramento especial da hidrometria, sedimentometria e qualidade da água da bacia do rio Doce nas estações fluviométricas da RHN após o rompimento da barragem de rejeitos. Belo Horizonte: CPRM, 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21590>. Acesso em: 05 jan. 2024.

CONSÓRCIO COPLAN-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**. Relatório final. v. 2. 2010. Disponível em: http://agerh.es.gov.br/Media/agerh/Documenta%C3%A7%C3%A3o%20CBHs/PIRH_Doce_Volume_II2.pdf. Acesso em: 05 Jan. 2024.

COPELAND, R.R.; THOMAS, W.A. **Lower Mississippi River Tarbert Landing to East Jetty sedimentation study**: numerical model investigation. Vicksburg, MS. EUA: US Army Water Ways Experimental Station, 1989. Technical report HI-92-6. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA254685.pdf> . Acesso em: 05 jan. 2024.

EVANGELISTA, H. *et al.* Using ND single bonds 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**, Amsterdam, v. 807. 2022. DOI: <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151231>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721063099?casa_token=zw51Kady3zoAAAAA:6CsdlTxBmG6eMhn5CIY9yqfI7td-YGVDbt8mYux93PwBQaFjCDnibvj8uJVwhsn5q-YV-D4ZB0. Acesso em: 05 jan. 2024.

FOESCH, M. D.S. *et al.* River water contaminations resulting from Mariana disaster, Brazil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 27. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.013218>. Disponível em: Acesso em: 05 jan. 2024.

GOULART, C. B.; FAN, F. M. Análise comparativa entre modelos de previsão de turbidez no rio Doce. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS. 13; Partículas nas Américas, 1., Vitória, ES. 2018. **Trabalho apresentado** [...] Vitória, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Camila-BergmannGoulart-2/publication/355167792_ANALISE_COMPARATIVA_ENTRE_MODELOS_DE_PREVISAO_DE_TURBIDEZ_NO_RIO_DOCE/links/6162f2dde7993f536cb9ce59/ANALISE-COMPARATIVA-ENTRE-MODELOS-DE-PREVISAO-DE-TURBIDEZ-NORIO-DOCE.pdf. Acesso em: 05 Jan. 2024.

HOLLY J, F.M.; PREISSMANN, A. Accurate calculation of transport in two dimensions. **Journal of the Hydraulics Division**, Reston, v. 103, n. 11, p. 1259-1277. 1977. DOI: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004870>. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JYCEAJ.0004870>. Acesso em: 05 jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE (IBAMA). **Relatório Técnico Preliminar: impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Brasília, 2016. Disponível em: <https://am37.files.wordpress.com/2016/01/laudo-preliminardo-ibama-sobre-mariana.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2024.

LEMOS, A.T. *et al.* 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**, São Paulo, v.70, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ocr/a/prcWP5mMLz773zByFFRjYdg/abstract/?lang=en>. Acesso: 05 jan. 2024.

MARCIANO, A. G. **Caracterização da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos dos três principais afluentes do rio Doce**. 2024. Tese (Doutorado em meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024. Disponível: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFEL_2801e5231ec9dceb3b894a60e4be52fe. Acesso: 05 jan. 2024.

MAURI, G. D.N. *et al.* Uma análise da pesca artesanal e o rompimento da barragem de rejeitos da mineração mm Mariana, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 15, n.7, ed. esp. 2019. DOI: <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v15i7.5258>. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/5258>. Acesso em: 05 Jan. 2024.

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. DOI: <http://dx.doi.org/10.21079/11681/44561>. Disponível em: <https://erdc-library.erdc.dren.mil/items/53fa5b88-d642-479e-a8d3-34f33b20ac86>. Acesso em: 05 jan. 2024.

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**, Reston, v. 145, n. 5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1061/ASCEHY.1943-7900.0001582>. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001582?casa_token=zZkm5A9NOXYAAAAA%3Ad-X3QZZD05H8u1fS6gTsNc6bEpUZ1m2w_aMxAXNPsWNHd1S-CmudaWG3JPK-XwxLjWl6Y0spCVHT. Acesso em: 05 Jan. 2024.

PATRIADI, A. *et al.* The influence of Sembayat weir on sediment transport rate in the estuary of Bengawan Solo River, Indonesia. **GEOMATE Journal**, Japan, v. 20, n. 81, p. 35-43. 2021. Disponível em: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/183/1195>. Acesso em: 05 jan. 2024.

RANGEL, B. D. Á. **Comportamento morfológico no delta do rio Magdalena (Colômbia) devido as variações da vazão em escala intra e interanual**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl/THESIS/10002785/doutorado_borisavila_20220304081600403.pdf. Acesso em: 05 jan. 2024.

SANTANA, F. C. *et al.* Water quality of the Gualaxo do Norte and Carmo rivers after the collapse of the Fundão dam, Mariana, MG. **Water, Air, & Soil Pollution**, Berlin, v. 232, n. 155, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05113-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-021-05113-3>. Acesso em: 05 jan. 2024.

VERÇOSA, L. F. D. M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/36835>. Acesso em: 05 Jan. 2024.

WU, W. Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 130, n. 10, p. 1013-1024. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292004130:101013>. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:10\(1013\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(1013)). Acesso em: 05 jan. 2024.

WU, W.; WANG, S. S. Formulas for sediment porosity and settling velocity. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 132, n. 8, p. 858-862. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292006132:8858>. Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282006%29132%3A8%28858%29?casa_token=2ztS2qP8IzAAAAA%3Amm8QnDPCWUvJBJ1qmE5b1Sqr5DQpAuzZF8Kgh68L3Bd1KZDisTS_hdXHD30GSjBIVoKQe0A2472. Acesso em: 05 jan. 2024.