


Modelización bidimensional del transporte de sedimentos en la confluencia de los ríos Suaçuí Grande y Doce tras el desastre de Mariana–MG, Brasil*

Alexandre Germano Marciano[>] Pedro Jessid Pacheco Torres^Y Alessandro Luvizon Bérghamo^V Alexandre Augusto Barbosa^S Pollyana dos Reis Mendes Marciano[‡] 

Resumen

El 5 de noviembre de 2015, en Mariana (Minas Gerais, Brasil), ocurrió el mayor desastre de presa de relaves del país, con la ruptura de la represa de Fundão. El colapso liberó 32 millones de metros cúbicos de relaves, excluyendo el agua, y generó un fuerte impacto socioeconómico y ambiental, especialmente en el río Doce. Desde entonces, numerosos estudios han buscado comprender y mitigar los efectos del desastre. Una de las estrategias empleadas para analizar la dinámica del evento ha sido el uso de modelos hidrodinámicos. Se parte de la hipótesis de que los afluentes pueden contribuir a la recuperación del río Doce al aportar caudales con menor concentración de sólidos en suspensión. Para evaluar este papel, se aplicaron modelos hidrodinámicos 2D y de transporte de sedimentos 2D en la confluencia entre el río Suaçuí Grande y el río Doce. El modelo hidrodinámico 2D representó adecuadamente la zona inundada. Por su parte, el modelo de transporte de sedimentos mostró que flujos rápidos favorecen la erosión, mientras que los flujos lentos promueven la deposición. Aunque las confluencias suelen contribuir en la mejora de la calidad del agua, el río Suaçuí Grande desempeña un papel limitado debido al mayor caudal y profundidad del río Doce.

Palabras-chave: HEC-RAS, modelo hidrodinámico 2D, modelo de transporte de sedimentos 2D, presa de relevés de Fundão, río Doce.

Ideas destacadas: artículo de investigación que analiza la influencia del río Suaçuí Grande en la recuperación del río Doce tras el colapso de la represa de Fundão, mediante modelos bidimensionales de hidrodinámica y transporte de sedimentos. Los resultados indican que, aunque las confluencias fluviales suelen favorecer la dilución y mejorar la calidad del agua, la capacidad del Suaçuí Grande es limitada frente al mayor caudal y profundidad del río Doce, restringiendo su efecto en la recuperación ambiental.



RECIBIDO: 25 DE ABRIL DE 2023. | EVALUADO: 29 DE AGOSTO 2023. | ACEPTADO: 14 DE NOVIEMBRE DE 2024.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Marciano, Alexandre Germano; Pacheco Torres, Pedro Jessid; Bérghamo, Alessandro Luvizon; Barbosa, Alexandre Augusto; Marciano, Pollyana dos Reis Mendes. 2025. “Modelización bidimensional del transporte de sedimentos en la confluencia de los ríos Suaçuí Grande y Doce tras el desastre de Mariana–MG, Brasil”. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 34 (1Supl.): **-**. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v34n1supl.108526>.

* Esta investigación es resultado del proyecto “Caracterización de la hidrodinámica y transporte de sedimentos de los tres principales afluentes del río Doce” del Laboratorio de Información Hídrica de la Universidad Federal de Itajubá (MG) y no recibió financiación externa.

[>] Universidad Federal de Itajubá, Minas Gerais – Brasil. ✉ agermano@unifei.edu.br – ORCID: 0000-0002-7906-0457.

^Y Universidad de Lima, Lima – Colombia. ✉ pjessid21@hotmail.com – ORCID: 0000-0002-7609-4598.

^V Universidad Federal de Itajubá, Minas Gerais – Brasil. ✉ luvizon.bergamo@unifei.edu.br – ORCID: 0009-0007-9988-6620.

^S Universidad Federal de Itajubá, Minas Gerais – Brasil. ✉ barbosa@unifei.edu.br – ORCID: 0000-0003-3585-0489.

[‡] Universidad Federal de Itajubá, Minas Gerais – Brasil. ✉ pollyana@unifei.edu.br – ORCID: 0009-0000-5363-0194.

✉ Correspondencia: Avenida BPS, 1303 Pinheirinho Itajuba (MG) – Brasil 37500-903.

Bidimensional Modeling of Sediment Transport at the Confluence of the Suaçuí Grande and Doce Rivers after the Mariana Disaster—MG, Brazil

Abstract

On November 5, 2015, in Mariana (Minas Gerais, Brazil), the country's largest tailings dam disaster occurred with the rupture of the Fundão dam. The collapse released 32 million cubic meters of tailings, excluding water, causing severe socioeconomic and environmental impacts, especially in the Doce River. Since then, numerous studies have sought to understand and mitigate the effects of the disaster. One of the strategies used to analyze the dynamics of the event has been the application of hydrodynamic models. This study assumes that tributaries can contribute to the recovery of the Doce River by supplying flows with lower suspended sediment concentrations. To assess this role, two-dimensional (2D) hydrodynamic and sediment transport models were applied to the confluence between the Suaçuí Grande and Doce rivers. The 2D hydrodynamic model adequately represented the flooded area, while the sediment transport model showed that faster flows favor erosion, whereas slower flows promote deposition. Although river confluences usually contribute to improving water quality, the Suaçuí Grande River plays a limited role due to the greater flow and depth of the Doce River.

Keyword: HEC-RAS, 2D hydrodynamic model, 2D sediment transport model, Fundão tailings dam, Doce River.

Highlights: the study investigates how tributaries, especially the Suaçuí Grande River, influence the recovery of the Doce River after the Fundão dam collapse, using 2D hydrodynamic and sediment transport modeling. The results show that although river confluences usually help with dilution and water quality improvement, the Suaçuí Grande has limited influence due to the greater flow and depth of the Doce River.

Modelagem bidimensional do transporte de sedimentos na confluência dos rios Suaçuí Grande e Doce após o desastre de Mariana—MG, Brasil

Resumo

Em 5 de novembro de 2015, em Mariana (Minas Gerais, Brasil), ocorreu o maior desastre de barragem de rejeitos do país, com o rompimento da barragem de Fundão. O colapso liberou 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos, excluindo a água, causando severos impactos socioeconômicos e ambientais, especialmente no rio Doce. Desde então, numerosos estudos têm buscado compreender e mitigar os efeitos do desastre. Uma das estratégias empregadas para analisar a dinâmica do evento tem sido a utilização de modelos hidrodinâmicos. Parte-se da hipótese de que os afluentes podem contribuir para a recuperação do rio Doce ao fornecer vazões com menor concentração de sólidos em suspensão. Para avaliar esse papel, foram aplicados modelos bidimensionais (2D) hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos na confluência entre os rios Suaçuí Grande e Doce. O modelo hidrodinâmico 2D representou adequadamente a área inundada, enquanto o modelo de transporte de sedimentos mostrou que fluxos rápidos favorecem a erosão, ao passo que fluxos lentos promovem a deposição. Embora as confluências fluviais geralmente contribuam para a melhoria da qualidade da água, o rio Suaçuí Grande exerce um papel limitado devido à maior vazão e profundidade do rio Doce.

Palavras-chave: HEC-RAS, modelo hidrodinâmico 2D, modelo 2D de transporte de sedimentos, Barragem de rejeitos de Fundão, rio Doce.

Ideias destacadas: este artigo de pesquisa analisa a influência do rio Suaçuí Grande na recuperação do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, por meio de modelos bidimensionais de hidrodinâmica e transporte de sedimentos. Os resultados indicam que, embora as confluências fluviais geralmente favoreçam a diluição e melhorem a qualidade da água, a capacidade do Suaçuí Grande é limitada em comparação com a maior vazão e profundidade do rio Doce, restringindo seu efeito na recuperação ambiental.

Introducción

El 5 de noviembre de 2015, en el municipio de Mariana, Minas Gerais (Brasil), se rompió la represa de Fundão, una estructura de 120 metros de altura diseñada para almacenar relaves de minería de hierro (Ávila et ál. 2021). Esta ruptura provocó el mayor desastre ambiental de la historia de Brasil (Bowker Associates, Science & Research 2015; Foesch et ál. 2020). El colapso liberó 32 millones de metros cúbicos de residuos, sin incluir el agua (IBAMA 2015), generando una ola de inundación que superó la represa de relaves de Santarém, ubicada aguas abajo. Posteriormente, la ola golpeó el distrito de Bento Rodrigues, cubriéndolo con lodo y escombros de mineral de hierro, y causando la muerte de 19 personas (Dias et ál. 2019; Pereira, 2020).

La ola de inundación atravesó las llanuras del arroyo Santarém, el río Gualaxo do Norte y el río Carmo, arrastrando vegetación y parte del suelo, hasta alcanzar un área de 15 km² y recorrer 70 km hasta desembocar el río Doce. A lo largo del curso de este río, recorrió aproximadamente 570 km, atravesando cuatro embalses de centrales hidroeléctricas antes de llegar al océano Atlántico (ANA 2016).

De acuerdo con Samarco S.A., empresa responsable de la represa de Fundão, aproximadamente el 90 % del material derramado se depositó entre esta represa y la de Risoleta Neves, a lo largo de 118 km (IBAMA 2015). Sin embargo, el material remanente alcanzó el río Doce, generando una alta concentración de sólidos en suspensión y causando un enorme daño ambiental, a pesar de que los estudios de campo demostraron que el lodo no era tóxico (CPRM y ANA, 2016).

Esta perturbación ocasionó graves impactos sobre pescadores, pueblos indígenas y otras poblaciones ribereñas, que perdieron sus viviendas y sus medios de vida (Mauri et ál. 2019). Se estima que murieron alrededor de tres toneladas de peces y que la alta turbidez del agua provocó la suspensión del suministro en doce ciudades, afectando a una población aproximada de 424.000 habitantes (IBAMA 2015; ANA 2016; Bandini et ál. 2019; Reis, Peter y Santiago 2020; Mendes y Boeira 2022; Pereira et ál. 2022).

Desde entonces, múltiples investigaciones se han orientado a comprender y mitigar los impactos del desastre. Saadi y Campos (2015) trazaron la trayectoria de la avalancha de lodo y los daños asociados; Silva, Ferreira y Scotti (2015) analizaron los efectos sobre la vegetación y el suelo. Santos et ál. (2022) documentaron las afectaciones en las actividades agrícolas. Carvalho et ál. (2020)

evaluaron la contaminación de las aguas del río Doce por metales pesados, mientras que Evangelista et ál. (2022) comprobaron que los residuos recorrieron 250 km hasta llegar al Parque Nacional de Abrolhos, en Bahía, causando daños irreparables al ecosistema marino.

Los perjuicios económicos, sociales, culturales y ambientales derivados del colapso de la represa persisten en toda la cuenca hasta la actualidad, especialmente en lo referente a la potabilidad del agua del río Doce destinadas al abastecimiento urbano. Se estima que los costos de limpieza y restauración ascienden aproximadamente USD 54 mil millones (García et ál. 2017; Burritt y Christ 2018).

Además de estos estudios, diversas entidades gubernamentales han desarrollado e intensificado proyectos para monitorear la calidad del agua en el río Doce. El Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), a través del Proyecto *Águas de Minas*, reforzó el monitoreo de la calidad de las aguas superficiales en el río Doce, seleccionando los parámetros de análisis con base en las características de los relaves (IGAM 2017).

El Servicio Geológico de Brasil (SGB) y la Agencia Nacional de Aguas (ANA) realizaron múltiples mediciones para observar la evolución de la onda de inundación y su elevada turbidez, recolectando datos sobre caudal, nivel de agua, temperatura, oxígeno disuelto (OD), hidrógeno potencial (pH), turbidez, granulometría y concentración de sedimentos en suspensión (CPRM y ANA 2016).

La Fundación Renova, entidad encargada de gestionar los recursos para reparar los daños ocasionados por el desastre, coordina el *Programa de Monitoreo Sistemático Cualitativo-Cuantitativo de Aguas y Sedimentos* (PMQQS). Este programa, de carácter permanente, incluye la evaluación de riesgos toxicológicos y ecotoxicológicos, a través de 59 estaciones de monitoreo (Santana et ál. 2021).

La disponibilidad de este tipo de datos tras la falla de una presa de relaves es poco común en la literatura (Palú y Julien 2019). La mayoría de las investigaciones sobre este tipo de fallas se concentran en describir las características de las inundaciones (Liu, Merwade y Jafarzadegan 2019; Helwa, Elgamel y Ghanem 2020; Urzica et ál. 2021; Liu y Bharath et ál. 2021; Kumar et ál. 2021; Abdelghani 2023; Nistoran, Ionescu y Simionescu 2023). Existen pocas publicaciones que aborden el transporte de sedimentos y la calidad del agua en cauces naturales después de estos eventos, especialmente en zonas de confluencias.

Por ello, el estudio del transporte de sedimentos y la dispersión de contaminantes en cuerpos de agua tras la ruptura de presas de relaves constituye una valiosa

oportunidad de análisis. El caso del desastre en Mariana–MG destaca tanto por sus devastadoras consecuencias como por el hecho de que el método de almacenamiento de relaves utilizado es el más común en la industria minera (Palú y Julien 2019).

Una forma de comprender la dinámica del desastre de Mariana desde una perspectiva hidrodinámica es mediante el uso de modelos. Los modelos son representaciones físicas o matemáticas de la realidad que buscan reproducir los procedimientos y comportamientos de un sistema con el fin de predecir sus respuestas (Marciano 2019).

El modelo hidrodinámico permite representar matemáticamente la escorrentía, delimitar y medir las áreas inundables, además de estimar los caudales máximos, niveles máximos y velocidades del agua (Marciano et ál. 2018). Por su parte, el modelo de transporte de sedimentos posibilita simular tramos de río considerando procesos de erosión y deposición, lo que puede modificar la geometría del cauce (Joshi et ál. 2019; Patriadi et ál. 2021). Ambos tipos de modelos constituyen herramientas esenciales para el diseño de futuros proyectos de ingeniería y la toma de decisiones (Bressan et ál. 2020; Rahman y Chakrabarty 2020; Chevalier et ál. 2021).

En este contexto, comprender la hidrodinámica y sus implicaciones en la calidad del agua y el transporte de sedimentos en las zonas de confluencia resulta esencial para entender el proceso de recuperación del río Doce.

Partiendo del desastre de Mariana–MG, se plantea que los afluentes contribuyan a mejorar la calidad del agua del río Doce gracias a sus caudales y a la menor concentración de sólidos en suspensión. Para analizar el papel de los afluentes en la recuperación del río, se aplicaron modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos en la confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce. El propósito fue caracterizar e interrelacionar ambos procesos, generando información útil para las acciones

de recuperación, así como para la implementación de medidas preventivas y de mitigación ante posibles rupturas futuras.

Materiales y métodos

Esta sección se divide en dos partes: la primera presenta el área de estudio, que incluye información general sobre la cuenca del río Doce y sus principales afluentes; la segunda describe la metodología utilizada para la simulación y el análisis, basada en datos de estaciones de monitoreo y información topográfica.

Área de estudio

Cuenca del río Doce

La cuenca hidrográfica del río Doce (BHRD) se localiza en la región sureste de Brasil, entre los paralelos 17°45' y 21°15' S y los meridianos 39°30' y 43°45' O, dentro de la región hidrográfica del Atlántico Sudeste (Figura 1). La mayor parte del área de drenaje pertenece al estado de Minas Gerais (86 %), mientras que el 14 % restante corresponde al estado de Espírito Santo. En total, la cuenca abarca una superficie de 82.600 km² e involucra a 230 municipios (CBH DOCE 2016).

El curso principal del río Doce tiene una longitud de 888 km y se forma de la confluencia de los ríos Piranga y Carmo. El río Piranga nace en la Serra das Vertentes —situada entre las sierras de Mantiqueira y Espinhaço—, a una altitud de aproximadamente 1.200 metros, y desemboca en el río Carmo. A partir de esta confluencia se forma el río Doce, que recorre 570 km hasta su desembocadura en el océano Atlántico. Sus principales afluentes en la margen izquierda son los ríos Piracicaba, Suaçuí Grande, Suaçuí Pequeno, Santo Antônio y São José; en la margen derecha, los ríos Caratinga, Manhuaçu y Guandu (Coelho, Matos y Davis 2022; Consórcio Ecoplan-Lume 2010).

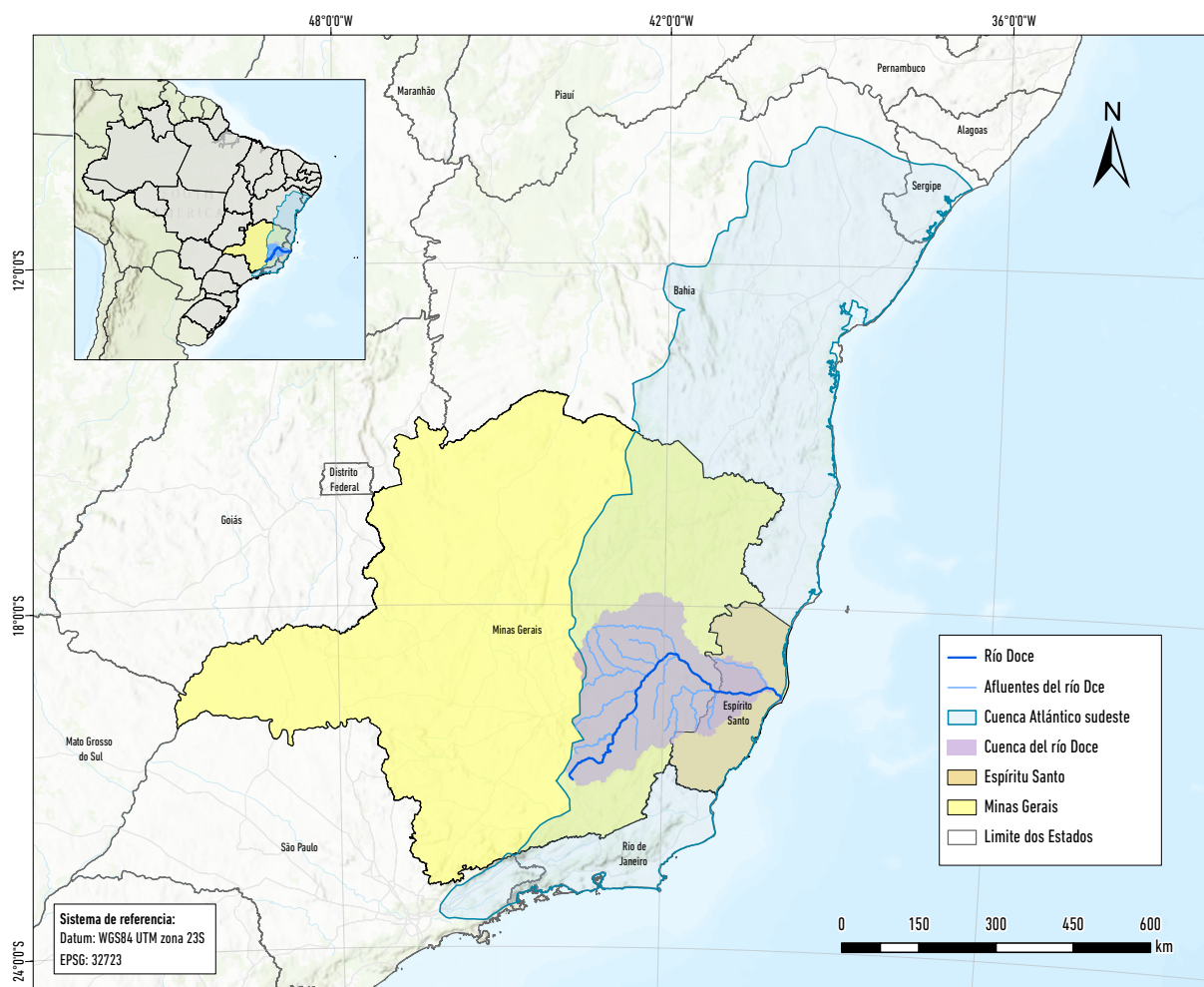


Figura 1. Localización de la cuenca del río Doce.

Confluencias

El estudio se centra en la confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce, localizada en el Cuadrángulo de Hierro, una región del centro-sur del estado de Minas Gerais reconocida por su alta producción de hierro bruto. Esta zona de estudio abarca dos vertientes:

1. Cuenca del río Suaçuí Grande, con un perímetro de 1.048 km y un área de drenaje de 12.659 km². El río Suaçuí Grande nace de la unión del río Suaçuí y Turvo Grande, en el municipio de Paulistas, y recorre 372 km hasta su desembocadura en el río Doce,

en Governador Valadares. Sus principales afluentes son los ríos Urupuca, Cocaís, Surubim, Itambacuri, Turvo Grande, São José y Bugre (Moreira, Andrade y Gonçalves 2020).

2. Cuenca del río Doce hasta la confluencia con el río Suaçuí Grande, con un perímetro de 1.763 km y un área de drenaje de 40.963 km².

La Figura 2 muestra la localización general de la cuenca del río Doce y sus principales afluentes, mientras que la Figura 3 presenta el área de estudio en detalle, indicando las ciudades de Governador Valadares y Tumiritinga, además de los ríos Doce, Suaçuí Grande y otros tributarios.

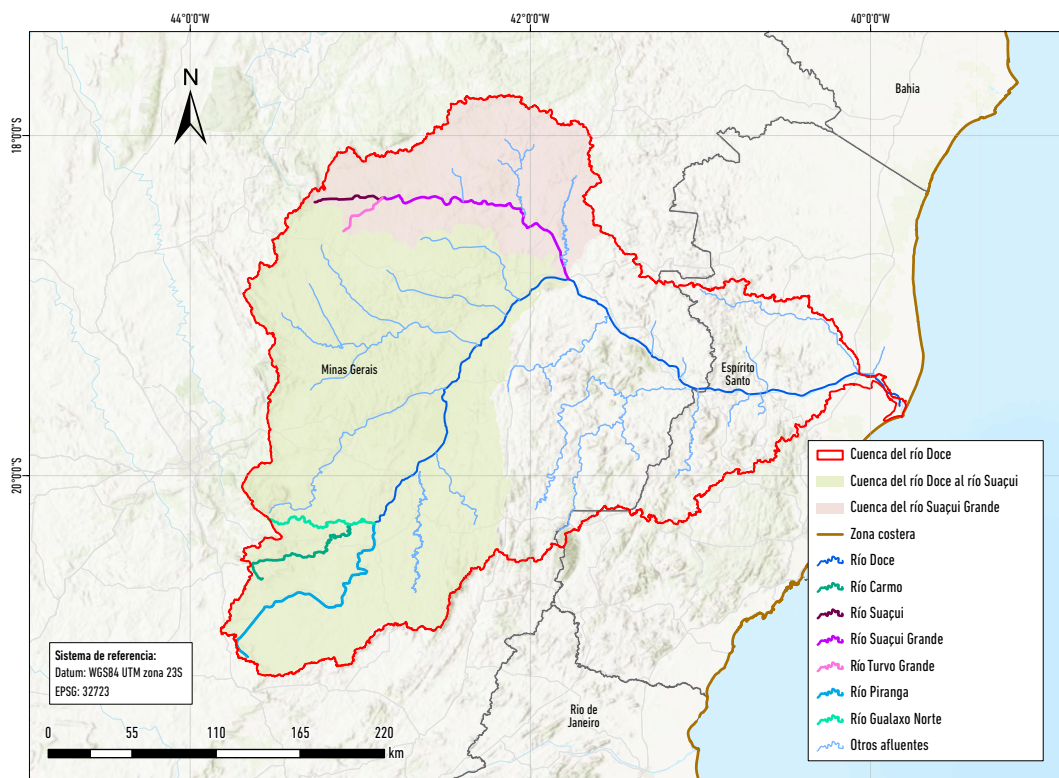


Figura 2. Localización del área de estudio, confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce.

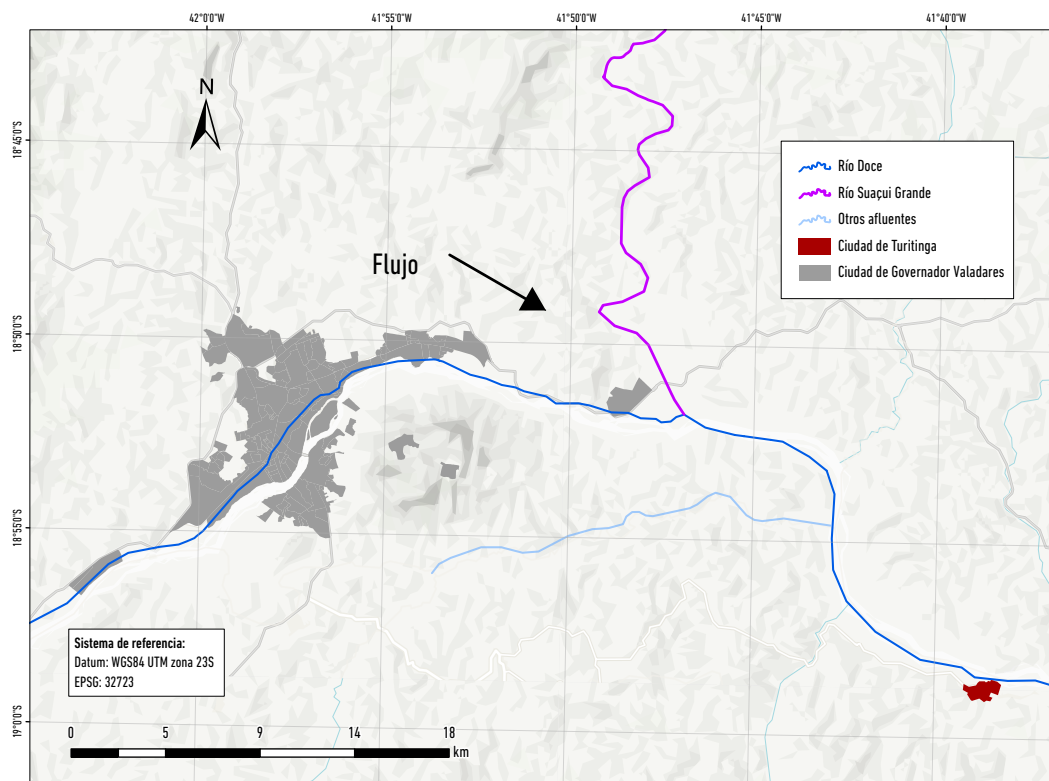


Figura 3. Localización del área de estudio, confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce.

Metodología

En esta sección se describen los procedimientos y etapas seguidas para la obtención y el procesamiento de los datos utilizados en el modelado computacional. Las actividades metodológicas se desarrollaron en cinco fases: (i) recopilación de datos de estaciones de monitoreo; (ii) obtención de datos topográficos; (iii) modelización hidrodinámica bidimensional; (iv) modelización del transporte de sedimentos y la evaluación de resultados.

Recopilación de datos de estaciones de monitoreo

Tras el desastre de Mariana, se intensificó el monitoreo de la calidad y cantidad de agua en el río Doce. Se actualizaron las estaciones existentes y se instalaron nuevas unidades para acompañar, a lo largo del tiempo, el proceso de recuperación de la cuenca. Un ejemplo destacado es el *Programa de Monitoreo Cualitativo-Cuantitativo Sistemático*

de Agua y Sedimentos (PMQQS), implementado el 31 de julio de 2017.

En este estudio se emplearon datos hidrológicos, sedimentológicos y de calidad del agua disponibles en la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN) de la ANA y datos del PMQQS.

PMQQS cuenta con 2 tipos de estaciones de monitoreo (Figura 4):

1. Las estaciones tipo I, de estructura más simples, que registra la temperatura del aire, el nivel del río y la precipitación.
2. Las estaciones tipo II, de configuración más avanzada, equipada con sondas multi-paramétricas para medir la temperatura del aire y del agua, el nivel del río, la cantidad de lluvia, la turbidez, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica, el pH, la presencia de cianobacterias y la concentración clorofila *a*.



Figura 4. Tipos de estaciones de monitoreo PMQQS.

Las estaciones ubicadas aguas arriba de las confluencias se emplearon como puntos de entrada de datos para la generación del modelo, mientras que las situadas aguas

abajo se utilizaron en el proceso de calibración, tal como se muestra en la Figura 5.

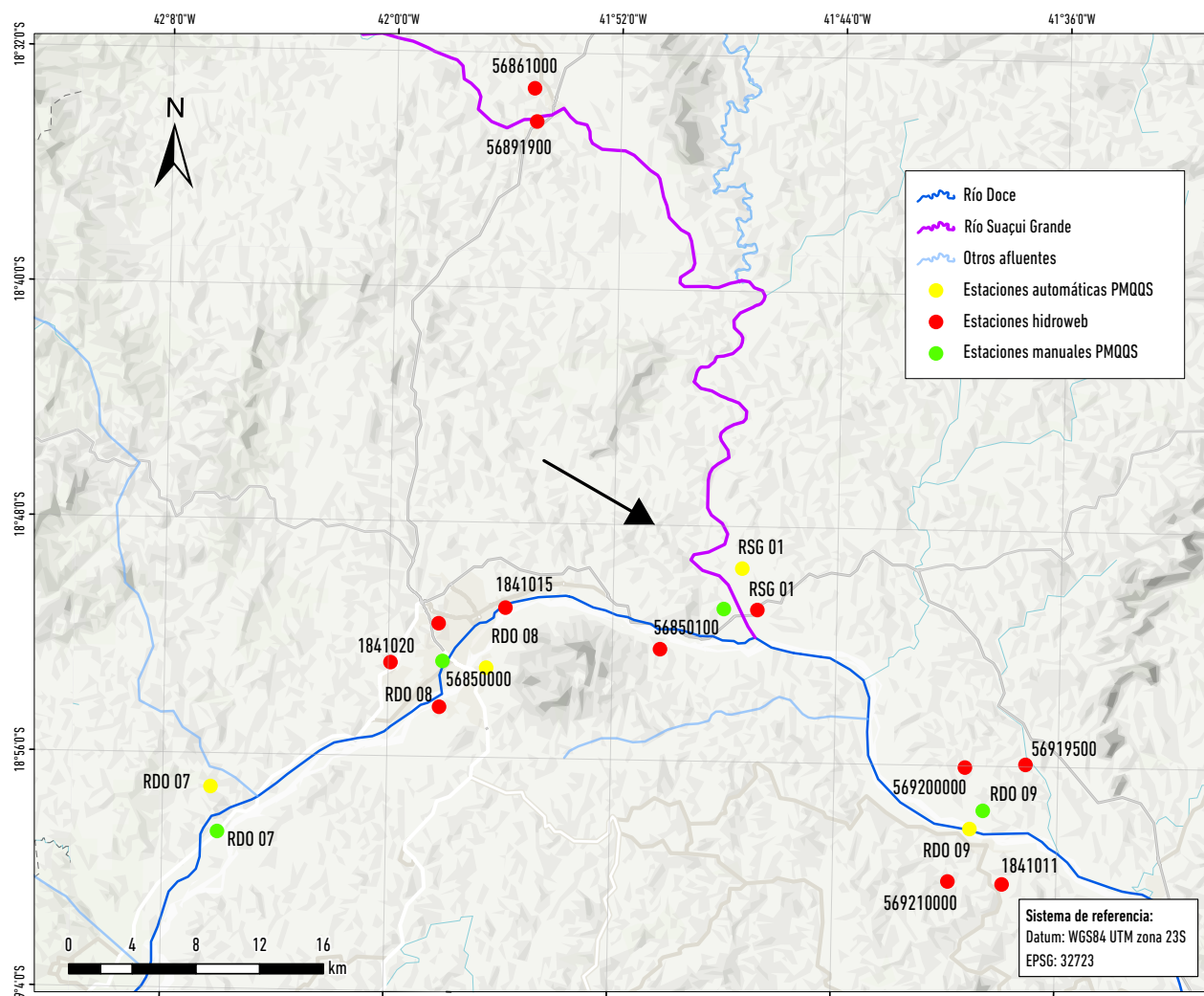


Figura 5. Localización de las estaciones en el área de estudio.

En una primera etapa se seleccionaron las estaciones ubicadas dentro del área de estudio. Posteriormente, se realizó una prueba de consistencia de los datos (Estigoni 2016) con el fin de detectar posibles errores, inconsistencias o fallas, y se descartaron aquellos registros que presentaban más del 5 % de error.

Los datos validados se organizaron en hojas de cálculo electrónicas mediante el software Microsoft Excel 2016, por fecha y hora, para la generación de gráficos. Dichos gráficos fueron correlacionados con el propósito de identificar los periodos hidrológicos de sequía, inundación y

el evento del desastre de Mariana–MG. Tras estos procedimientos, se elaboraron los hidrogramas y las curvas de sedimentos que posteriormente se incorporaron al programa de simulación.

La Figura 6 muestra la metodología empleada para la elaboración de los hidrogramas de las estaciones de monitoreo, correspondientes al periodo comprendido entre el 1° de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2020. La elección de este intervalo se justifica por incluir las condiciones previas, concomitantes y posteriores al desastre de Mariana–MG.

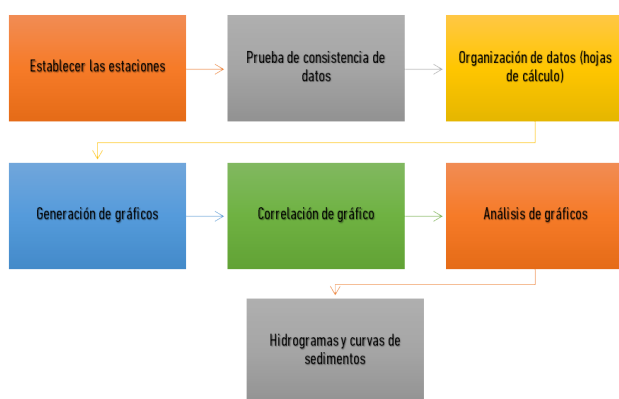


Figura 6. Diagrama de flujo para crear hidrogramas y curvas de sedimentos.

Generación del Modelo Digital de Elevación (MDE)

Los levantamientos topográficos suelen ser costosos y demandan una considerable inversión de tiempo, lo que limita la ejecución de estudios hidrológicos, hidráulicos e hidro-sedimentológicos. Por ello, en este estudio se emplearon tanto datos primarios recolectados en campo como datos secundarios obtenidos de diversas fuentes.

Las fuentes de información topográfica incluyeron:

1. Recopilación de datos de campo.
2. Catálogo de metadatos de la ANA.
3. Modelos digitales del terreno (MDT) provenientes del sensor satelital ALOS PALSAR-2.

Se llevaron a cabo misiones de recolección de datos en el área de estudio con el propósito de caracterizar el río Doce y sus principales afluentes. Durante estas misiones se realizaron las siguientes actividades:

1. Levantamiento planialtimétrico de las secciones.
2. Medición de parámetros físicos del agua.
3. Medición de caudales.
4. Muestreo de sedimentos en las riberas y el lecho de los ríos.

Toma de datos de campo

Para la ejecución de las misiones de levantamiento se empleó el siguiente equipo (Figura 7):

1. Receptores GNSS modelo Leica CS09, con señales L1, L2 y GLONASS, utilizados para la recolección de puntos topográficos y la georreferenciación.
2. Sonda multiparamétrica Hanna modelo HI9828, destinada a la medición de parámetros físicos y químicos del agua.
3. Medidor de flujo Qliner v3, empleado para obtener mediciones topobatimétricas de las secciones y los caudales.

4. Muestreadores tipo Van Veen, utilizados para la recolección de sedimentos en los bancos y el lecho del río.



Figura 7. Equipos utilizados en el trabajo de campo: a) muestreador Van Veen; b) sonda multiparámetro Hanna HI9828; c) caudalímetro Qliner V3 y; d) receptor Leica L1 y L2 GNSS.

Catálogo de metadatos de ANA

La fuente del catálogo de metadatos de la ANA corresponde a una plataforma que integra datos del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH). Esta base de datos contiene información geográfica, hidrológica e hidráulica sobre la red hidrografía brasileña.

En este estudio se utilizaron datos de secciones topobatimétricas de la cuenca del río Doce. Dichos datos fueron recolectados, procesados y presentados por una empresa privada contratada por un consorcio CBG-DOCE, IBIO Doce y ANA, con el propósito de realizar servicios de topografía y batimetría. Los datos se emplean principalmente para estudios de inundaciones y evaluaciones de fallas de presas.

Satélite alos palsar-2

Otra fuente de datos utilizada fue el satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), lanzado el 24 de enero de 2006 por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), desde el Centro Espacial Tanegashima (Japón), e iniciado en su fase operativa pública el 24 de octubre del mismo año.

El radar acoplado al satélite, PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar), es un radar de apertura sintética que opera en banda L y tiene la capacidad de obtener imágenes diurnas o nocturnas, independientemente de las condiciones meteorológicas.

El proyecto *Alaska Satellite Facility* (ASF) procesó las imágenes y realizó la corrección radiométrica del terreno, generando productos altimétricos con una resolución espacial de 12,5 m, en formato GeotIFF (*Georeferenced Tagged Image File*), disponible gratuitamente en el portal de la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio).

Diversos autores han utilizado las imágenes del satélite ALOS PALSAR para la generación de superficies topográficas, entre ellos Dai et ál. (2023), Munyaka et ál. (2023) y Setiawan y Furuya (2024)

Modelo de elevación digital (MED)

Para la elaboración del MDE del área de estudio se integraron los conjuntos de datos obtenidos mediante recolección de campo, el catálogo de metadatos de ANA y el MDT derivado del radar satelital ALOS PALSAR-2.

El MDE se generó con el propósito de representar la superficie de los cauces fluviales, detallando las características físicas identificadas durante los levantamientos de datos. La Figura 8 muestra el flujo de trabajo empleado en el sistema de información geográfica (SIG) para la construcción del MDE del área de estudio. Este proceso se estructuró en dos partes (Figura 8):

1. Tratamiento de datos para su importación en un programa SIG.
2. Creación de cunetas de cursos de agua, mediante interpolación de las secciones topobatimétricas, con el fin de generar la superficie. Los datos del satélite ALOS PALSAR-2 se utilizaron para complementar las áreas faltantes de la superficie modelada.

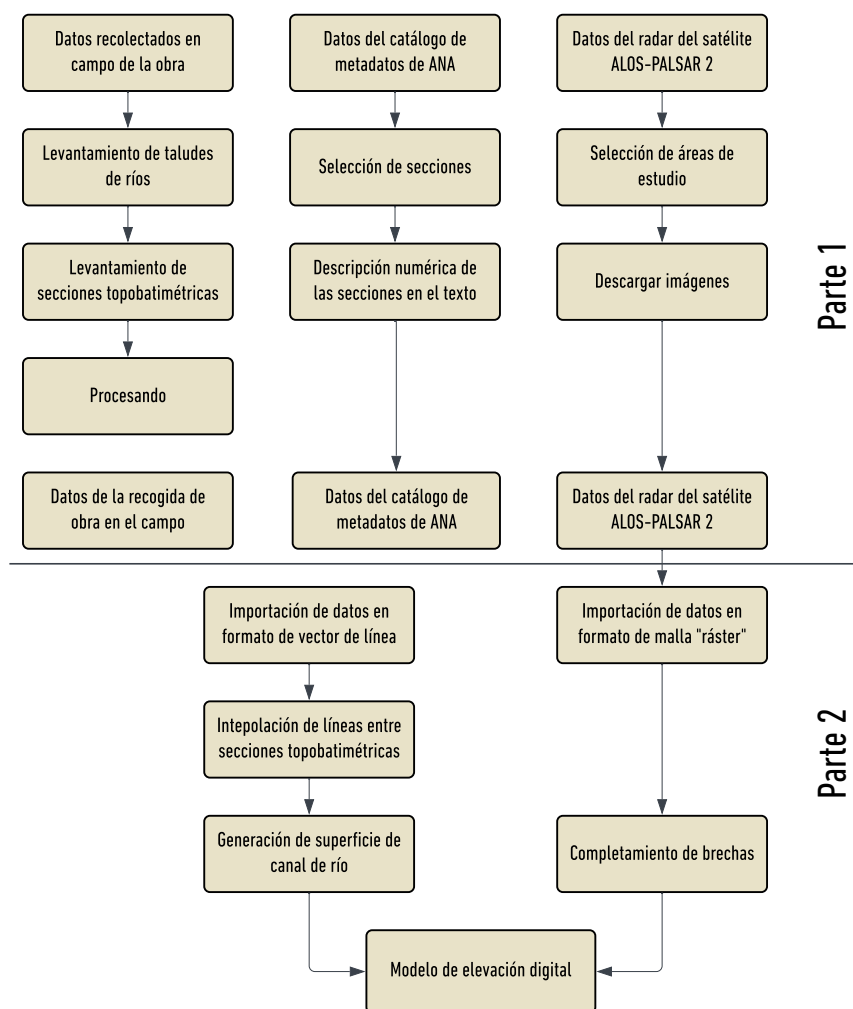


Figura 8. Pasos en el SIG para la elaboración del MDE.

Simulación hidrodinámica 2D

El modelo se fundamenta en la solución de la ecuación de energía, en la cual las pérdidas por fricción se evalúan mediante la ecuación de Manning. Para el caso de flujo inestable, el programa HEC-RAS resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momento utilizando un esquema implícito de diferencias finitas, desarrollado por Holly y Preissmann (1977) y Chen y Falconer (1992).

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

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

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

Donde: h es la profundidad; u y v son las velocidades promedio en las direcciones x y y ; H es la elevación del agua; ω es la velocidad angular de la tierra; φ es la latitud; A_t es el coeficiente de viscosidad turbulenta.

Los datos de entrada corresponden a la información previamente procesada, la cual fue incorporada mediante el editor de datos geométricos del programa HEC-RAS para generar las mechas de 20 m x 20 m en el canal principal y de 50 m x 50 m en el canal secundario.

Los valores de rugosidad de Manning (n) para ambos canales se seleccionaron según lo propuesto por Chow (1959), donde está determinado por la caracterización física del canal, y representa el grado de sinuosidad, conforme a la Ecuación (4):

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

Los hidrogramas se incorporaron al modelo mediante tablas obtenidas de las estaciones de monitoreo.

La simulación hidrodinámica 2D consideró el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2020, de acuerdo con los datos recolectados. No se incluyeron estructuras hidráulicas (como puentes), por no ser de interés en el presente estudio.

Las ecuaciones bidimensionales se derivan de las ecuaciones unidimensionales mediante la integración vertical entre el fondo y la superficie del cauce, considerando las direcciones cartesianas x y y . Las ecuaciones (1), (2) y (3) corresponden a las soluciones de las ecuaciones de conservación de masa y momento, representadas en un plano paralelo al fondo del canal (Andrade 2020).

Simulación de transporte de sedimentos 2D

El modelo de transporte de sedimentos bidimensional implementado en el programa HEC-RAS resuelve la Ecuación (5), correspondiente al transporte de carga total de material del lecho. Este modelo separa la carga total en carga de fondo y carga suspendida, empleando para ello fórmulas empíricas específicas. La Ecuación (5) se resuelve mediante un esquema implícito de volúmenes finitos, utilizando la misma malla espacial aplicada en el modelo hidrodinámico (Nelson, Gibson y Sanchez 2022).

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

Donde: C_{tk} es la carga total de sedimentos; β_{tk} es el factor de corrección de carga total para la clase de grano; U es la velocidad media en profundidad en m/s; h es la profundidad del agua en m; ϵ_{tk} es el coeficiente de difusión (o mezcla) de la carga total; E_{tk} es la tasa de erosión a plena carga; D_{tk} es la tasa de depósito de carga total; corresponde al término fuente/sumidero de carga total.

Los datos de entrada corresponden a la información procesada previamente, la cual fue incorporada mediante el editor de datos de sedimentos del programa HEC-RAS.

La ecuación de transporte de sedimentos aplicada en el modelo fue la propuesta por Wu (2004), seleccionada por su adecuación a la profundidad de los ríos del área de

estudio. La ecuación de clasificación granulométrica utilizada fue la de Copeland y Thomas (1989), por su amplia capacidad para calcular el tamaño de grano. Asimismo, la ecuación de velocidad de caída adoptada fue la de Wu y Wang (2006), que incorpora la influencia de la forma de las partículas.

La granulometría se ingresó para cada curso de agua de acuerdo con los datos recolectados durante las campañas de campo y los registros de las estaciones de monitoreo. Finalmente, la condición de contorno empleada fue la de carga de equilibrio, dado que los demás modos de contorno requerían datos adicionales que no fueron recolectados en este estudio.

Calibración, ajustes y evaluación de modelos

El procedimiento adoptado para la calibración de los modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos se realizó de forma empírica, mediante el método de ensayo y error.

La calibración del modelo hidrodinámico se diseñó con el propósito de obtener el mejor ajuste posible entre los hidrogramas y cotagramas simulados y los datos observados en las estaciones de monitoreo. Para este proceso se seleccionaron dos periodos representativos en cada área de estudio: uno correspondiente a eventos de caudal superiores al promedio, y otro con caudales inferiores al promedio, a fin de capturar la variabilidad hidrológica del sistema.

La calibración se llevó a cabo en el programa HEC-RAS, ajustando el coeficiente de rugosidad de Manning (n) para todas las secciones del modelo, con valores comprendidos entre 0,030 y 0,070. La selección final del coeficiente óptimo se realizó mediante la comparación visual y estadística entre los hidrogramas simulados y los observados.

Las Ecuaciones (6), (7) y (8) representan los procedimientos empleados para comparar los hidrogramas y determinar el coeficiente de correlación (r^2), el cual permite evaluar el grado de ajuste entre los valores simulados y los observados. En particular, la Ecuación (8) calcula la proporción de variación explicada de los valores observados con respecto a la variable simulada (Rangel, 2021).

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

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

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

Donde: es la suma del error al cuadrado; es la suma total de cuadrados; es el valor observado; es el promedio de los valores observados; es el valor calculado/simulado.

La calibración morfológica del modelo de transporte de sedimentos en el programa HEC-RAS se realizó mediante la comparación de imágenes satelitales obtenidas en el software Google Earth Pro 7.3. Los cauces de los ríos fueron vectorizados a partir de estas imágenes para evaluar las diferencias en las áreas de las secciones simuladas frente a las observadas.

El proceso de calibración morfológica se efectuó ajustando tanto la función de transporte de sedimentos como el método de cálculo de la velocidad dentro del programa HEC-RAS. Asimismo, el período de calibración se definió de acuerdo con las características hidrológicas y geomorfológicas específicas de cada área de estudio.

Resultados y discusión

Los resultados se desarrollaron en cinco etapas principales. En primer lugar, se elaboraron los hidrogramas utilizados como datos de entrada en el programa de simulación. En segundo lugar, se generó el modelo digital del terreno (MDT). Los tercer y cuarto pasos correspondieron a las simulaciones hidrodinámicas 2D y de transporte de sedimentos 2D, respectivamente. Finalmente, en el quinto paso se realizó la evaluación de los modelos.

Datos de las estaciones de monitoreo

Las estaciones de monitoreo fueron seleccionadas según la disponibilidad de datos y su ubicación estratégica dentro del área de estudio. Se efectuaron pruebas de consistencia para garantizar la fiabilidad de la información empleada en la simulación. La Figura 9 presenta la localización de las estaciones.

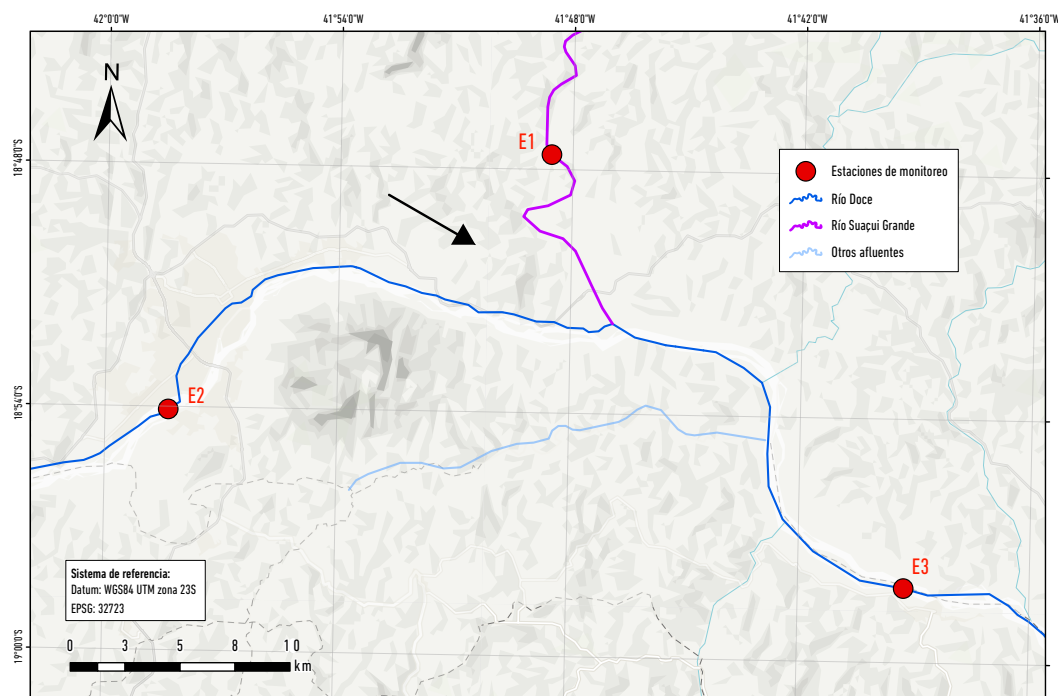


Figura 9. Localización de las estaciones de monitoreo.

Posteriormente, se elaboraron planillas con los hidrogramas correspondientes a cada estación. Las Figuras 10, 11 y 12 muestran los resultados obtenidos. La estación E1, ubicada en el río Doce, registró la llegada de los relaves de mineral de hierro procedentes del desastre de Mariana (MG) entre el 7 y el 11 de noviembre de 2015. Las estaciones situadas en el río Suaçuí Grande (E2) no

fueron afectadas por el evento. En enero de 2016, se registró un evento de inundación que impactó a todos los ríos monitoreados.

Los datos de las estaciones E1 y E2 fueron utilizados como condiciones de entrada en el programa HEC-RAS, mientras que la estación E3 sirvió para calibrar el modelo.

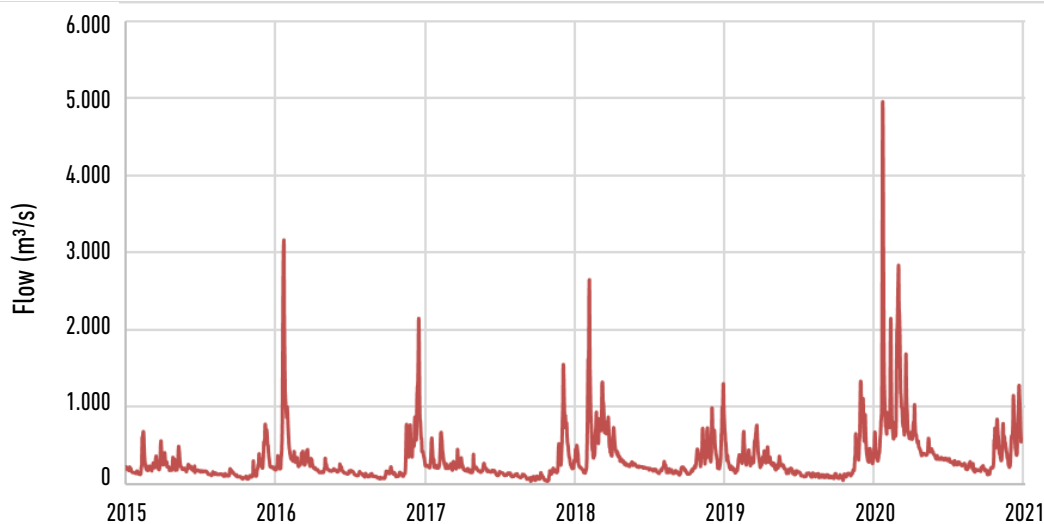


Figura 10. Estación E1 del río Doce (Arriba de la confluencia).

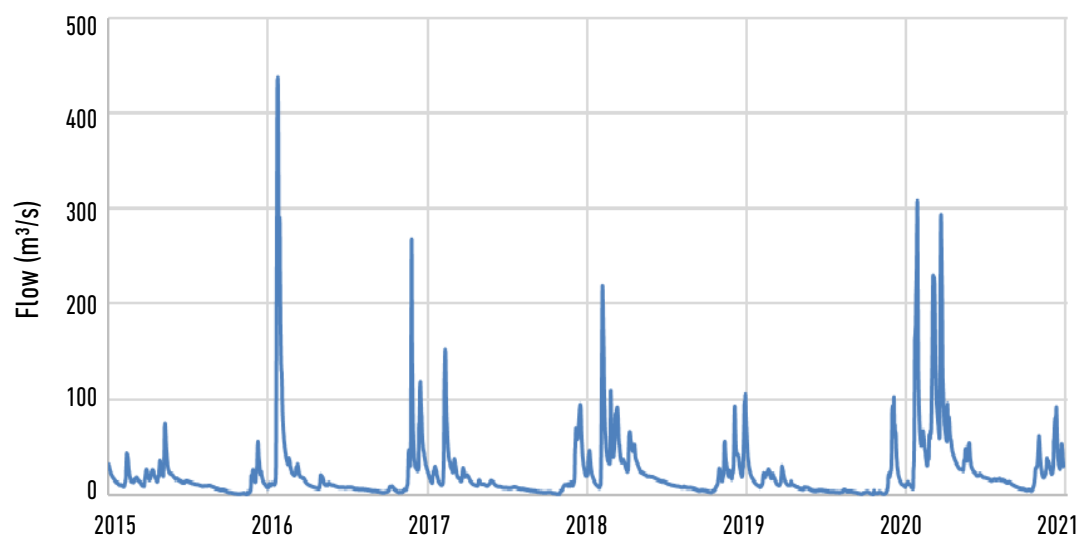


Figura 11. Estación E2 en el río Suaçuí Grande.

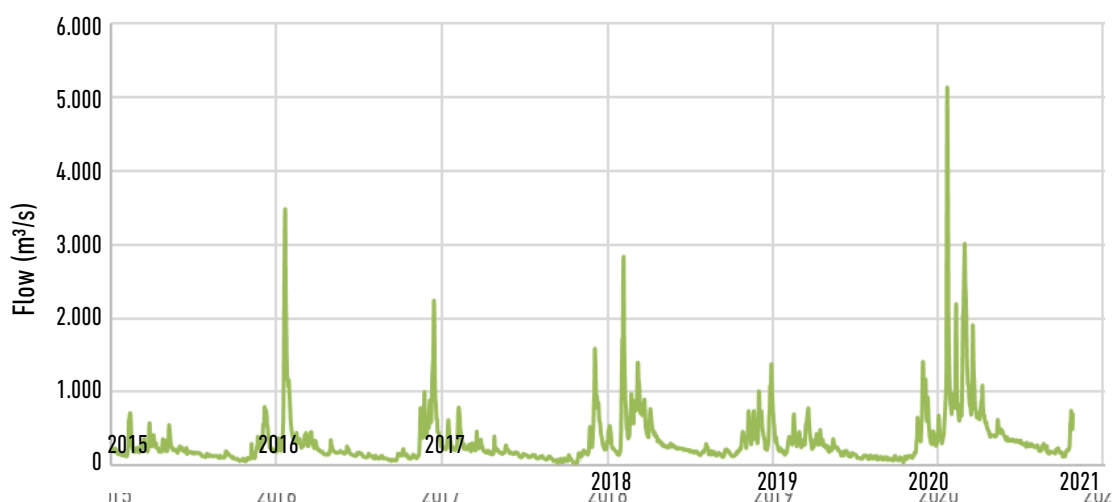


Figura 12. Estación E3 río Doce (aguas abajo).

Datos topográficos

La Figura 13 muestra la confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce y los tramos topobatimétricos analizados. Las Figuras 13a y 13c corresponden a los tramos topobatimétricos del río Doce, mientras que la Figura 13b representa el tramo del río Suaçuí Grande. En esta región

se identificó la presencia de diversas islas que influyen en el flujo y la velocidad de la corriente. Entre ellas, se distinguen las islas perennes, formadas por estructuras rocosas, y las islas temporales, constituidas por sedimentos depositados tras eventos de crecida o inundación.

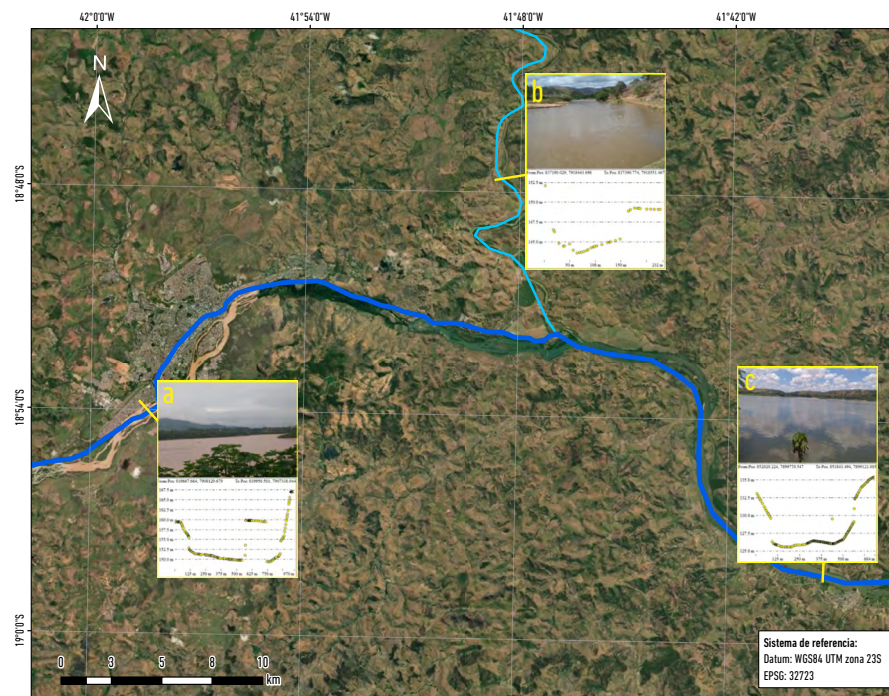


Figura 13. Confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce y secciones topobatemétricas.

La Figura 14 presenta el MDE de las confluencias (a) y su comparación con una imagen satelital (b). El MDE se elaboró con el propósito de caracterizar los cauces principales y secundarios de los ríos. Las áreas elevadas no se

incluyeron en el modelo, dado que no fueron utilizadas en la simulación. Se procuró, en cambio, representar las islas fluviales, ya que desempeñan un papel fundamental en el comportamiento del flujo y el transporte de sedimentos.

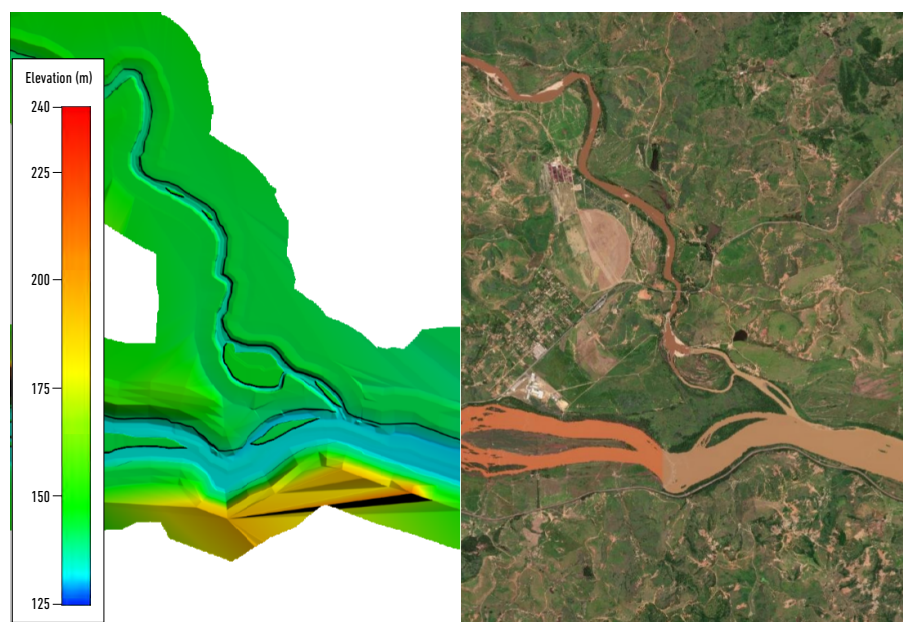


Figura 14. MDE de la confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce.

Resende (2020) realizó un análisis de riesgo de inundaciones con diferentes escenarios temporales para la ciudad de Governador Valadares, empleando un MDE proporcionado por el CPRM Serviço Geológico do Brasil, el cual evidenció las zonas con mayor susceptibilidad a inundaciones en las inmediaciones del río Doce. En comparación con el presente estudio, el modelo de Resende (2020) posee una resolución menos precisa y no incluye la representación de las islas fluviales. En contraste, el área de estudio aquí analizada es más amplia y cuenta con una mayor resolución espacial, lo que permitió detallar con precisión la morfología del cauce principal.

Simulación hidrodinámica 2b

En la confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce (Figura 15a), se observaron bajas velocidades de flujo,

resultado de la suavidad de la pendiente, estimada en aproximadamente 0,20 m/km. Las aguas del río Suaçuí Grande tienden a desplazarse hacia la margen izquierda, debido a la acumulación de sedimentos en la margen derecha. Este fenómeno podría estar asociado a la actividad de una draga de arena ubicada en las proximidades, la cual habría modificado la morfología del canal fluvial.

Durante el desastre de Mariana, el río Suaçuí Grande presentó un embalsamiento medio cercano a la confluencia de 0,60 m, mientras que el nivel del río Doce se incrementó en 1,10 m, sin llegar a desbordar su cauce (Figura 15b). Posterior a la confluencia, se registró un aumento del 50 % en la velocidad del flujo. La Figura 16 ilustra la velocidad de las corrientes (a) y el área inundada durante el desastre de Mariana (b), sin evidenciar diferencias significativas entre ambos escenarios.

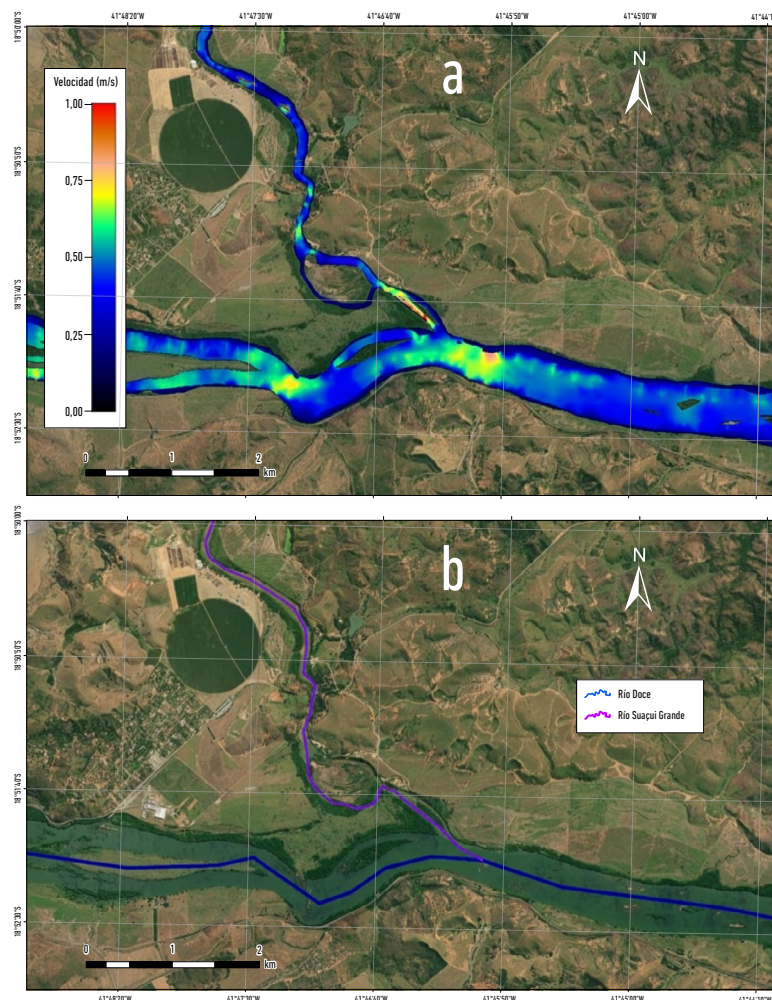


Figura 15. Área inundada del desastre de Mariana–MG en la confluencia del río Suaçuí Grande con el río Doce.

La simulación hidrodinámica permitió delimitar el área inundada desde Mariana (MG) hasta el municipio de Tumiritinga (MG). Los resultados indican que, en los sectores donde el canal se estrecha, la velocidad del flujo aumenta de manera considerable, especialmente en las zonas urbanizadas (Figura 16a). Este comportamiento

puede explicarse por la mayor presión hidráulica ejercida en los tramos amplios en comparación con los más angostos. La Figura 16b muestra el área afectada por el desastre en la zona urbana de Governador Valadares (MG), situada aguas arriba de la confluencia, donde no se registraron diferencias notables.

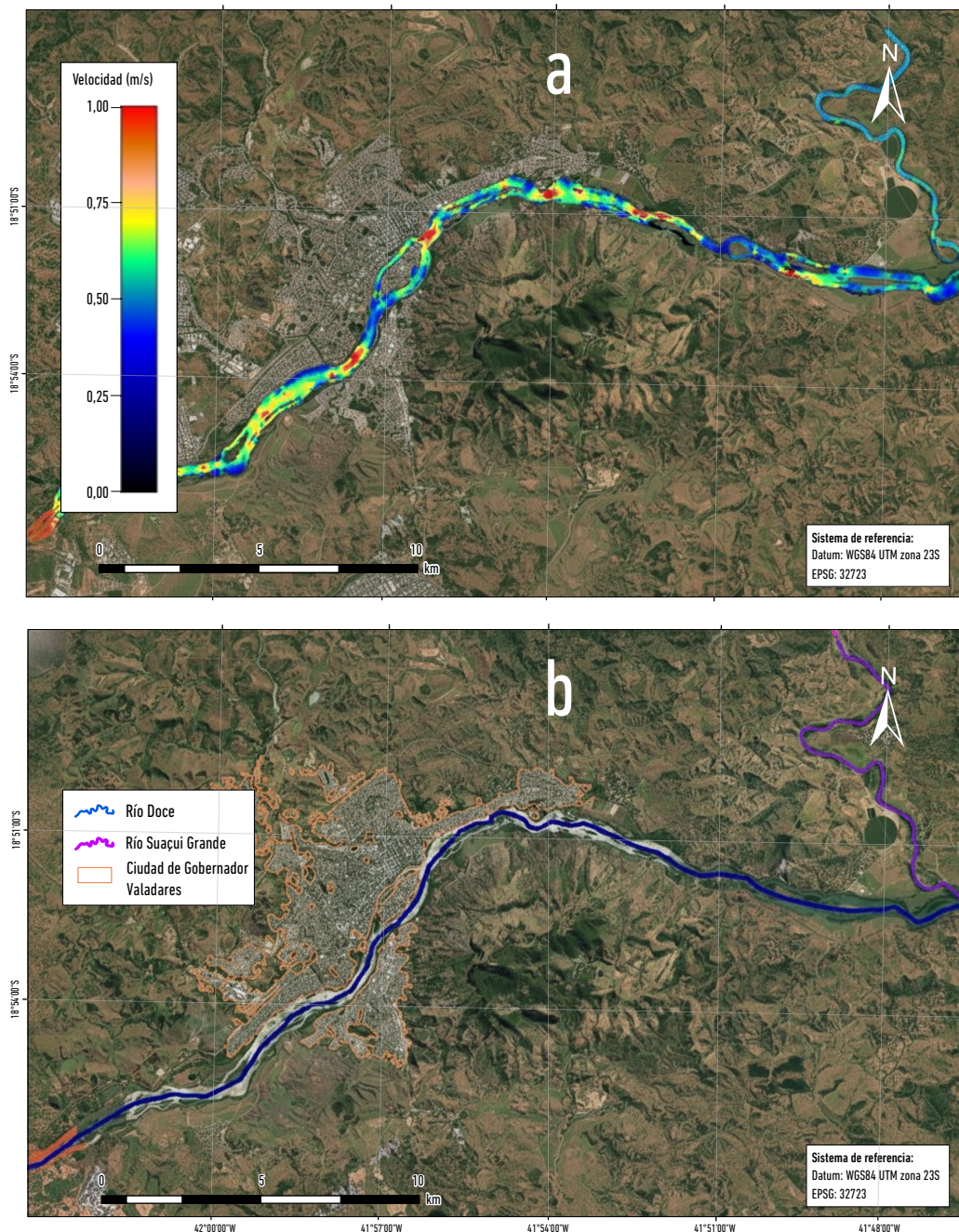


Figura 16. Área de inundación por desastre de Mariana–MG, en el área urbana del municipio de Governador Valadares–MG.

Hasta el momento, no se han identificado estudios previos que realicen simulaciones hidrodinámicas específicas para la ciudad de Governador Valadares (MG). Machado (2017) y Almeida (2019) modelaron la propagación de la onda de inundación generada por la ruptura de la presa de Fundão, pero únicamente hasta 10 km aguas abajo del sitio del colapso. El área abordada en el presente estudio se ubica a 300 km aguas abajo de la presa y presenta condiciones geomorfológicas y fluviales distintas, lo que impide una comparación directa.

Los resultados obtenidos son coherentes con los hallazgos de Dasallas et ál. (2019) y Hagg et ál. (2021), quienes señalan que, en los tramos tipo embudo, la velocidad del flujo aumenta respecto a otros sectores. Asimismo, la simulación coincide con la relación distancia/profundidad observada por Coser y Grison (2019) y Pereira et ál. (2022) en secciones topobatimétricas comparables:

las secciones más estrechas tienden a ser más profundas, mientras que las más amplias son menos profundas, conforme a lo descrito por Schumm (1977).

Simulación de transporte de sedimentos 2b

Tras la simulación hidrodinámica 2D, se incorporaron los datos de sedimentos en el programa HEC-RAS. El modelo de transporte de sedimentos 2D permitió simular los procesos de movilización, deposición y erosión, además de evaluar cualitativamente los patrones espaciales de concentración y acumulación de material sedimentario.

La granulometría se configuró con base en el procesamiento de datos de las estaciones de monitoreo y en los levantamientos de campo realizados. La Figura 17 muestra la distribución granulométrica, donde se observa que los ríos presentan características similares, predominando las fracciones de grano medio y grueso.

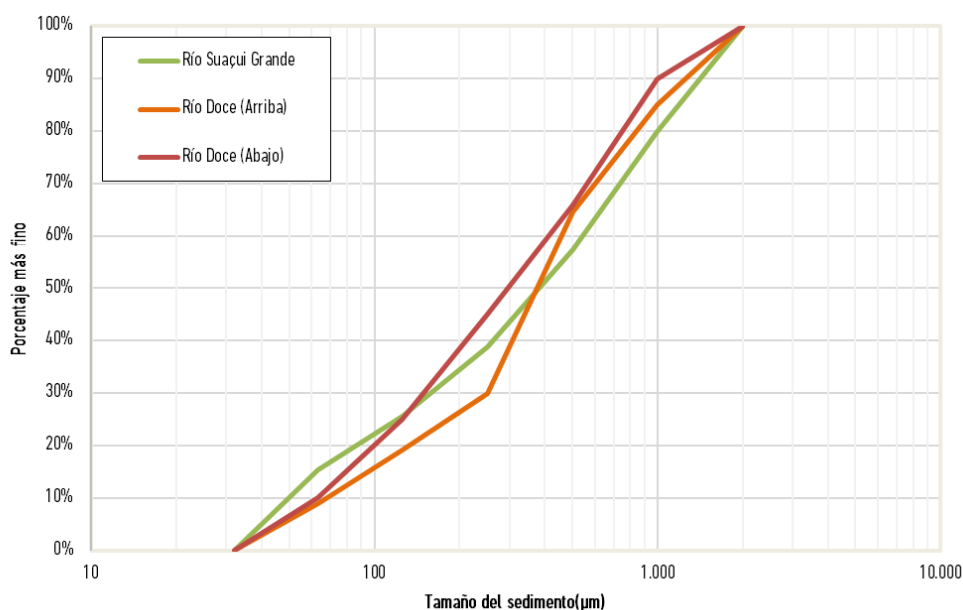


Figura 17. Distribución del tamaño de grano en los ríos del área de estudio.

Los resultados de la simulación de transporte de sedimentos permitieron mapear las zonas de deposición y erosión en la confluencia de los ríos Suaçuí Grande y Doce (Figuras 18 y 19). La simulación evidenció que la deposición de sedimentos fue mayor en el río Doce, fenómeno atribuible a su baja pendiente y a la presencia de islas fluviales que alteran el flujo y reducen la capacidad de arrastre.

La pendiente media del río Doce en el tramo analizado es de aproximadamente 0,20 m/km, lo cual se considera

bajo en comparación con otros sectores del río. Esta condición disminuye la energía del flujo, favoreciendo la acumulación de sedimentos. Solo en los tramos más estrechos del cauce se registraron procesos erosivos.

Durante el periodo de cinco años evaluado, se estimó una deposición promedio de sedimentos de 0,60 m, evidenciando una tendencia a la colmatación progresiva del canal principal.

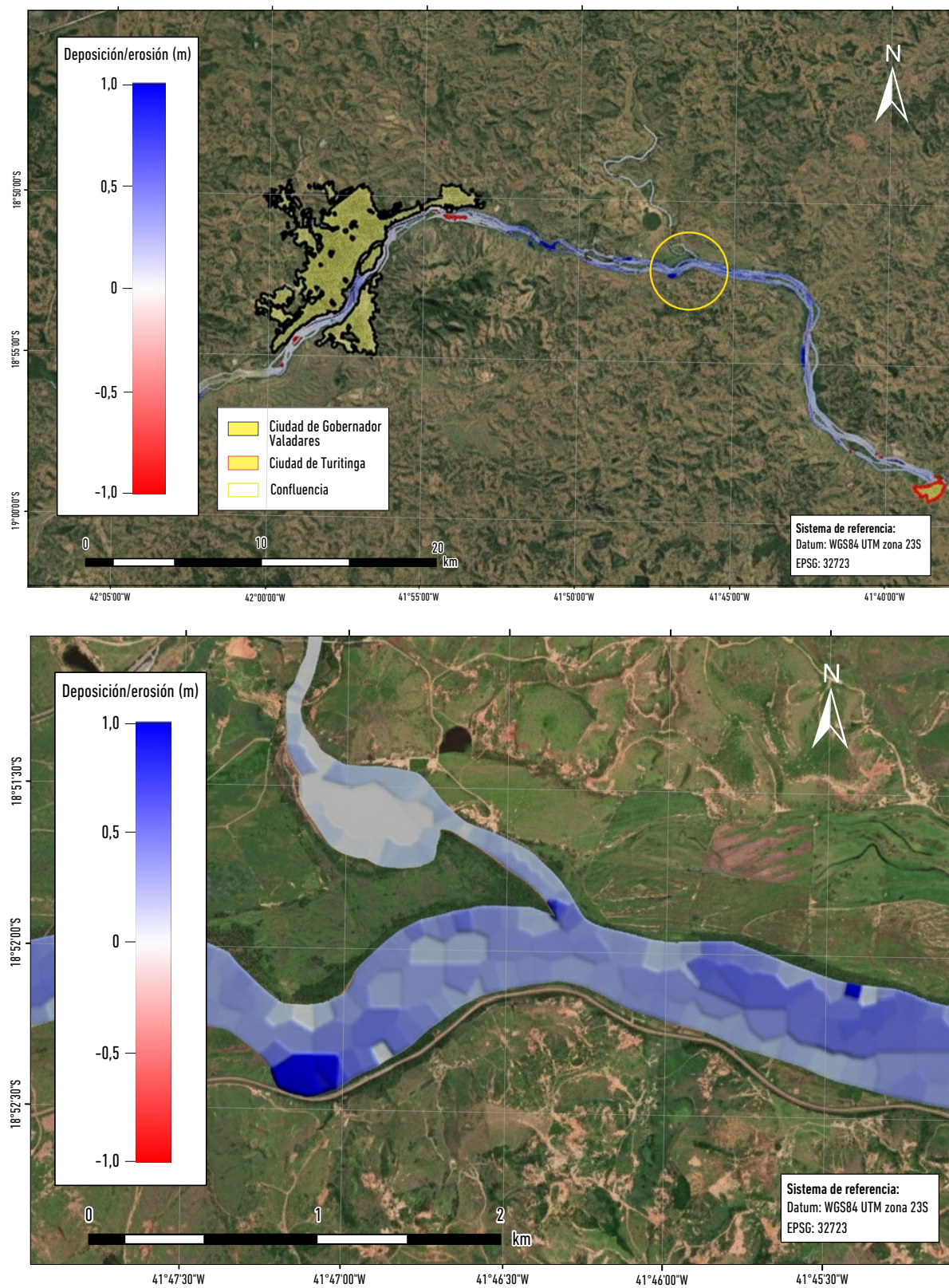


Figura 19. Área de sedimentación y erosión en la confluencia de los ríos Suaçuí Grande y Doce.

Calibración, ajustes y evaluación de modelos

La calibración del modelo hidrodinámico 2D se llevó a cabo mediante el ajuste del coeficiente de rugosidad de Manning, con el objetivo de obtener la mejor correspondencia entre los hidrogramas simulados y los hidrogramas observados en la estación de monitoreo aguas abajo.

Los coeficientes de Manning se variaron entre 0,030 y 0,070 para el canal principal y entre 0,09 y 0,14 para el canal secundario, seleccionándose finalmente los valores

de 0,045 y 0,12, respectivamente, de acuerdo con la metodología propuesta por Rangel (2021).

La Figura 19 muestra la comparación entre los hidrogramas simulados y observados en la estación E3 del río Doce (aguas abajo). La evaluación del modelo se consideró satisfactoria, pese a las ligeras discrepancias observadas, las cuales se atribuyen a variaciones locales no captadas por la resolución espacial del modelo.

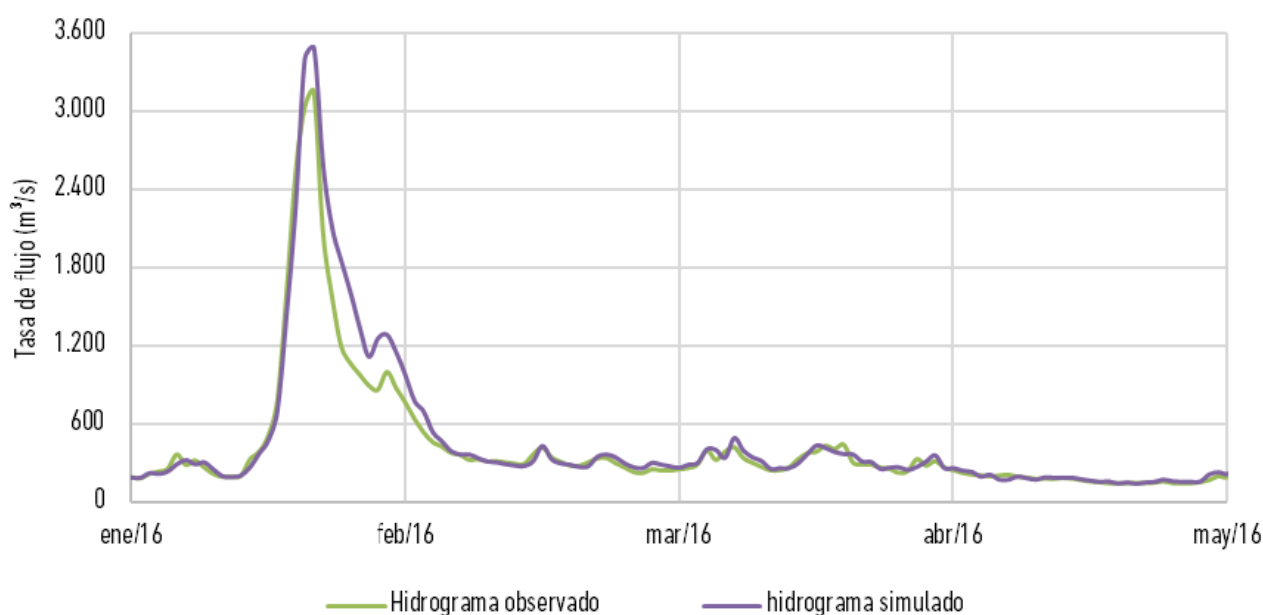


Figura 19. Comparación de hidrogramas, simulados y observados, por estación de monitoreo E3-río Doce (aguas abajo).

La calibración del modelo de transporte de sedimentos 2D se efectuó mediante la comparación de imágenes satelitales con los resultados de la simulación, con el propósito de evaluar cualitativamente los patrones de deposición y concentración de sedimentos. La Figura 20 ilustra esta comparación, correspondiente al 12 de diciembre de 2015, entre la imagen del modelo HEC-RAS (a) y la imagen satelital real (b).

El modelo reprodujo adecuadamente el patrón lateral de concentración y el campo de flujo en la confluencia de los ríos, evidenciando una alta concentración

de sedimentos incluso un mes después del desastre de Mariana (MG). Los resultados del modelo 2D indican que los relaves predominaron en el río Doce, lo que sugiere que el río Suaçuí Grande presenta baja capacidad de dilución y regeneración de la calidad del agua del río Doce posterior al evento.

Esta condición puede explicarse porque el caudal medio del río Suaçuí Grande representa aproximadamente el 10 % del caudal del río Doce, además de que su canal presenta mayor profundidad, lo cual reduce la velocidad de flujo y, por tanto, su capacidad de autodepuración.

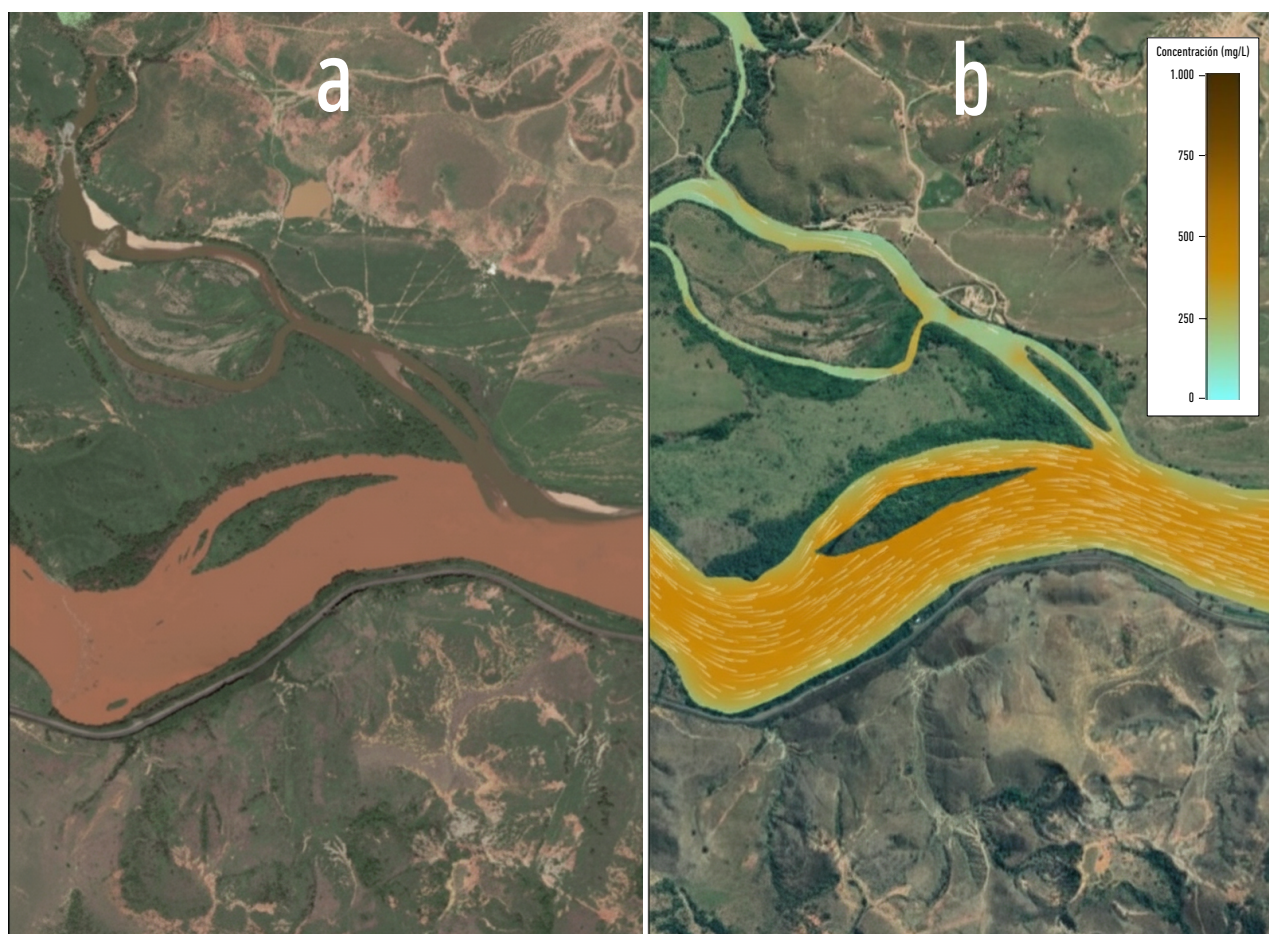


Figura 20. Comparación entre la imagen satelital (12/12/2015) y el resultado de la simulación 2D del transporte de sedimentos en la confluencia de los ríos Suaçuí Grande y Doce.

Conclusiones

Las estaciones de monitoreo constituyen una fuente esencial de información para múltiples actividades científicas, técnicas y de gestión territorial. La recolección, registro y disponibilidad de datos hidrológicos implican altos costos financieros y logísticos; sin embargo, el monitoreo continuo y la ampliación de la red de estaciones permitirán una comprensión más precisa de la dinámica espacio-temporal de los recursos hídricos. En este sentido, la cuenca del río Doce presenta una densidad relativamente alta de estaciones de monitoreo en comparación con otras cuencas hidrográficas de la región.

Los datos topográficos y batimétricos, aunque fundamentales para la construcción de modelos hidrodinámicos, son costosos y demandan tiempo para su obtención, representando una de las principales fuentes de incertidumbre en las simulaciones. En este estudio, se integraron

diversas fuentes de información topográfica con el fin de mejorar la representación del terreno. No obstante, la ausencia de estructuras hidráulicas (como puentes o diques) en la modelación limitó parcialmente la representatividad espacial del modelo.

El modelo hidrodinámico 2D demostró ser eficiente y robusto, mostrando una alta correspondencia entre los hidrogramas simulados y los observados. Asimismo, el área inundada simulada durante el desastre de Mariana (MG) resultó consistente con la evidencia satelital y la literatura existente. Se identificó, además, que en los estrechamientos del cauce del río Doce, particularmente en el municipio de Governador Valadares (MG), la velocidad del flujo aumenta significativamente, lo que favorece los procesos erosivos.

La simulación del transporte de sedimentos 2D se ejecutó con éxito, aunque el tiempo de procesamiento resultó considerable debido a la amplitud del área modelada y a la alta resolución de la malla computacional.

De acuerdo con Marciano (2024), las confluencias fluviales desempeñan un papel estratégico en la recuperación ambiental del río Doce, siempre que estén acompañadas por un caudal suficiente que favorezca la dilución y mezcla de sedimentos. Sin embargo, los resultados de este estudio confirman que el río Suaçuí Grande presenta baja capacidad de mezcla y dilución de los sedimentos provenientes del río Doce, debido a su menor caudal y profundidad.

El modelo 2D de transporte de sedimentos mostró que las áreas con flujos rápidos presentan mayor erosión, mientras que en los flujos lentos predomina la deposición de sedimentos. Se registraron procesos erosivos de hasta 1 m en zonas de estrechamiento, y depósitos promedio de 0,60 m en la zona de confluencia.

Se recomienda que futuros estudios incluyan un monitoreo de mediano y largo plazo en los tramos donde se ubican las estaciones de monitoreo, con el fin de validar la evolución morfológica del cauce y refinar los parámetros de calibración de los modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos.

Referencias

- Abdelghani, Leghouchi. 2023. "Modeling of Dam-Break Flood Wave Propagation Using HEC-RAS 2D and GIS: Case Study of Taksebt Dam in Algeria". *World Journal of Engineering* 21 (2): 376-385. <https://doi.org/10.1108/WJE-10-2022-0405>
- Almeida, Bruna Carolina de Melo. 2019. "Retroatálise da propagação decorrente da ruptura da barragem de fundão através do modelo numérico HISTAV". Trabajo de grado en Ingeniería Civil, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ANA (Agência Nacional de Águas). 2016. *Manual do empreendedor sobre segurança de barragens*, 8. Brasília: ANA. 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, Alice César Fassoni. 2020. "Mapeamento e caracterização do sistema rio-planície da Amazônia central via sensoriamento remoto e modelagem hidráulica". Tesis de Doctorado en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. <http://hdl.handle.net/10183/211269>
- Ávila, Joaquim Pimenta de, Marta Sawaya, Alberto Sayão y Leonardo Ferreira. 2021. "Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes". *Geotecnia*, no. 152, 435-464. https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_13
- Bandini, Brígiti, Flávia Constantino da Vitória, Elenice Rachid da Silva y Josimar Ribeiro de Almeida. 2019. "Desastre Ambiental da Barragem de Fundão, MG—Análise de Impactos Socioambientais". *Revista Internacional de Ciências* 9 (3): 2-15. <https://doi.org/10.12957/ric.2019.40296>
- Bharath, A., Anand V. Shivapur, Chandrashekarayya G. Hiremath y Ramesh Maddamsetty. 2021. "Dam Break Analysis Using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A Case Study of Hidkal Dam, Karnataka State, India". *Environmental Challenges*, 5: 100401. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100401>
- Bowker Associates, Science & Research. 2015. "Samarco Dam Failure: Largest by Far in Recorded History". *Lindsaynewlandbowker* (blog). 19 de abril de 2019. <https://lindsaynewlandbowker.wordpress.com/2015/12/12/samarco-dam-failure-largest-by-far-in-recorded-history/>
- Bressan, F. R., R. Mantilla, K. E. Schilling, J. A. Palmer y L. Weber. 2020. "Hydrologic-Hydraulic Modeling of Sediment Transport Along the Main Stem of a Watershed: Role of Tributaries and Channel Geometry". *Hydrological Sciences Journal*, 65 (2): 183-199. <https://doi.org/10.1080/02626666.7.2019.1687897>
- Burritt, Roger L. y Katherine L. Christ. 2018. "Water Risk in Mining: Analysis of the Samarco Dam Failure". *Journal of Cleaner Production* 178: 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.042>
- Carvalho, Newton de Oliveira, Naziano Pantoja Filizola Júnior, Paulo Marcos Coutinho dos Santos y Jorge Enoch Furquim Werneck Lima. 2000. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília, D. F.: Agência Nacional de Energia Elétrica. <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/orientacoes-manuais/entidades/guia-praticas-sedimento-metricas-aneel-2000.pdf/view>
- Chen, Yiping y Roger A. Falconer. 1992. "Advection-Diffusion Modelling Using the Modified QUICK Scheme". *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 15 (10): 1171-1196. <https://doi.org/10.1002/flid.1650151003>
- Chevalier, Guillaume G., Florent Locatelli, Eric Masson y Olivier Blanpain. 2021. "Siltting in the Grand Canal in the Domain of Chantilly Oise, France—Catchment-Scale Hydrogeomorphological Reconnaissance and Local-Scale Hydro-Sedimentary Transport Modelling". *Water* 13 (14): 1989. <https://doi.org/10.3390/w13141989>
- Chow, Ven Te. 1959. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- CBH-DOCE (Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Doce). 2016. Deliberação normativa ad referendum CBH-Doce nº 51 de 16 de junio de 2016. <https://cbhdoce.org.br/institucional/cbh-doce/deliberacoes-e-mocoes/deliberacoes-normativas>

- Coelho, José Alexandre Pinto Filho, Artur José Soares Matos y Elizabeth Guelman Davis. 2022. *Sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Doce: relatório técnico de operação do ano hidrológico 2021/2022*. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil–CPRM, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Ministério de Minas e Energia, Governo Federal. <http://abrh.s3.amazonaws.com/Eventos/Trabalhos/65/PAPo21.pdf>
- Consórcio Ecoplan-LUME. 2010. *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*. http://agerh.es.gov.br/Media/agerh/Documenta%C3%A7%C3%A3o%20CBHs/PIRH_Doce_Volume_II2.pdf
- Copeland, Ronald R. y William A. Thomas. 1989. *Corte Madera Creek Sedimentation Study: Numerical Model Investigation*. Reporte Técnico TR-HL-89-6. US Army Engineer District Experimental Station, Sacramento. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA254685>
- CPRM 2015. *Monitoramento especial da bacia do Rio Doce. Relatório 01: acompanhamento da onda de cheia*. Serviço Geológico do Brasil. http://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/21587/1/riodoce_relatorio1.pdf
- CPRM y ANA (Serviço Geológico do Brasil y Agência Nacional de Águas). 2016 *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: Serviço Geológico do Brasil–Agência Nacional de Águas. http://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/21590/1/riodoce_relatorio4.pdf
- Coser, Edinei y Fernando Grison. 2019. “Geometria hidráulica de um trecho de canal fluvial aplicando HEC-RAS”. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 20 (4). <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1512>
- Dai, Keren, Youdong Chen, Qiang Xu, Craig Hancock, Mi Jiang, Jin Deng y Guanchen Zhuo. 2023. “A Functional Model for Determining Maximum Detectable Deformation Gradients of InSAR Considering the Topography in Mountainous Areas”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 61: 1-11. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3287590>
- Dasallas, Lea, Yeonsu Kim y Hyunuk An. 2019. “Case Study of HEC-RAS 1D-2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea”. *Water* 11 (10): 2048. <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Dias, Carlos Alberto, Alexandre Sylvio Vieira da Costa, Gilvan Ramalho Guedes, Glauco José de Matos Umbelino, Leonardo Gomes de Souza, Janete Higino Alves y Thamiere Gabriele Macedo Silva. 2018. “Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce”. *Revista Espinhaço* 7 (1): 21-35. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952940>
- Estigoni, Marcus Vinicius. 2016. “Uso de modelagem de transporte de sedimentos e técnicas de hidrologia estatística para redução de incertezas nos estudos de assoreamento de reservatórios: estudo de caso do reservatório da PCH Mogi-Guaçu-SP”. Tesis de Doctorado en Ciencias de Ingeniería Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-10022017-085647/en.php>
- Evangelista, Heitor, Claudio de M. Valeriano, Gabriel Paravardini, Sérgio J. Gonçalves Junior, Eduardo D. Sodré, Carla C. A. Neto, Elaine A. Santos, Newton de M. Neto, Caroline Peixoto, Marcus V. V. J. Licinio, Joselito N. Ribeiro, Araceli V. Flores, Madson G. Pereira, Catia F. Barbosa, João R. C. de Barcello, Bruno V. X. de Oliveira, Flávia Guebert, Fabio Negrão, Marcelino J. dos Anjos, Ramon Silva Santos, José Carlos Seoane, Renato Campello Cordeiro y Monica Heilbron. 2022. “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* 807 (parte 2): 151231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151231>
- Foesch, Meri Diana Strauss, Marcio Rocha Francelino, Pablo Azevedo Rocha y Adalberto Rodrigues Lira Gomes. 2020. “River Water Contamination Resulting from the Mariana Disaster, Brazil”. *Floresta e Ambiente* 27 (4): e20180132. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.013218>
- Garcia, Leticia Couto, Danilo Bandini Ribeiro, Fabio de Oliveira Roque, Jose Manuel Ochoa-Quintero y William F. Laurance. 2017. “Brazil’s Worst Mining Disaster: Corporations Must Be Compelled to Pay the Actual Environmental Costs”. *Ecological Applications* 27 (1): 5-9. <https://doi.org/10.1002/eap.1461>
- Hagg, Wilfried, Stefan Ram, Alexander Klaus, Simon Aschauer, Sinan Babernits, Dennis Brand, Peter Guggemoos y Theodor Pappas. 2021. “Hazard Assessment for A Glacier Lake Outburst Flood in the Mo Chu River Basin, Bhutan”. *Applied Sciences* 11 (20): 9463. <https://doi.org/10.3390/app11209463>
- Helwa, Amira M., Mohamed Elgamal y Ashraf M. Ghanem. 2020. “Dam Break Analysis of Old Aswan Dam on Nile River Using HEC-RAS”. *International Journal of Hydrology Science and Technology* 10 (6): 557-585. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2020.110568>
- Holly Jr, Forrest M. y Alexandre Preissmann. 1977. “Accurate Calculation of Transport in Two Dimensions”. *Journal of The Hydraulics Division* 103 (11): 1259-1277. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004870>

- IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente). 2015. *Laudo técnico preliminar: impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*. Brasília. <https://am37.files.wordpress.com/2016/01/laudo-preliminar-do-ibama-sobre-mariana.pdf>
- IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas). 2017. *Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Rio Doce no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG*. Belo Horizonte. <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, Neekita, Gaurav Raj Lamichhane, Md. Mafuzur Rahman, Ajay Kalra y Sajjad Ahmad. 2019. Application of HEC-RAS to Study the Sediment Transport Characteristics of Maumee River in Ohio. En *World Environmental and Water Resources Congress 2019: Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis*, editado por Gregory F. Scott y William Hamilton, 257-267. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482353.024>
- Liu, Z., V. Merwade y K. Jafarzadegan. 2019. "Investigating the Role of Model Structure and Surface Roughness in Generating Flood Inundation Extents Using One-And Two-Dimensional Hydraulic Models". *Journal of Flood Risk Management* 12 (1): e12347. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12347>
- Machado, Nathália Couto. (2017). "Retroanálise da proteção decorrente da ruptura da Barragem do Fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação". Tesis de Maestría em Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-AV3MTA>
- Marciano, Alexandre Germano. 2019. "Modelagem Hidrodinâmica com a integração do mapeamento das inundações do rio Sapucaí do município de Itajubá/MG". Tesis de Maestría en Ingeniería Hídrica, Universidad Federal de Itajubá, Minas Gerais. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1968>
- Marciano, Alexandre Germano, Alexandre Augusto Barbosa y Ana Paula Moni. 2018. "Estudo de cenários na simulação de eventos de cheia no rio Piranguçu e sua influência no Distrito Industrial de Itajubá-MG". *Revista Brasileira de Energias Renováveis* 71 (1): 1-5. <https://doi.org/10.5380/rber.v71i.57961>
- Marciano, Alexandre Germano. (2024). "Caracterização da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos dos três principais afluentes do rio Doce". Tesis de Doctorado en Medio Ambiente y Recursos Hídricos, Universidad Federal de Itajubá, Itajubá. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/4047>
- Mauri, Gabriela de Nadai, Eliza Rocha Moreto, Vanielle Aparecida do Patrocínio Gomes y Rodrigo Randow de Freitas. 2019. "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* 15 (7). <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v15i7.5258>
- Mendes, João Francisco Alves y Sérgio Luís Boeira. 2022. "Representações sociais sobre 'ser atingido' por rejeitos de minério: um estudo sobre os afetados pela barragem de Fundão". *Desenvolvimento e Meio Ambiente* 60. <https://doi.org/10.5380/dma.v60io.76467>
- Moreira, Guilherme de Barros, Carolina Barcelos Silva de Andrade y José Augusto Costa Gonçalves. 2020. "A fiscalização do uso outorgado dos recursos hídricos de bacia declarada em situação crítica de escassez hídrica: estudo de caso na bacia Rio Suaçui-MG". *Research, Society and Development* 9 (97): e81973729. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3729>
- Munyaka Baraka, Jean-Claude Chenal, Alexis Gatoni Sebarenzi, Rim Mrani y Akuto Akpedze Konou. 2023. "Impact of Topography on Rural Cycling Patterns: Case Study of Bugesera District, Rwanda". *Urban Science*, 7 (1) : 8. <https://doi.org/10.3390/urbansci7010008>
- Nelson, Alex, Stanford Gibson y Alex Sanchez. 2022. *Development of a Two-Dimensional HEC-RAS Sediment Model for the Chippewa River, Wisconsin, for Software Development and Sediment Trend Analysis*. Engineer Research & Development Center, ERDC/TN RSM-22-2 June 2022. <http://dx.doi.org/10.21079/11681/44561>
- Nistoran, Daniela-Elena Gogoșe, Cristina Sorana Ionescu y Ștefan-Mugur Simionescu. 2023. "Influence of Dam Break Scenarios on Flood Wave Characteristics. Case Study-Paltinu Dam, Romania". *IOP Science*, 1136 (1): 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012031>
- Palú, Marcos Cristiano y Pierre Y. Julien. 2019. "Modeling the Sediment Load of the Doce River after the Fundão Tailings Dam Collapse, Brazil". *Journal of Hydraulic Engineering* 145 (5): 05019002. <https://doi.org/10.1061/ASCE-HY.1943-7900.0001582>
- Patriadi, Andi, Ria Asih Aryani Soemitro, Dwa Desa Warnana, Wasis Wardoyo, Toshifumi Mukunoki y Gozo Tsujimoto. 2021. "The Influence of Sembayat Weir on Sediment Transport Rate in the Estuary of Bengawan Solo River, Indonesia". *GEOMATE Journal* 20 (81): 35-43.
- Pereira, Gabriela Soares. 2020. "Aplicação do Índice Padronizado de Precipitação SPI e de Vazão SSI para análise de eventos de seca na bacia do Rio Suaçui Grande/MG". Tesis de Maestría en Gestión y Regulación de Recursos Hídricos, Universidad Federal de Itajubá, Itabira. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3444>

- Pereira, Gregore Leal, Laysa Tamer Alves, Leandro Bastos Barbosa y Cláudio Bonfante de Oliveira. 2022. “Correção e mudanças dos cursos dos rios com gabião para barragens”. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 5 (4): 3491-3504. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n4-003>
- Rahman, Shehnaz Ary y Dibakar Chakrabarty. 2020. “Sediment Transport Modelling in An Alluvial River with Artificial Neural Network”. *Journal of Hydrology* 588: 125056. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125056>
- Rangel, Boris Daniel Ávila. 2021. “Comportamento morfológico no delta do rio Magdalena Colômbia devido as variações da vazão em escala intra e interanual”. Tesis de Doctorado em Ingeniería Oceánica, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl/THESIS/10002785/doutorado_borisavila_20220304081600403.pdf
- Reis, Deyse Almeida dos, Hubert Mathias Peter Roeser y Aníbal da Fonseca Santiago. 2020. “Environmental Impacts at The Bottom Sediments in A Doce River Tributary After the Fundão Dam Rupture”. *Research, Society and Development* 9 (2): 22. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1895>
- Saadi, Allaoua y Jackson Cleiton Ferreira Campos. 2015. “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* 24 (1-2).
- Santana, Felipe C., Márcio R. Francelino, Carlos E. G. R. Schaefer, Gustavo V. Veloso, Elpídio I. Fernandes-Filho, Adalgisa de J. P. Santana, Lucas B. Timo y André P. Rosa. 2021. “Water Quality of the Gualaxo Do Norte and Carmo Rivers After the Fundão Dam Collapse, Mariana, MG”. *Water, Air, & Soil Pollution* 232 (155): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05113-3>
- Schumm, Stanley A. 1977. *The fluvial system*. New York: John Wiley & Sons.
- Setiawan, Naufal y Masato Furuya. 2024. “Heavy Rain Episodes Identified by L-band INSAR and Limitations of Split-Spectrum Method in Indonesia”. *Geosfera Indonesia* 9 (1): 1-15. <https://doi.org/10.19184/geosi.v9i1.38154>
- Silva, Danielle Letícia da, Mateus Carvalho Ferreira y Maria Rita Scotti. 2015. “O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana MG a Regência ES”. *Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG* 24 (1-2).
- Urzică, Andrei, Alin Mihai-Pintilie, Cristian Constantin Stoleriu, Cătălin Ioan Cîmpianu, Elena Huțanu, Claudiu Ionuț Pricop y Adrian Grozavu. 2021. “Using 2D HEC-RAS Modeling and Embankment Dam Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System NE Romania”. *Water* 13 (1): 57. <https://doi.org/10.3390/w13010057>
- Wu, Weiming. 2004. “Depth-Averaged Two-Dimensional Numerical Modeling of Unsteady Flow and Nonuniform Sediment Transport in Open Channels”. *Journal of Hydraulic Engineering* 130 (10): 1013-1024. [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, Weiming y Sam S. Y. Wang. 2006. “Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity”. *Journal of Hydraulic Engineering* 132 (8): 858-862. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:8\(858\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(858))

Alexandre Germano Marciano

Doctor en Ciencias Ambientales y Recursos Hídricos, magíster en Ingeniería Hídrica por la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI) y licenciado en Administración de Empresas por la Facultad de Cenecistas de Varginha. Actualmente es funcionario de la Universidad Federal de Itajubá. Tiene experiencia en ingeniería hídrica y meteorología, con énfasis en inundaciones.

Pedro Jessid Pacheco Torres

Ingeniero de Producción por la Corporación Universitaria de la Costa (CUC). Actualmente es profesor asociado de la Corporación Universitaria Reformada. Posee experiencia en Ingeniería Energética e Ingeniería de Producción, con énfasis en energías renovables, biomasa y sostenibilidad en comunidades aisladas. Sus líneas de trabajo incluyen el aprovechamiento de residuos agrícolas, el desarrollo de tecnologías limpias y la promoción de fuentes alternativas de energía.

Alessandro Luvizon Bérqamo

Doctor y magíster en Oceanografía Física por la Universidad de São Paulo. Licenciado en Física por la Universidad Estatal de Londrina. Cuenta con amplia trayectoria en oceanografía, con énfasis en la dinámica estuarina, abordando estudios observacionales de flujos inducidos por gradientes de densidad, mareas y forzamientos meteorológicos, así como procesos de mezcla, advección, difusión y transporte de propiedades conservativas como salinidad y volumen de agua.

Alexandre Augusto Barbosa

Doctor en Ingeniería Ambiental por la Universidad de São Paulo, magíster en Ingeniería Mecánica por la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI) e Ingeniero Mecánico. Es profesor titular de la Universidad Federal de Itajubá (MG) desde 1993. Sus principales actividades académicas e investigativas se orientan a la docencia, control de inundaciones, gestión de sistemas hidráulicos y mitigación de riesgos hídricos.

Pollyana dos Reis Mendes Marciano

Licenciada en Sistemas de Información por la Facultad Cenecista de Varginha, con especialización en Gestión de Recursos Humanos (MBA) por la Universidad Norte de Paraná, y formación técnica en Contabilidad por la Escola Municipal José Augusto de Paiva. Actualmente se desempeña como asistente técnico-administrativa en la Universidad Federal de Itajubá, con experiencia en gestión institucional, administración universitaria y apoyo técnico en proyectos académicos y científicos.