



**JONAS FARIA DIONÍSIO DE OLIVEIRA**

**MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS**

**LAVRAS - MG  
2024**

**JONAS FARIA DIONÍSIO DE OLIVEIRA**

**MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Gilberto Coelho  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Jonas Faria Dionísio de.  
Monitoramento hidrossedimentológico na bacia hidrográfica do  
Rio Pandeiros / Jonas Faria Dionísio de Oliveira. - 2024.  
106 p.

Orientador(a): Gilberto Coelho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.  
Bibliografia.

1. Hidrossedimentologia. 2. Curva chave de sedimentos. 3.  
Recursos hídricos. I. Coelho, Gilberto. II. Título.

**JONAS FARIA DIONÍSIO DE OLIVEIRA**

**MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS**

**HYDROSEDIMENTOLOGICAL MONITORING  
IN THE PANDEIROS RIVER BASIN**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos para a obtenção do título de Doutor.

Aprovada em 21 de junho de 2024.

Dra. Livia Alves Alvarenga - UFLA

Dr. Vinícius Oliveira Silva - UFLA

Dr. Daniel Brasil Ferreira Pinto - UFVJM

Dr. Rafael Alvarenga Almeida - UFVJM

Prof. Dr. Gilberto Coelho  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2024**

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Recursos Hídricos (DRH) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PPGRH), pelo apoio.

Aos envolvidos no projeto de pesquisa e desenvolvimento “GT-0611”, especialmente àqueles que participaram diretamente das atividades de campo.

Ao professor Gilberto Coelho, pela confiança e pelas experiências compartilhadas.

Aos companheiros do dia-a-dia, colegas de laboratório e professores, os quais não citarei nomes pois são muitos, por compartilharem momentos de descontração e aprendizado.

Aos meus pais, Ignácio e Nair, e aos meus irmãos, Natália, Jefferson, Naira e Yara, pelo apoio.

À minha noiva Jeniffer, pelo apoio nas horas mais difíceis, pela paciência, compreensão e pelos bons conselhos.

E finalmente, agradeço a Deus por mais uma etapa concluída.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Este estudo foi desenvolvido em parceria com a Cemig e Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, por meio do projeto de pesquisa e desenvolvimento “GT-0611 – Descomissionamento da PCH Pandeiros: uma experiência inédita na América do Sul”

## Resumo

O Rio Pandeiros possui grande importância ecológica para a região norte do estado de Minas Gerais, fato este que determinou a criação de diferentes Espaços Territoriais Especialmente Protegidos em sua bacia. Em seu curso está localizada a Pequena Central Hidrelétrica Pandeiros, construída em 1957 e atualmente em processo de descomissionamento. Uma das fases do processo de descomissionamento consiste na realização de estudos, necessários para avaliar os impactos decorrentes do encerramento das operações do empreendimento, bem como para orientar o processo de tomada de decisões. Deste modo, os principais objetivos dos estudos aqui apresentados foram avaliar a influência do reservatório da Pequena Central Hidrelétrica Pandeiros sobre o transporte de sedimentos no Rio Pandeiros e ajustar modelos para estimar variáveis sedimentométricas (concentração de sedimentos e descarga sólida em suspensão) utilizando as variáveis vazão e turbidez. Também foram objetivos avaliar a composição dos sólidos transportados pelo Rio Pandeiros, bem como avaliar a correlação entre as variáveis analisadas. Os dados utilizados foram medidos entre maio de 2019 e janeiro de 2023. As seguintes variáveis foram analisadas: vazão, turbidez, precipitação, sólidos totais (fixos e voláteis) e sólidos suspensos (fixos e voláteis). Os resultados indicaram que, nas condições observadas durante a realização do estudo, o reservatório não afetou a concentração e a composição dos sedimentos. Além disso, foi constatado que os sólidos transportados são compostos principalmente por material inorgânico. Com relação aos modelos ajustados, os melhores resultados foram obtidos utilizando o modelo potencial para estimar a descarga sólida em suspensão. Para estimar a concentração de sólidos suspensos os melhores resultados foram obtidos pelo modelo potencial, utilizando a vazão como variável independente, e linear, utilizando a turbidez como variável independente. Concluiu-se que o reservatório não influenciou de forma significativa a concentração de sedimentos e que as curvas chave de sedimentos e os modelos ajustados para estimar a concentração de sólidos podem ser utilizados para auxiliar no monitoramento hidrossedimentológico no Rio Pandeiros. Este trabalho faz parte do Subprojeto “Monitoramento Hidrossedimentológico na Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros”, que é parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento “GT-0611 – Descomissionamento da PCH Pandeiros: uma experiência inédita na América do Sul”.

Palavras-chave: Recursos hídricos; Sólidos Suspensos; Hidrossedimentologia; Rio Pandeiros; Curva chave de sedimentos.

## Abstract

The Pandeiros River is of great ecological importance for the northern region of the State of Minas Gerais, which has led to the creation of several Special Protected Areas in its basin. On its course is the Pandeiros Small Hydroelectric Plant, built in 1957 and currently in the process of being decommissioned. One of the stages of the decommissioning process is to carry out the studies necessary to assess the impact of the cessation of the project's operations and to guide the decision-making process. Thus, the main objectives of the studies presented here were to evaluate the influence of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir on sediment transport in the Pandeiros River and to fit models to estimate sedimentometric variables (sediment concentration and suspended solids discharge) using the variables flow and turbidity. The objectives were also to evaluate the composition of the solids transported by the Pandeiros River and to assess the correlation between the variables analyzed. The study used data measured between May 2019 and January 2023. The following variables were analyzed: flow, turbidity, precipitation, total solids (fixed and volatile), and suspended solids (fixed and volatile). The results indicated that under the conditions observed during the study, the reservoir did not affect the concentration and composition of the sediments. In addition, it was found that the solids are mainly composed of inorganic material. Regarding the fitted models, the best results were obtained using the potential model to estimate the suspended solids discharge. To estimate the concentration of suspended solids, the best results were obtained by the potential model using flow as the independent variable and the linear model using turbidity as the independent variable. It was concluded that the reservoir did not significantly affect the sediment concentration and that the sediment curves and the models fitted to estimate the suspended solids concentration can be used to assist in the hydrosedimentological monitoring of the Pandeiros River. This work is part of the subproject "Hydrosedimentological Monitoring in the Pandeiros River Basin", which is part of the research and development project "GT-0611 - Decommissioning of the Pandeiros SHP: an unprecedented experience in South America".

Keywords: Water resources; Suspended Solids; Hydrosedimentology; Pandeiros river; Sediment rating curve.

## **Impactos sociais, tecnológicos, econômicos e culturais**

A tese intitulada “Monitoramento hidrossedimentológico na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros” faz parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento “GT-0611 – Descomissionamento da PCH Pandeiros: uma experiência inédita na América do Sul”. De modo geral, os objetivos da tese foram: avaliar a influência do reservatório da Pequena Central Hidrelétrica Pandeiros (PCH Pandeiros) sobre o transporte de sedimentos e obter dados com potencial para auxiliar em trabalhos futuros no Rio Pandeiros. O estudo tem potencial para impactar a qualidade ambiental local, especialmente no Rio Pandeiros, uma vez que os dados obtidos podem ser utilizados como base para decidir sobre a remoção da barragem da PCH Pandeiros. Indiretamente, o trabalho tem potencial para impactar a comunidade local, especialmente os moradores da vila de Pandeiros, localizada do município de Januária, uma vez que a população local possui forte ligação afetiva com a PCH Pandeiros e já demonstrou ser contrária à remoção da barragem da PCH Pandeiros. No âmbito científico, o trabalho está diretamente relacionado a uma experiência inédita na América do Sul, que é o descomissionamento de barragens para geração de energia elétrica, sendo assim, os resultados obtidos têm potencial para influenciar no desenvolvimento de novas metodologias voltadas ao descomissionamento de barragens. Este estudo contou com a participação direta de dois docentes, um técnico e dois estudantes de pós-graduação em nível de doutorado. Os impactos deste estudo estão relacionados com a área temática de meio ambiente da Política Nacional de Extensão e podem ser enquadrados dentro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) no Grupo 15: “Vida Terrestre”, dentro do subgrupo 15.1: “assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, em especial florestas, zonas úmidas, montanhas e terras áridas, em conformidade com as obrigações decorrentes dos acordos internacionais”. Também podem ser enquadrados dentro do Grupo 6: “Água potável e saneamento”, dentro do subgrupo 6.6: “proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos”.

## **Social, technological, economic and cultural impacts**

The thesis entitled “Hydrosedimentological Monitoring in the Pandeiros River Basin” constitutes a component of the research project “GT-0611 - Decommissioning of the Pandeiros SHPP: An Unprecedented Experience in South America”. In general, the objectives of the thesis were: to evaluate the influence of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant (Pandeiros SHP) reservoir on sediment transport and to obtain data with the potential to assist future work on the Pandeiros River. The study has the potential to impact local environmental quality, particularly in relation to the Pandeiros River, as the data obtained can be used as a basis for deciding on the removal of the Pandeiros SHP dam. The work may indirectly impact the local community, particularly the residents of the village of Pandeiros, located in the municipality of Januária, as the local population has a strong emotional connection with the Pandeiros SHP and has already demonstrated its opposition to the removal of the Pandeiros SHP dam. From a scientific perspective, the study is directly related to an unprecedented experience in South America: the decommissioning of dams for electricity generation. Consequently, the results obtained have the potential to influence the development of new methodologies aimed at decommissioning dams. This study was conducted with the direct involvement of two teachers, one technician, and two postgraduate students at the doctoral level. The impacts of this study are related to the environment thematic area of the National Extension Policy and can be contextualized within the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN), specifically within Group 15: "Terrestrial life," and subgroup 15.1: "Ensure the conservation, restoration, and sustainable use of terrestrial and inland freshwater ecosystems and their services, in particular forests, wetlands, mountains, and drylands, in accordance with obligations under international agreements." They can also fall under Group 6: “Drinking water and sanitation”, under subgroup 6.6: “Protect and restore water-related ecosystems, including mountains, forests, wetlands, rivers, aquifers and lakes”.

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Bacia hidrográfica do Rio Pandeiros .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Espaços territoriais especialmente protegidos .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Histórico da proteção ambiental na bacia do Rio Pandeiros.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Pequena Central Hidrelétrica Pandeiros.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Processos hidrossedimentológicos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Erosão .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Transporte de sedimentos .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Descarga sólida em suspensão .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>Descarga sólida total.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5</b>	<b>Curva chave de sedimentos.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6</b>	<b>Relação entre turbidez e sólidos suspensos .....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>39</b>

### CAPÍTULO 2

	<b>Artigo 1 - Influence of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir on the concentration and composition of solids transported by the Pandeiros River, Brazil .....</b>	<b>49</b>
	<b>Artigo 2 - Determination of suspended sediment rating curve and models to estimate the suspended solids concentration in the Pandeiros River, Brazil .....</b>	<b>76</b>

### CAPÍTULO 3

	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>106</b>
--	-----------------------------------	------------

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

O Rio Pandeiros, com aproximadamente 155 km de extensão, é um dos afluentes da margem esquerda do rio São Francisco, sendo considerado de importância estratégica para o ecossistema da região, uma vez que é rota de migração e área de desova para peixes que vivem no rio São Francisco no trecho entre as barragens de Sobradinho e Três Marias (Bethonico, 2009; Fonseca *et al.*, 2011; Lima; Augustin; Oliveira, 2019; Nunes *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2019).

Devido à sua grande importância, principalmente do ponto de vista ecológico, em 1992 o Rio Pandeiros tornou-se um rio de preservação permanente (Minas Gerais, 1992, 2004) e, posteriormente, a sua bacia foi declarada Área de Preservação Ambiental, em 1995 (Minas Gerais, 1995). Por fim, em 2004 foi criado o Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros, uma unidade de conservação de proteção integral que visa proteger a área alagável e lagoas marginais situadas no baixo curso do rio (Minas Gerais, 2004).

Neste cenário, encontra-se a Pequena Central Hidrelétrica Pandeiros (PCH Pandeiros), que atualmente está desativada. A PCH Pandeiros foi instalada em 1957, e operou por cerca de 50 anos. O fim da operação ocorreu em 2008 com o indeferimento do pedido de renovação da Licença de Operação pela Superintendência Regional de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SUPRAM). Posteriormente, em 2018, a concessão da PCH Pandeiros também foi extinta pelo Ministério de Minas e Energia.

Com a extinção da concessão e diante da impossibilidade de gerar energia, teve início o processo de descomissionamento da PCH Pandeiros. Uma das alternativas prevista neste processo consiste na remoção da barragem, no entanto, pouco se sabe sobre os impactos que podem ser gerados devido ao grande volume de sedimentos depositado no reservatório, uma vez que atualmente o reservatório se encontra assoreado. Deste modo, estudos que busquem entender a influência do reservatório sobre o transporte de sedimentos assumem grande importância.

Sendo assim, foi realizado o monitoramento hidrossedimentológico no Rio Pandeiros, entre os anos de 2019 e 2023, com o intuito principal de avaliar a influência da PCH Pandeiros sobre o transporte de sedimentos. O monitoramento realizado resultou na elaboração de dois artigos, intitulados “Influence of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir on the concentration and composition of solids transported by the Pandeiros River, Brazil” e

“Determination of suspended sediment rating curve and models to estimate the suspended solids concentration in the Pandeiros River, Brazil”.

O primeiro artigo teve como objetivo principal avaliar a influência do reservatório da PCH Pandeiros sobre o transporte de sedimentos, para verificar se nas atuais condições o reservatório ainda é capaz de reter parte do sedimento transportado. Neste trabalho também foram avaliadas a composição dos sólidos transportados pelo Rio Pandeiros, bem como as relações dos sólidos com outras variáveis monitoradas.

O segundo artigo teve como objetivo principal ajustar curvas chave de transporte de sedimentos para diferentes seções do Rio Pandeiros. Também foi objetivo neste trabalho ajustar modelos para estimar a concentração de sólidos suspensos por meio de dados de turbidez e vazão, bem como fazer uma caracterização geral do transporte de sedimentos no Rio Pandeiros.

Os artigos citados fazem parte do Capítulo 2 desta tese, que conta com três capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma breve revisão de literatura, que busca apresentar os elementos teóricos necessários a compreensão dos artigos. Já no Capítulo 3 são expostas algumas considerações finais sobre o trabalho.

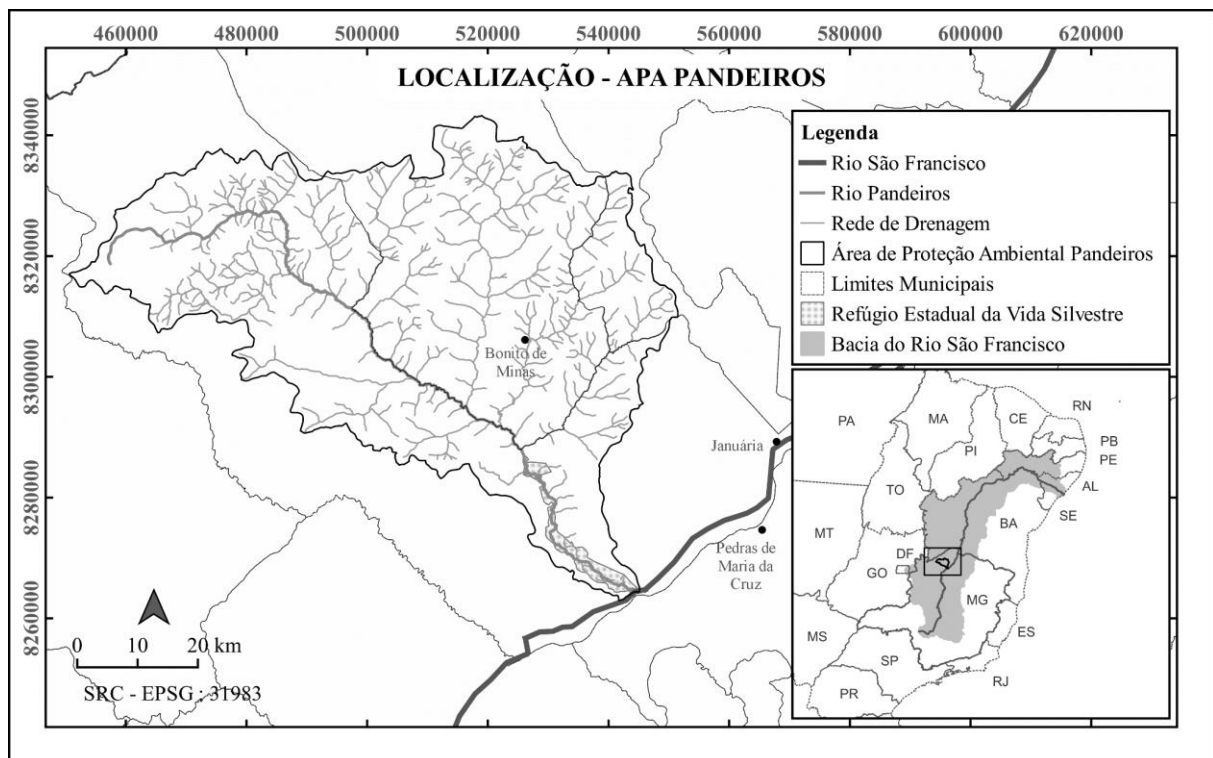
Este estudo foi desenvolvido em parceria com a Cemig e Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, por meio do projeto de pesquisa e desenvolvimento “GT-0611 – Descomissionamento da PCH Pandeiros: uma experiência inédita na América do Sul”.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Bacia hidrográfica do Rio Pandeiros

A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (Figura 1) está localizada na margem esquerda do Rio São Francisco, na região classificada como médio curso, e compreende os municípios de Bonito de Minas (40 %), Cônego Marinho (7%) e Januária (53%), com uma área de aproximadamente 3960 km<sup>2</sup>. Limita-se com a Serra do Gibão (NW), com a Serra das Araras (SW), com o divisor de águas do rio Peruaçu até o São Francisco (NE) e com o divisor de águas da bacia do rio Pardo ao sul (S-SW) (Bethonico, 2009a).

Figura 1 - Localização da Área de Proteção Ambiental do Rio Pandeiros.

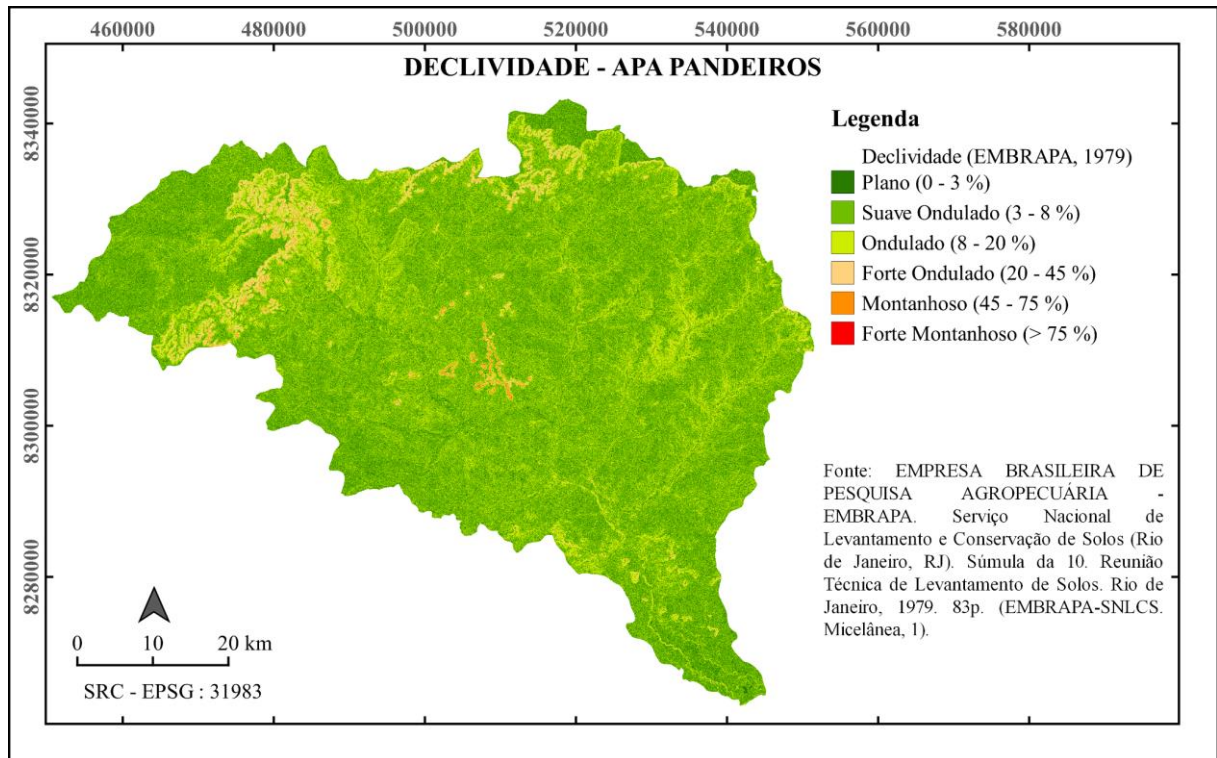


Fonte: Do Autor (2022).

O Rio Pandeiros possui aproximadamente 155 km de extensão e tanto sua nascente quanto sua foz estão localizadas no município de Januária. O clima na região é Aw, segundo classificação de Köppen, que corresponde ao clima tropical com inverno seco, precipitação total do mês mais seco inferior a 60 mm e temperatura média do mês mais frio acima de 18 °C (Martins *et al.*, 2018; Silva; Assad; Evangelista, 2008). A estação chuvosa, que concentra cerca de 90% da precipitação, tem início entre o final do mês de setembro e o início do mês de outubro e ocorre até o final do mês de março e início de abril.

A maior parte do relevo na bacia do Rio Pandeiros (Figura 2) varia entre as classes “Plano” e “Ondulado”, sendo o relevo predominante na região classificado como “Suave Ondulado”, representando cerca de 63% da área total da bacia. As classes de relevo “Plano” (17%) e “Ondulado” (17%) representam cerca de 34% da área da bacia. As demais classes ocupam uma porcentagem inferior à 3%.

Figura 2 – Declividade da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros<sup>1</sup>.

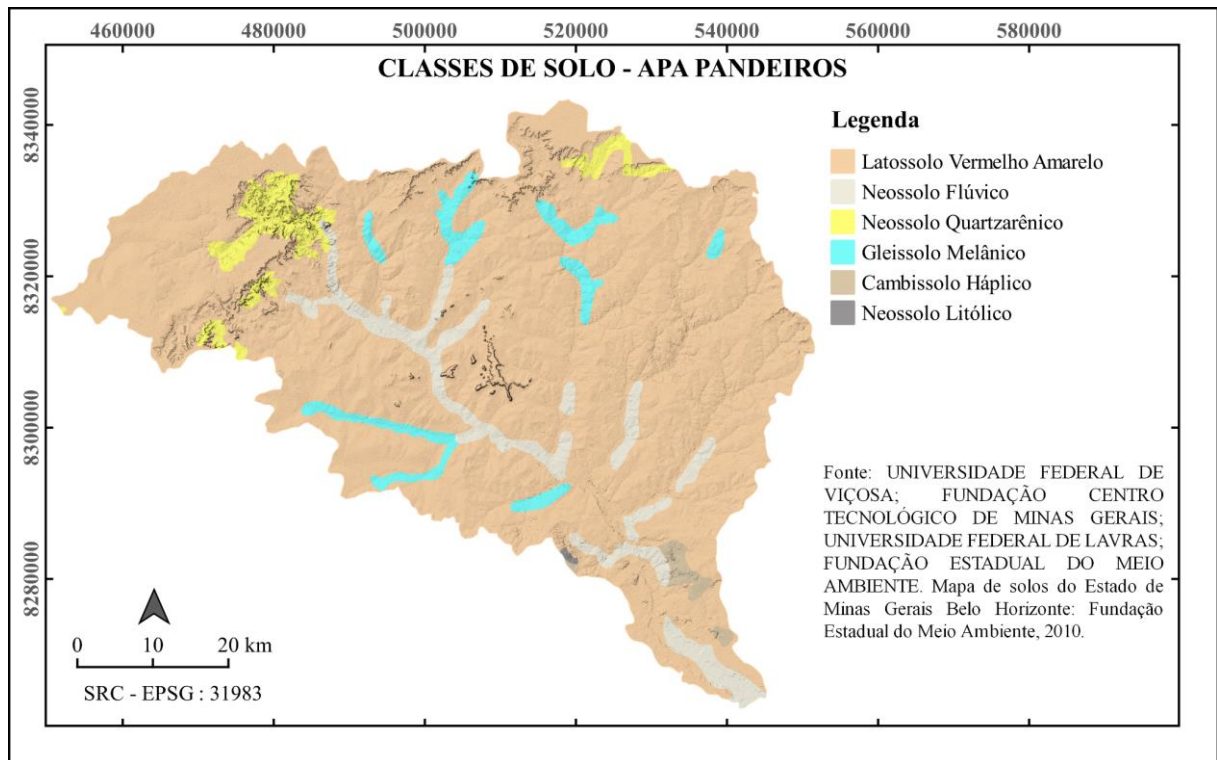


Fonte: Do Autor (2020).

Com relação aos solos (Figura 3), são encontradas seis classes principais na bacia do Rio Pandeiros, sendo estas: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) (87,6%); Neossolo Flúvico (RY) (5,4%); Neossolo Quartzarênico (RQ) (3,2%); Gleissolo Melânico (GM) (3%) e Cambissolo Háptico (CX) e Neossolo Litólico (RL) (<1%).

<sup>1</sup> A declividade foi obtida por meio do processamento digital do Modelo Digital de Elevação (MDE) Alos-Palsar, com resolução espacial de 12,5 m, disponibilizado na plataforma de dados Vertex (Alaska Satellite Facility, 2014). As classes foram definidas conforme classificação proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1979).

Figura 3 – Mapa de solos da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros<sup>2</sup>.



Fonte: UFV (2010).

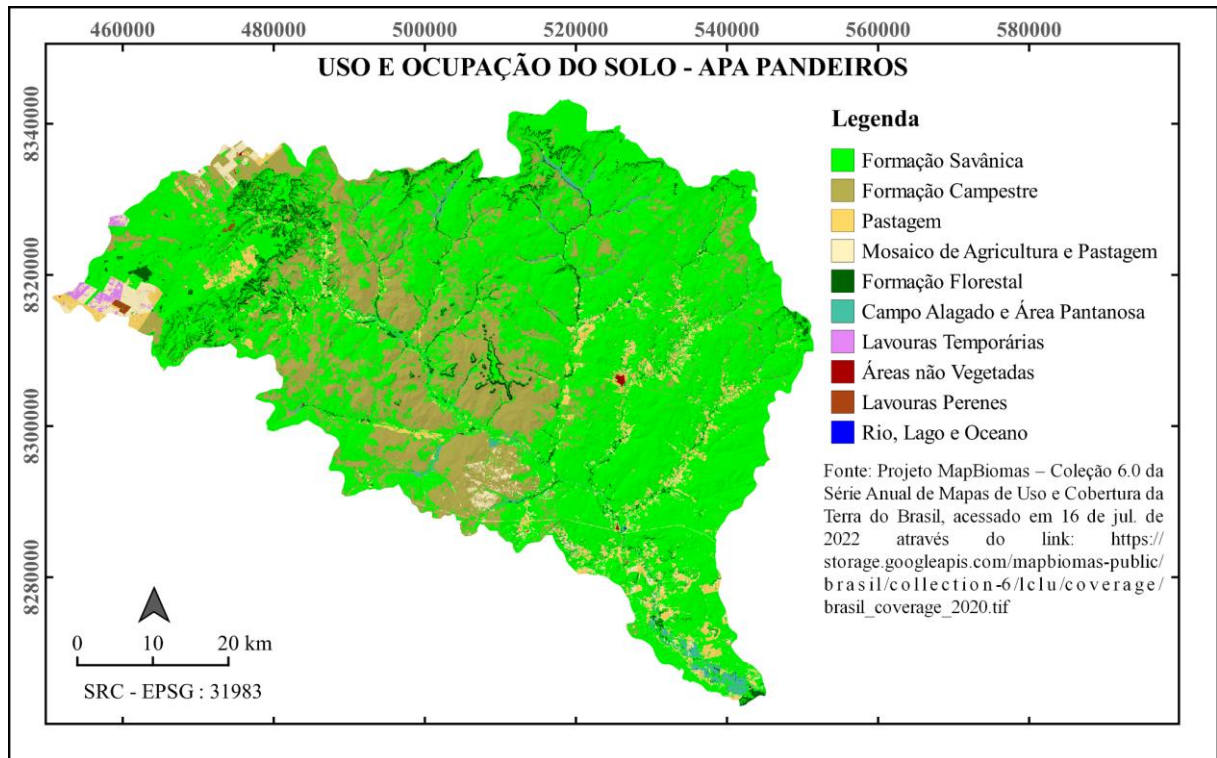
Segundo Reatto *et al.* (2008) os Latossolos (Vermelho e Vermelho-Amarelo) e o Neossolo Quartzarênico correspondem as classes de maior ocorrência no bioma cerrado e geralmente estão associadas as formas de relevo plano ou suave-ondulado. De acordo com Oliveira (2013) na Área de Proteção Ambiental do Rio Pandeiros (APA Pandeiros) se destacam as classes dos Latossolos e Neossolo Quartzarênico, desenvolvidos a partir de arenitos da formação Urucuia. Segundo Nunes *et al.* (2009) os solos encontrados na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros são “essencialmente arenosos, não estruturados, profundos e com elevada drenagem”. Além disso, os autores classificam os solos como sendo pobres em nutrientes, ácidos e carentes de matéria orgânica.

Quanto ao uso e cobertura do solo (Figura 4), a maior parte da área da bacia é coberta por formações de cerrado (Formação Savânica -70% - e Formação Campestre – 19%), que correspondem a aproximadamente a 89% da área. A vegetação, característica do Cerrado, ocorre em áreas com clima classificado como Aw (verão quente e inverno seco), em que a

<sup>2</sup> As informações apresentadas foram extraídas do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, disponibilizado pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV, 2010)(Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2010). O Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais pode ser acessado no endereço eletrônico < [http://www.dps.ufv.br/?page\\_id=742](http://www.dps.ufv.br/?page_id=742) >.

precipitação média varia entre 750 e 2000 mm anuais, concentrada entre os meses de março e outubro (Ribeiro; Walter, 1998, 2008).

Figura 4 – Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros<sup>3</sup>.



Fonte: Projeto MapBiomias (2022).

De maneira geral o cerrado apresenta fisionomias que englobam formações savânicas, campestres e florestais. As formações florestais representam áreas com predominância de espécies arbóreas em que há formação de dossel contínuo. Já as formações savânicas correspondem às áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato graminoso sem que ocorra formação de dossel contínuo, enquanto as formações campestres se referem a áreas com predomínio de espécies herbáceas e algumas arbustivas, faltando árvores na paisagem (Ribeiro; Walter, 1998, 2008).

Nas variadas fitofisionomias do cerrado são observados solos, em sua maioria, profundos, com baixa fertilidade natural e acidez acentuada em relevo plano e suavemente ondulado, com estrutura propícia a mecanização (Bastos; Ferreira, 2010). Oliveira (2013) relata que a formação vegetal do tipo cerrado é predominante na APA Pandeiros, geralmente associada a solos arenosos e pobres em nutrientes, onde se destacam as classes dos Latossolos e Neossolos Quartzarênicos.

<sup>3</sup> As informações sobre uso e cobertura do solo foram obtidas do projeto MapBiomias, para o ano de 2020. Projeto MapBiomias – Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, acessado em 12 de jul. de 2022 através do link: < [https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR) >.

### **2.1.1 Espaços territoriais especialmente protegidos**

A criação de espaços territoriais especialmente protegidos é prevista na Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, e consiste em um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente (Brasil, 1981). De acordo com o Art. 225, §1º, inciso III da Constituição da República Federativa do Brasil, de 1988, incumbe ao Poder Público

definir, em todas as unidades da Federação, espaços territoriais e seus componentes a serem especialmente protegidos, sendo a alteração e a supressão permitidas somente através de lei, vedada qualquer utilização que comprometa a integridade dos atributos que justifiquem sua proteção (Brasil, 1988).

O inciso III é regulamentado pela Lei 9.985, de 18 de julho de 2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. A Lei 9.985 define dois grupos de unidades de conservação, sendo estes o grupo de Unidades de Proteção Integral e o grupo de Unidades de Uso Sustentável (Brasil, 2000).

O grupo das Unidades de Proteção Integral é composto por cinco categorias de unidades de conservação, sendo estas: Estação Ecológica; Reserva Biológica; Parque Nacional; Monumento Natural; e Refúgio da Vida Silvestre. Já o grupo das Unidades de Uso Sustentável é composto por sete categorias de unidades de conservação, sendo estas: Área de Proteção Ambiental; Área de Relevante Interesse Ecológico; Floresta Nacional; Reserva Extrativista; Reserva da Fauna; Reserva do Desenvolvimento Sustentável; e Reserva Particular do Patrimônio Natural (Brasil, 2000).

Atualmente, segundo informações obtidas da plataforma de Infraestrutura de Dados Espaciais IDE-SISEMA, existem na bacia do Rio Pandeiros duas áreas pertencentes ao grupo das Unidades de Uso Sustentável (Área de Proteção Ambiental e Reserva Particular do Patrimônio Natural) e uma área pertencente ao grupo das Unidades de Proteção Integral (Refúgio da Vida Silvestre) (IDE-SISEMA, 2018a, 2018b, 2018c). Além da existência de unidades de conservação em sua bacia, o Rio Pandeiros é considerado rio de preservação permanente (Minas Gerais, 1992).

### **2.1.2 Histórico da proteção ambiental na bacia do Rio Pandeiros**

A proteção do Rio Pandeiros, por meio da criação de leis, teve início em 1992, com a criação da Lei nº 10.629 de 16 de janeiro de 1992, posteriormente revogada pela Lei nº 15.082 de 27 de abril de 2004, que tornou o Rio Pandeiros um rio de preservação permanente (Minas Gerais, 1992, 2004).

De acordo com o Art.1º da lei 15.082, “consideram-se rios de preservação permanente os cursos de água ou trechos destes com características excepcionais de beleza ou dotados de valor ecológico, histórico ou turístico, em ambientes silvestres naturais ou pouco alterados” (Minas Gerais, 2004).

A declaração como rio de preservação permanente visa a:

- I - manter o equilíbrio ecológico e a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos e marginais;
- II - proteger paisagens naturais pouco alteradas, de beleza cênica notável;
- III - favorecer condições para a educação ambiental e a recreação em contato com a natureza;
- IV - proporcionar o desenvolvimento de práticas náuticas em equilíbrio com a natureza;
- V - favorecer condições para a pesca amadorística e desenvolver a pesca turística. (Minas Gerais, 2004).

Ademais, ficam proibidos:

- I - a modificação do leito e das margens, ressalvada a competência da União sobre os rios de seu domínio;
- II - o revolvimento de sedimentos para a lavra de recursos minerais;
- III - o exercício de atividade que ameace extinguir espécie da fauna aquática ou que possa colocar em risco o equilíbrio dos ecossistemas;
- IV - a utilização de recursos hídricos ou execução de obras ou serviços com eles relacionados que estejam em desacordo com os objetivos de preservação expressos no art. 2º desta lei. (Minas Gerais, 2004).

Vale ressaltar que o Rio Pandeiros tem importância estratégica para o ecossistema da região, uma vez que é considerado rota de migração e área de desova para peixes migradores que vivem no rio São Francisco no trecho entre as barragens de Sobradinho e Três Marias (Bethonico, 2009b; Fonseca *et al.*, 2011; Lima; Augustin; Oliveira, 2019; Nunes *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2019).

Já a criação da Área de Proteção Ambiental do Rio Pandeiros ocorreu em 1995, por meio da Lei Estadual nº 11.901 de 01 de setembro de 1995 (Minas Gerais, 1995). A APA Pandeiros corresponde à área da bacia hidrográfica do Rio Pandeiros, sendo a maior unidade de conservação do estado de Minas Gerais (Instituto Estadual de Florestas, 2013a; Nunes *et al.*, 2009). Segundo consta em sua lei de criação, a APA Pandeiros tem como objetivos:

- I - tornar efetiva a proteção do Rio Pandeiros, em cumprimento ao que dispõe a Lei nº 10.629, de 17 de janeiro de 1992;
- II - manter o equilíbrio ecológico e a diversidade biológica em ecossistemas aquáticos e terras úmidas adjacentes ao rio;
- III - proteger paisagens naturais de beleza cênica notável;
- IV - preservar áreas de significativa importância para a reprodução e o desenvolvimento da ictiofauna;
- V - criar condições para favorecer a educação ambiental e a recreação em contato com a natureza (Minas Gerais, 1995).

A Lei nº 11.901 também determinou a restrição das seguintes atividades na APA:

- I - a realização de atividades que possam colocar em risco os mananciais e os campos alagadiços;
- II - a execução de obras de terraplenagem e a abertura de canais, quando essas iniciativas importarem sensível alteração das condições ecológicas locais;
- III - a realização de atividades capazes de provocar erosão de terras ou assoreamento de coleções hídricas;
- IV - a realização de atividades que ameacem extinguir, na área protegida, espécies da biota regional;
- V - a supressão total ou parcial de remanescentes de matas ciliares e de outras formações de matas naturais (Minas Gerais, 1995).

A Área de Proteção Ambiental (APA) corresponde a uma das categorias de unidade de conservação estabelecidas pela Lei 9.985 de 18 de julho de 2000. De acordo com o Art. 14 da referida lei, a Área de Proteção Ambiental pertence ao grupo das unidades de uso sustentável, que tem como objetivo “compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais” (Brasil, 2000).

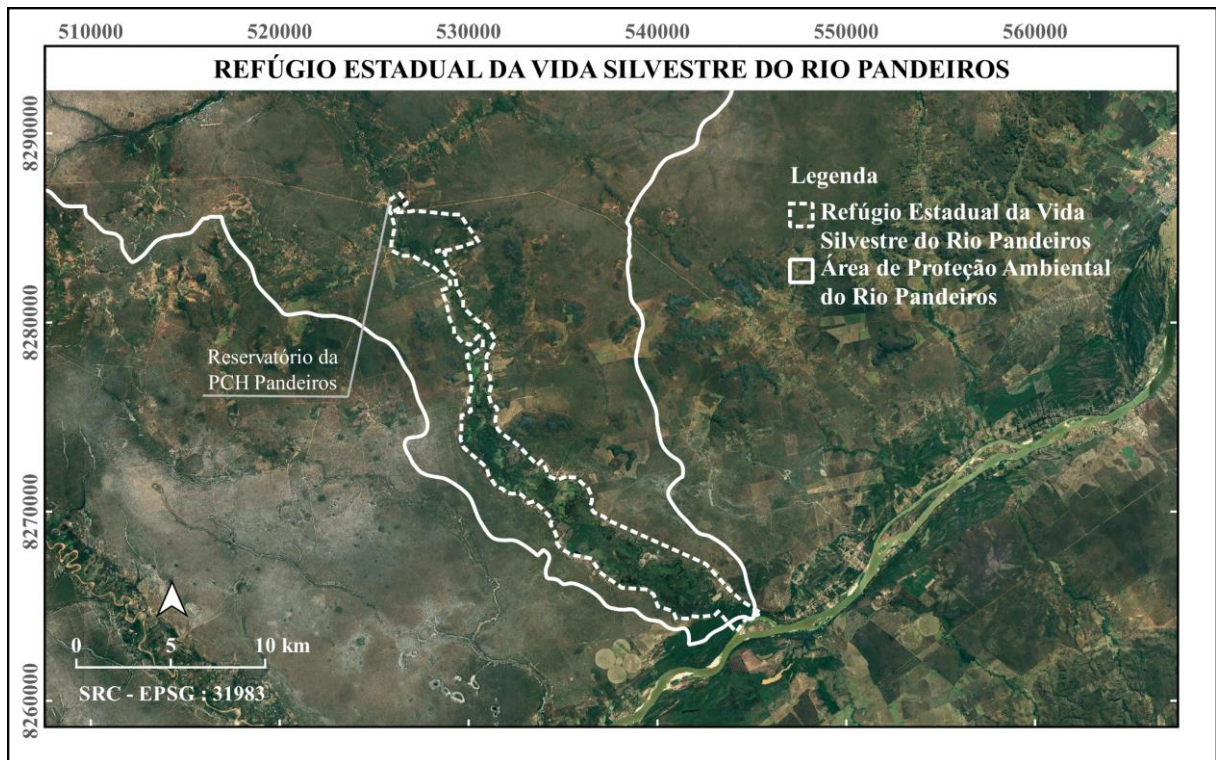
De acordo com a Lei 9985 de 18 de julho de 2000, a Área de proteção Ambiental

é uma área em geral extensa, com um certo grau de ocupação humana, dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e o bem-estar das populações humanas, e tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais (Brasil, 2000).

A Área de Proteção Ambiental pode ser constituída por terras públicas ou privadas, sendo possível estabelecer normas e restrições para a utilização de propriedades privadas localizadas em seu interior, respeitados os limites constitucionais (Brasil, 2000).

Quase dez anos após a criação da APA Pandeiros, no ano de 2004, foi criado o Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros (Figura 5), com uma área de aproximadamente 61 km<sup>2</sup>, por meio do Decreto nº 43.910 de 05 de novembro de 2004, “destinado a unidade de conservação de proteção integral” (Minas Gerais, 2004).

Figura 5 – Localização do Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros.



Fonte: Do Autor (2022).

O Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros foi criado com o intuito de proteger e conservar a ictiofauna da bacia do rio São Francisco, bem como garantir a proteção do Rio Pandeiros, de sua área alagável e lagoas marginais (Minas Gerais, 2004). Além disso, a criação desta unidade de conservação de proteção integral visa proteger ecossistemas locais, em especial a mata seca,

caracterizada pelo complexo de vegetação da floresta estacional decidual, caatinga arbórea, caatinga arbustiva arbórea, caatinga hiperxerófila, florestas associadas com afloramentos cársticos e outros, mata ciliar, vazante e seus estágios sucessionais (Minas Gerais, 2004).

O Refúgio de Vida Silvestre é uma das categorias previstas na Lei 9.985 de 18 de julho de 2000, e faz parte do grupo de unidades de proteção integral. As unidades de proteção integral têm como objetivo a preservação da natureza, sendo admitido apenas o uso indireto de seus recursos naturais, ou seja, aquele que não envolve consumo, coleta, dano ou destruição dos recursos naturais (Brasil, 2000).

No estado de Minas Gerais a identificação, criação e implantação de áreas protegidas é uma das atribuições do Instituto Estadual de Florestas (IEF, 2024). Tanto a APA Pandeiros quanto o Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros são administrados pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF).

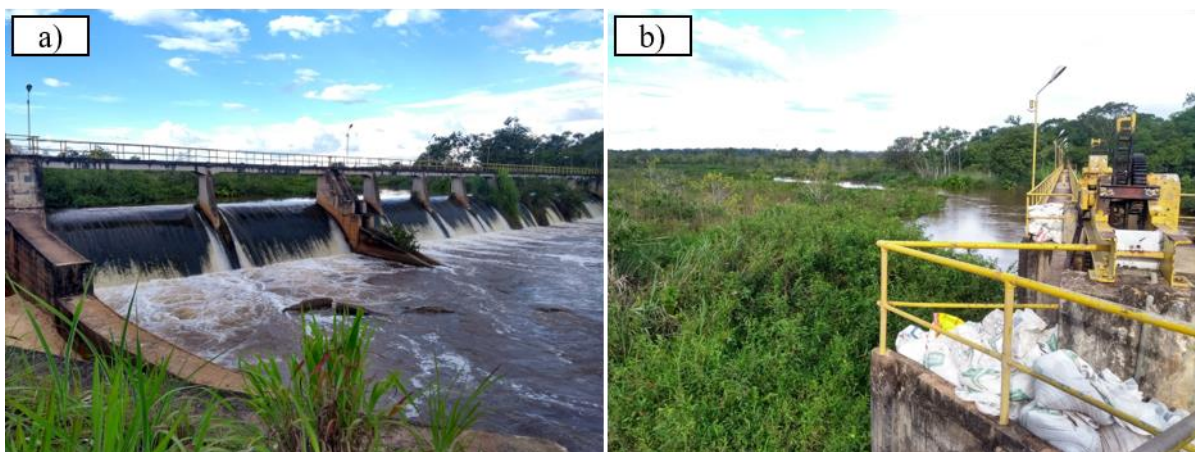
Apesar de ser uma área de grande importância ambiental, diversos problemas podem ser identificados na bacia do Rio Pandeiros. Como exemplo, pode-se citar a presença de voçorocas e processos erosivos avançados, o desmatamento ilegal, a prática de queimadas, a pesca e caça ilegais, a ocupação desordenada das margens dos cursos d'água, a descaracterização de veredas, entre outros (Bahia et al., 2009; Bethonico, 2009a; Fonseca *et al.*, 2011; Lima; Augustin; Oliveira, 2019; Nunes *et al.*, 2009).

### 2.1.3 Pequena Central Hidrelétrica Pandeiros

A Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Pandeiros, instalada no Rio Pandeiros (15°30'14.53"S; 44°45'26.95"O), está localizada a aproximadamente 50 km acima do encontro com o rio São Francisco, próximo a comunidade de Pandeiros, que pertence ao município de Januária, Minas Gerais. O acesso a PCH dá-se pela BR-479, que liga o município de Januária à Brasília.

Construída em concreto, a barragem (Figura 6) possui uma crista de 110 m, com altura máxima de 10,3 m e armazena água em uma área de aproximadamente 0,28 km<sup>2</sup>. A estrutura também conta com uma comporta de fundo, utilizada para descarga de fundo, procedimento em que se programa a parada total da usina para a retirada dos sedimentos de fundo por meio da drenagem do reservatório (Fonseca *et al.*, 2008).

Figura 6 – a) Barragem da PCH Pandeiros; b) Reservatório da PCH Pandeiros tomado por vegetação.



Fonte: Do Autor (2022).

A usina foi projetada para operar a fio d'água, ou seja, “utiliza reservatório com acumulação suficiente apenas para prover regularização diária ou semanal, ou ainda que utilize

diretamente a vazão afluyente do aproveitamento”, segundo a Resolução n° 425 de 1 de fevereiro de 2011 (ANEEL, 2011).

Apesar de ser denominada PCH Pandeiros, atualmente, se ainda estivesse em operação, o empreendimento seria enquadrado como Central Geradora Hidrelétrica (CGH), que de acordo com a Resolução Normativa n° 875 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), corresponde aos aproveitamentos hidrelétricos cuja capacidade geradora seja igual ou inferior a 5,0 MW (ANEEL, 2020). A capacidade de geração de energia na PCH Pandeiros é de 4,2 MW.

De acordo com a Resolução Normativa n° 875, de 10 de março de 2020 da Agência Nacional de Energia Elétrica, são consideradas pequenas centrais hidrelétricas os aproveitamentos hidrelétricos que possuam: potência instalada superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW; e área de reservatório de até 13 km<sup>2</sup>, excluindo a calha do leito regular do rio (ANEEL, 2020).

A geração de energia na PCH Pandeiros teve início no ano de 1957 e ocorreu até o ano de 2008, quando as atividades foram suspensas de maneira definitiva. De acordo com informações obtidas do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM), no ano de 2008 a PCH Pandeiros teve seu pedido de renovação da Licença de Operação indeferido pela Superintendência Regional de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SUPRAM, 2008) e posteriormente, no ano de 2018, sua concessão foi extinta pelo Ministério de Minas e Energia, por meio da Portaria n° 439, de 15 de outubro de 2018 (Ministério de Minas e Energia, 2018).

Segundo consta no Parecer Único da SUPRAM, o pedido de renovação da licença foi indeferido uma vez que o Instituto Estadual de Florestas (IEF) não concedeu anuência do pedido de funcionamento do empreendimento, alegando que as operações realizadas pelo empreendimento, como as descargas de fundo, causaram danos ao meio ambiente e a comunidades localizadas as margens do Rio Pandeiros (IEF, 2004; SUPRAM, 2008).

Apesar do fim da operação da PCH Pandeiros no ano de 2008, seu reservatório ainda regula o nível da água a montante, fazendo com que a lagoa localizada em sua lateral, que já foi temporária, não apresente grandes variações de nível, tornando-a perene (Souza et al., 2019). Atualmente o reservatório da PCH se encontra assoreado e em grande parte coberto por plantas aquáticas, como macrófitas, ou pela vegetação que se desenvolveu nos bancos de areia formados em seu interior (Figura 7).

Figura 7 – a) Reservatório da PCH Pandeiros - 2006; b) Reservatório da PCH Pandeiros - 2020.



Fonte: Google Earth (2021).

## 2.2 Processos hidrossedimentológicos

### 2.2.1 Erosão

A erosão é um processo natural e ocorre mesmo em ecossistemas em equilíbrio (Hernani et al., 2002). Segundo Carvalho (2008) há dois tipos de erosão: a geológica e a acelerada. A erosão geológica, também chamada de erosão natural consiste no processo que envolve o arranque e transporte de partículas ou materiais sem a intervenção humana. Já a

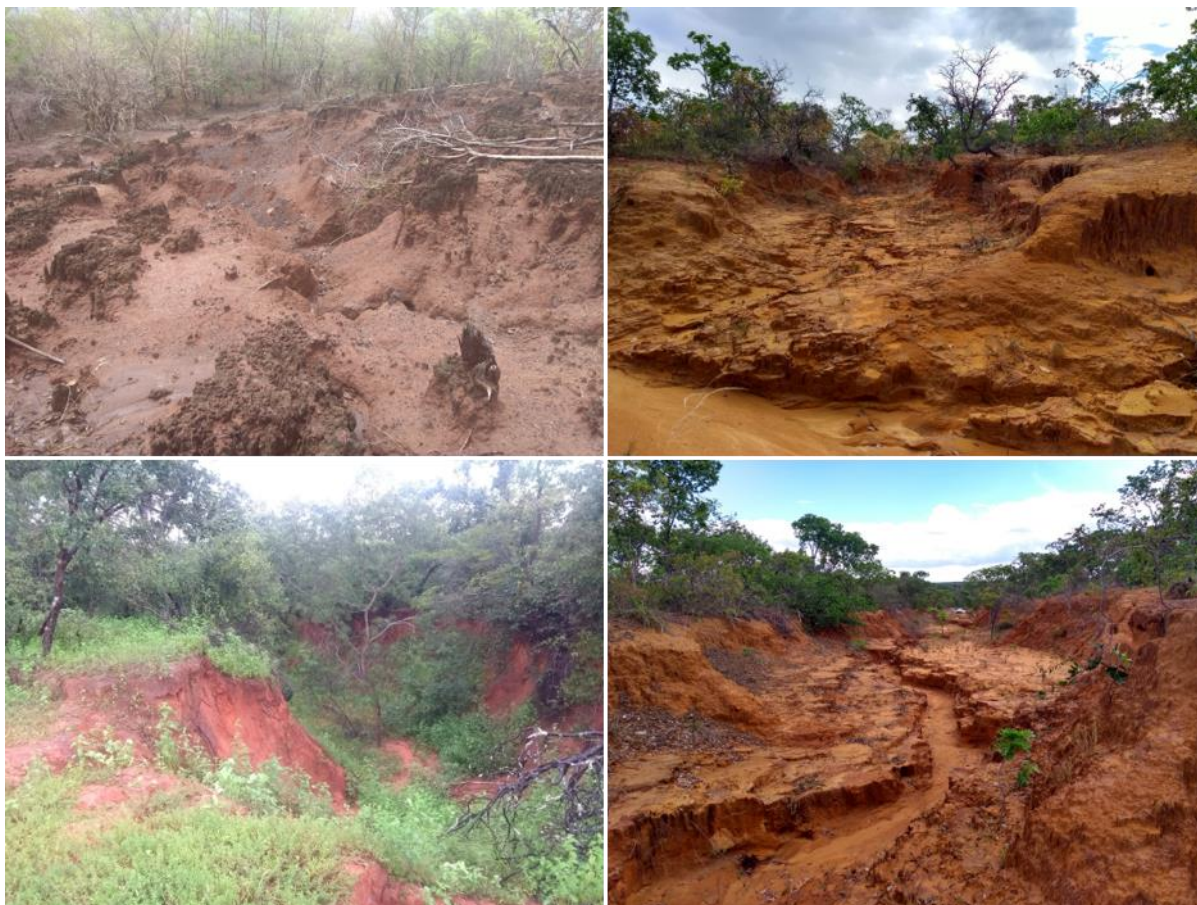
erosão acelerada, também conhecida como erosão antrópica, é aquela provocada pela ação humana, que eleva a taxa de incidência desse processo (Carvalho, 2008; Hernani et al., 2002).

No Brasil a erosão hídrica simboliza uma das principais causas da degradação dos solos (Hernani *et al.*, 2002; Pereira; Tosto; Carvalho, 2015; Silva *et al.*, 2005) e resulta em impactos como a redução da produtividade, diminuição dos recursos naturais existentes, esgotamento das terras agricultáveis, redução da infiltração, aumento do escoamento superficial, assoreamento de corpos hídricos e deterioração da qualidade da água (Barros *et al.*, 2018; Davies-Colley; Smith, 2001; Ferreira *et al.*, 2011; Rodrigues *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2015; Vanzela; Hernandez; Franco, 2010). Este tipo de erosão tem maior predominância em áreas de clima tropical devido às elevadas taxas de precipitação, quando comparado às demais regiões (Morais; Sales, 2017).

Erosividade do agente (potencial de erosão da água), erodibilidade do solo (susceptibilidade a erosão), declividade do solo, práticas conservacionistas adotadas, comprimento de rampa (Morais; Sales, 2017; Pes; Giacomini, 2017; Teixeira; Guimarães, 2012; Vercruyse; Grabowski; Rickson, 2017) e atividades antrópicas (queimadas, desmatamento, manejo inadequado do solo) são fatores que condicionam a intensidade do processo de erosão hídrica de maneira geral. De acordo com Hoffmann e Oliveira (2018) o uso da terra consiste em um fator acelerador de processos erosivos que acarreta no aumento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

A erosão hídrica (Figura 8) se manifesta de diferentes formas, sendo as mais comuns a erosão pluvial, a erosão laminar, a erosão em sulcos e as voçorocas. A erosão pluvial, ou por embate, é produzida pelo impacto das gotas de chuva ao atingirem superfícies desprotegidas (Carvalho, 2008).

Figura 8 – Processos de erosão hídrica identificados na bacia do Rio Pandeiros.



Fonte: Do autor (2020).

A erosão laminar, ou em lençol, é caracterizada por um desgaste da superfície do solo em finas camadas, decorrente do fluxo superficial de água (Cantalice *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2015). Já a erosão em sulcos, em canais ou ravinas caracteriza-se pela presença de pequenos canais formados ao longo do declive devido a ocorrência de escoamento superficial (enxurrada) em função da ocorrência de chuvas intensas, sendo em alguns casos a evolução da erosão laminar (Silva *et al.*, 2015).

Já as voçorocas consistem em canais profundos criados pela ação do escoamento superficial e, na maioria dos casos, representam uma evolução da erosão em sulcos, entretanto, também podem surgir a partir de outras atividades como a mineração desordenada e falta de manutenção em cortes de estradas (Silva *et al.*, 2015; Teixeira; Guimarães, 2012). Segundo Pes e Giacomini (2017), a erosão em voçorocas é formada quando grandes volumes de água ganham velocidade, capaz de desagregar as laterais e o fundo dos canais presentes na erosão em sulcos.

Com intuito de reduzir os impactos provocados pela erosão, muitas vezes são adotadas práticas de manejo e conservação do solo que tendem a reduzir os processos erosivos e

umentar a infiltração de água no solo. Segundo Carvalho (2008) as principais práticas conservacionistas consistem em vegetativas, edáficas e mecânicas.

As práticas vegetativas são as mais comuns e consistem no uso da vegetação para proteger o solo contra o impacto direto das gotas de chuva e auxiliar na redução da velocidade da água no escoamento superficial (Carvalho, 2008; Silva *et al.*, 2005). As principais práticas vegetativas são a utilização da rotação de culturas, do plantio em faixas e o reflorestamento (Silva *et al.*, 2015).

De acordo com Carvalho (2008), são consideradas práticas edáficas aquelas que utilizam sistemas modificados de cultivos que possibilitam a manutenção ou a melhoria da fertilidade do solo, como a correção (calagem, gessagem) e adubação do solo (fosfatagem, adubação verde, química ou orgânica) e o controle do fogo.

As práticas consideradas como mecânicas consistem nas intervenções que buscam reduzir a velocidade de escoamento da água e aumentar a infiltração no solo, recorrendo a implantação de estruturas artificiais como plantio em curvas de nível, construção de terraços e bacias de infiltração (Figura 9), por exemplo (Sales *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2015).

Figura 9 – Exemplo de prática conservacionista mecânica: bacia de infiltração construída na APA Pandeiros.



Fonte: Do Autor (2020).

Apesar de ser considerada uma área destinada à preservação, na bacia do Rio Pandeiros ainda são observadas a prática de diversas atividades prejudiciais ao meio ambiente que vão na contramão das práticas conservacionistas citadas. Como exemplo, pode se citar a falta de manutenção de estradas rurais, a prática de queimadas e a remoção da cobertura vegetal do solo.

## 2.2.2 Transporte de sedimentos

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica está intimamente relacionado às suas características (geomorfologia, solos, cobertura vegetal, clima, entre outros) bem como a alterações provocadas por ações antrópicas, como mudanças no uso e ocupação do solo, que podem influenciar direta ou indiretamente na produção de sedimentos (Amaral; Rosa; Formiga, 2021; Braga *et al.*, 2012).

Os sedimentos produzidos em uma bacia hidrográfica podem ter origem de diferentes fontes como lavouras, pastagens, florestas, estradas, entre outros, bem como podem ser provenientes de processos erosivos que ocorrem nas margens e no leito dos cursos d'água (Lima; Silva; Carvalho, 2006; Minella *et al.*, 2007).

A fração dos sedimentos que alcança os cursos d'água possui diferentes características (granulometria, massa específica, geometria, entre outros) que aliadas às condições de escoamento (energia) definirão se ocorrerá o transporte ou a deposição do mesmo (Carvalho, 2008; Lima; Silva; Carvalho, 2006; Lima; Silva, 2007; Vercruyse; Grabowski; Rickson, 2017).

O transporte e a deposição de sedimentos pode trazer sérias consequências ambientais, como o assoreamento de cursos d'água, aumento da ocorrência de enchentes, dificuldade de navegação, aumento no custo e até mesmo a inviabilidade no tratamento de água para abastecimento humano (Carvalho, 2008; Latuf *et al.*, 2019; Menezes; Marcuzzo; Pedrollo, 2021; Scapin; Paiva; Beling, 2007), a redução da vida útil de estruturas hidráulicas, seja pela redução do volume útil de reservatórios ou pelo desgaste provocado por abrasão das estruturas pelas partículas transportadas, dentre outros (Mathi; Mariano; Martim, 2018).

Os processos de transporte de sedimentos são divididos em três formas: carga sólida de arrasto; carga sólida saltante e carga sólida em suspensão. A carga de arrasto corresponde às partículas que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água e encontram-se em contato com o leito durante quase todo tempo (Carvalho, 2008). A carga saltante corresponde às partículas que pulam ao longo do curso d'água devido ao choque com outras partículas ou pela ação da correnteza. As cargas de arrasto e saltante geralmente são tratadas como sedimentos de leito (ou de fundo) (Carvalho, 2008).

Com relação à carga em suspensão, esta corresponde às partículas de rocha ou material orgânico que se mantêm suspensas devido à ação das componentes verticais da velocidade do fluxo turbulento enquanto são transportadas pela corrente, sendo depositadas somente quando a velocidade do fluido diminui (Braga *et al.*, 2012; Carvalho, 2008; Crispim *et al.*, 2015; Hoffmann *et al.*, 2020).

A maior parte do sedimento é transportada em eventos de cheia (Cardoso; Kobiyama; Grison, 2012; De Girolamo; Pappagallo; Lo Porto, 2015; Hoffmann *et al.*, 2020; Horowitz; Clarke; Merten, 2015; Huey; Meyer, 2010; Minella; Merten, 2011; Pinto; Mello; Ávila, 2013), sendo as chuvas e enxurradas (Figura 10) os maiores responsáveis pelo transporte dos sedimentos para os cursos d'água. Consequentemente, a quantidade de sedimentos transportada pelos cursos d'água tem relação direta com a vazão (Andrade Neto *et al.*, 2012; Cavalcante; Maia; Morais, 2006; Garrido *et al.*, 2018).

Figura 10 – Curso d'água efêmero na bacia do Rio Pandeiros a) durante escoamento e b) após o fim do escoamento.



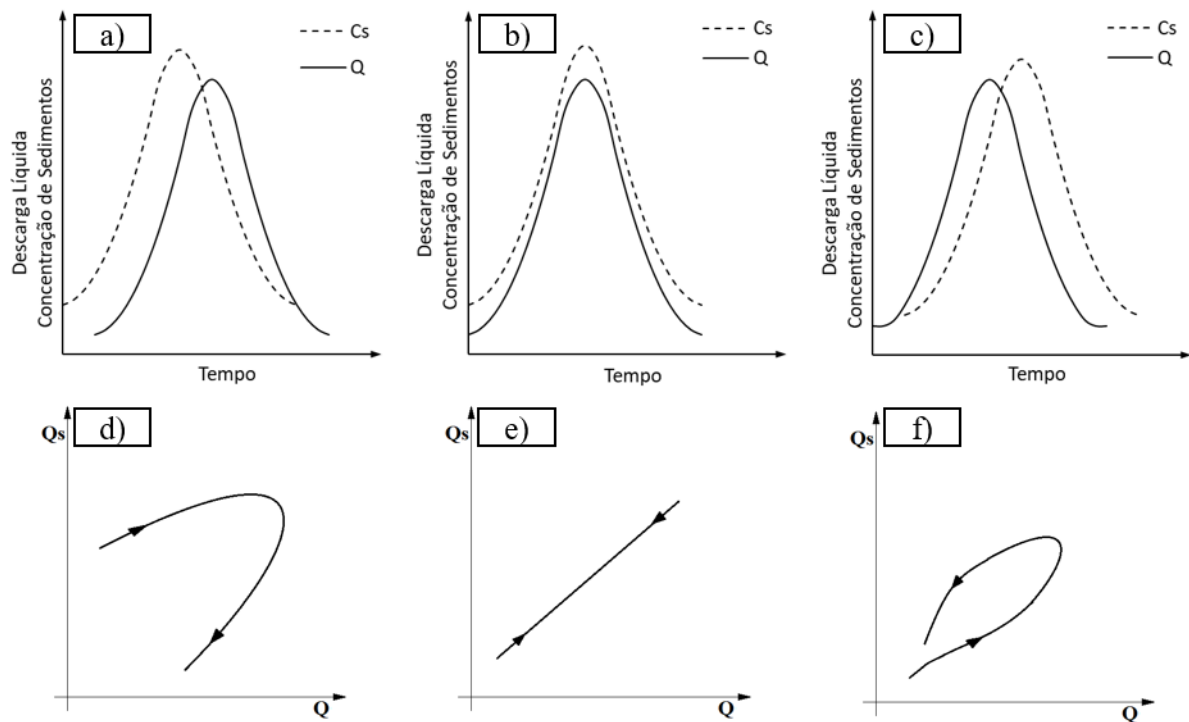
Fonte: Do Autor (2022).

Na literatura podem ser encontrados diversos trabalhos que confirmaram que a maior parte do sedimento é transportada durante eventos de cheia. Leli *et al.* (2011) em trabalho realizado na região Sul do Brasil constataram que as maiores descargas de sedimento ocorrem durante a ascensão do pico de cheia. Cardoso, Kobiyama e Grison (2012), também em estudo realizado no Sul do Brasil, verificaram que os eventos com altos valores de vazão foram responsáveis pelo transporte de aproximadamente 90% do sedimento em suspensão durante um estudo realizado entre dezembro de 2011 e junho de 2012. De Girolamo, Pappagallo e Lo Porto (2015), em estudo realizado em um curso d'água intermitente na Itália, constataram que cerca de 94% do sedimento suspenso foi transportado nos períodos em que os valores de vazão foram maiores. Hoffmann *et al.* (2020) verificaram que cerca de 50% do sedimento transportado anualmente pelo rio Moselle, na Alemanha, ocorre durante eventos de inundação, que correspondem à 10% do tempo.

Com relação a variação temporal em um evento, a concentração de sedimentos transportada pode acompanhar a hidrógrafa de cheia de três formas. Na primeira situação (Figura 11a), e mais comum, o maior valor de concentração ocorre em um momento anterior

ao pico de vazão; No segundo caso (Figura 11b) a maior concentração é observada no mesmo momento do pique de vazão; e por último, a maior concentração é observada após o pique de vazão (Figura 11c).

Figura 11 – Tipos de variação temporal da vazão ( $Q$ ) e concentração de sedimentos ( $C_s$ ) e variação da descarga sólida ( $Q_s$ ) em função da vazão ( $Q$ ).



Fonte: Do Autor (2021).

De acordo com Louzada, Tavares e Uagoda (2022) a vazão e a concentração de sedimentos podem variar principalmente em função de fatores como o uso do solo, intensidade das chuvas, percurso dos sedimentos, além de aspectos físicos da bacia como declividade, resistência do solo a erosão e cobertura do solo.

O fenômeno em que para um mesmo valor de vazão podem ser observados diferentes valores de concentração de sedimentos é denominado histerese (Figura 11d; 11e e 11f), podendo ocorrer tanto no período de cheia quanto no período de vazante (Leli *et al.*, 2011). De acordo com Minella, Merten e Magnago (2011) e Ziegler *et al.* (2014) o laço de histerese pode ter sentido horário, anti-horário ou formato oito. As formas de histerese refletem as diferenças entre os tempos de pico e declividade dos ramos ascendente e descendente do hidrograma e sedimentograma.

Vários trabalhos encontrados na literatura verificaram a ocorrência de histerese durante o monitoramento do transporte de sedimentos. De Girolamo, Pappagallo e Lo Porto (2015),

monitorando um curso d'água intermitente na Itália, verificaram a ocorrência de histerese nas formas de laço no sentido horário, anti-horário e em formato misto.

Minella, Merten e Magnago (2011) observaram os três tipos de histerese avaliando 19 eventos hidrológicos e verificaram a predominância de laço no sentido horário. Leli *et al.* (2011) também observaram comportamento horário analisando um evento hidrológico no rio Ivaí, no estado do Paraná.

Em contrapartida, De Aquino *et al.* (2018) verificaram predominância da forma que apresenta o laço no sentido anti-horário, seguido da forma que apresenta o laço em forma de oito. De acordo com os autores, o laço anti-horário indica que existe tendência de as fontes de sedimentos estarem localizadas nos pontos mais distantes da seção de controle, como as vertentes, enquanto o laço em forma de oito pode indicar que as fontes de sedimento são tanto as fontes mais distantes quanto o próprio leito do rio. Louzada, Tavares e Uagoda (2022) também observaram a predominância dos laços em formato de oito e no sentido anti-horário, respectivamente, monitorando o Ribeirão do Gama, no Distrito Federal.

De acordo com Leli *et al.* (2011) e Ziegler *et al.* (2014) a ocorrência de histerese pode influenciar no ajuste de curvas que relacionem a vazão com a concentração de sedimentos ou Descarga Sólida, resultando em uma maior dispersão dos dados e redução do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ).

### **2.3 Descarga sólida em suspensão**

A carga de sedimentos em suspensão é a parcela do transporte de sedimentos mais conhecida, uma vez que sua determinação é mais simples, quando comparado aos métodos de medição da carga de leito, por exemplo (Chella *et al.*, 2005).

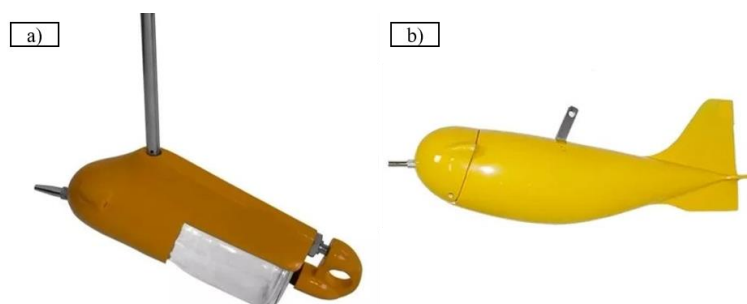
A amostragem de sedimentos em suspensão é realizada para determinação da Descarga Sólida em Suspensão e distribuição granulométrica. Segundo Carvalho (2008) a Descarga Sólida em Suspensão pode representar entre 75 e 90% da Descarga Sólida Total ( $Q_{st}$ ), no entanto, em rios de águas límpidas e muito material grosso no leito, pode haver casos em que a Descarga Sólida de Arrasto ( $Q_{sa}$ ) se iguale ou até mesmo supera a Descarga Sólida em Suspensão. Carvalho *et al.* (2000) destacam ainda que a concentração determinada para o cálculo da Descarga Sólida em Suspensão tende a ser um pouco inferior ao valor verdadeiro, uma vez que os amostradores não alcançam toda a profundidade na vertical de amostragem, que resulta em uma zona não amostrada em que a concentração tende a ser maior que a concentração da parte superior.

A Descarga Sólida em Suspensão pode ser obtida pelo produto entre a vazão e a concentração de sedimentos em suspensão (Andrade Neto *et al.*, 2012). Como a concentração de sedimentos varia ao longo da seção é recomendado que a amostragem seja realizada em diversos pontos para uma melhor representatividade (Carvalho, 2008; Carvalho *et al.*, 2000).

A medição da descarga sólida em suspensão pode ser realizada por métodos diretos, em que o equipamento obtém a concentração como valor imediato ou por meio da determinação de outras grandezas como a turbidez ou ultrassom, ou por método indireto, em que são coletadas amostras de água para análise em laboratório e determinação da concentração de sedimentos em suspensão, utilizando por exemplo, amostradores instantâneos ou por integração (Carvalho, 2008; Carvalho *et al.*, 2000).

De acordo com Carvalho *et al.* (2000) os amostradores mais utilizados para a amostragem de material em suspensão são os amostradores por integração na vertical, pois permitem a obtenção da concentração e granulometria média na vertical. Pode-se citar como exemplo os modelos DH-48 (utilizados em operações a vau), DH-59 e D-49 (Figura 12).

Figura 12 – Amostradores de sedimento em suspensão: a) DH-48; b) D-49.



Fonte: Hidromec (2022)<sup>4</sup>.

Quanto as técnicas de amostragem, segundo Carvalho (2008) os métodos de amostragem de Igual Incremento de Largura (IIL) e Igual Incremento de Descarga (IID) têm sido os mais utilizados e recomendados. Em ambos métodos são realizadas amostragens em diversas verticais da seção, unidas em uma só amostra, possibilitando a redução do trabalho de laboratório.

No método de amostragem por Igual Incremento de Largura a seção transversal é dividida em vários seguimentos de igual largura, nos quais são coletadas amostras da mistura água/sedimento. Neste método a velocidade de trânsito do amostrador deve ser a mesma em todas verticais, bem como deve ser utilizado o mesmo bico no amostrador. Deste modo, serão

<sup>4</sup> Imagens disponíveis em: <<https://www.hidromechc.com.br/sedimentometria>>. Acesso em: 09 de maio de 2024.

obtidas amostras com diferentes volumes, que serão unidas em uma só amostra para análise da concentração de sedimentos em suspensão e granulometria (Carvalho *et al.*, 2000).

Quanto ao método de amostragem por Igual Incremento de Descarga, é necessário que se tenha o conhecimento prévio da distribuição de velocidade na vertical e da vazão na seção transversal. Assim como no método de IIL, a seção transversal é dividida em uma série de subseções, no entanto, as subseções são definidas considerando porções iguais de vazão. Definidas as subseções, são coletadas amostras por integração na vertical na posição do centroide do segmento. Neste método as amostras de cada subseção possuem o mesmo volume e podem ser unidas em uma só amostras, entretanto, caso sejam coletadas amostras de diferentes volumes, estas devem ser analisadas separadamente (Carvalho *et al.*, 2000).

Em ambos os métodos a quantidade de subseções dependerá da largura do curso d'água, sendo recomendado a coleta de amostras em no mínimo 5 verticais de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM). Se usados adequadamente, os dois métodos apresentam o mesmo resultado de descarga sólida (Carvalho, 2008).

Além dos métodos de IIL e IID, a amostragem de sedimentos em suspensão pode ser realizada por meio da coleta de amostras em diversas verticais. O número de verticais pode variar de acordo com alguns fatores como questões práticas, econômicas e a largura do curso d'água, por exemplo (Carvalho, 2008).

De modo geral a Descarga Sólida em Suspensão é apresentada como uma relação entre massa e volume, mas também pode ser expressa em termos de rendimento ou produção específica, relacionando a descarga sólida com a área de drenagem. Alguns autores propuseram faixas para classificar a produção específica de sedimentos, como por exemplo Carvalho *et al.* (2000) e Meybeck *et al.* (2003). Carvalho *et al.* (2000) definem quatro classes para caracterizar a produção de sedimento, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da produção específica de sedimentos proposta por Carvalho *et al.* (2000) baseada na Descarga Sólida em Suspensão Específica ( $Q_{ses}$ ).

<b>Classificação</b>	<b><math>Q_{ses}</math> (t km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>Q_{ses}</math> (kg km<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>
Baixa	< 70	< 192
Moderada	70 - 175	192 - 480
Alta	175 - 300	480 - 822
Muito Alta	> 300	> 822

Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2004) e Carvalho *et al.* (2000).

Já Meybeck *et al.* (2003) estabeleceram seis classes para a caracterização da produção de sedimentos, baseadas em estudo realizado com 60 estações de diferentes partes do mundo. As classes estabelecidas pelos autores são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação da produção específica de sedimentos proposta por Meybeck *et al.* (2003) baseada na Descarga Sólida em Suspensão Específica ( $Q_{ses}$ ).

Classificação	$Q_{ses}$ (t km <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup> )	$Q_{ses}$ (kg km <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )
Muito baixa	< 3,65	< 10
Baixa	3,65 - 18	10 - 50
Moderada	18 - 73	50 - 200
Alta	73 - 365	200 - 1000
Muito Alta	365 - 1825	1000 - 5000
Extremamente Alta	> 1825	> 5000

Fonte: Adaptado de Meybeck *et al.* (2003).

Além das classificações estabelecidas para a produção específica de sedimentos em suspensão, também são encontradas classificações baseadas na concentração de sedimentos. Estão expostas na Tabela 3 as classificações propostas por Lima *et al.* (2004) e Meybeck *et al.* (2003).

Tabela 3 – Classificações quanto a concentração de sedimentos em suspensão propostas por Lima *et al.* (2004) e Meybeck *et al.* (2003).

Lima <i>et al.</i> (2004)		Meybeck <i>et al.</i> (2003)	
Classificação	$C_{ss}$ (mg L <sup>-1</sup> )	Classificação	$C_{ss}$ (mg L <sup>-1</sup> )
Muito Baixa	< 50	Muito Baixa	< 20
Baixa	50 - 100	Baixa	20 - 100
Moderada	100 - 150	Moderada	100 - 500
Alta	150 - 300	Alta	500 - 2000
Muito Alta	> 300	Muito Alta	2000 - 10000
		Extremamente Alta	> 10000

Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2004) e Meybeck *et al.* (2003).

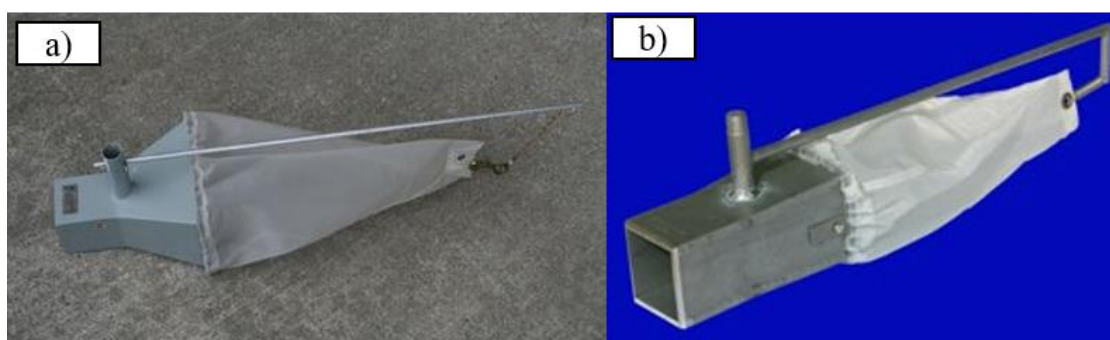
## 2.4 Descarga sólida total

A descarga sólida total em um curso d'água corresponde à quantidade de material que atravessa a seção durante o tempo, podendo ser expressa por kg s<sup>-1</sup> ou t d<sup>-1</sup> (Melo; Araújo Filho; Carvalho, 2020), e corresponde a soma da Descarga Sólida em Suspensão e da Descarga Sólida de Arrasto ou de material do leito (Carvalho, 2008; Lima; Silva; Carvalho, 2006; Lima; Silva, 2007).

De acordo com Lima e Silva (2007), existem métodos diretos e indiretos para a determinação da descarga sólida total, no entanto, o alto custo e a dificuldade envolvidos na obtenção dos dados faz com que os métodos indiretos sejam mais utilizados.

Segundo Carvalho (2008) a determinação da descarga sólida total pelo método direto envolve a instalação de estruturas no curso d'água, como tarugos de concreto, de modo que todo o sedimento fique em suspensão. Já para a medição direta da descarga sólida de arrasto podem ser instaladas estruturas fixas, como poços ou fendas do tipo alçapão, ou então serem utilizados amostradores portáteis ou removíveis, como os amostradores Helley - Smith e BLH - 84 (Figura 13).

Figura 13 – a) Amostrador Helley-Smith; b) Amostrador BLH-84.



Fontes: Halltech Environmental and Aquatic Research Inc. (2023)<sup>5</sup>; USGS (2023)<sup>6</sup>.

Devido à menor dificuldade na amostragem de sedimentos em suspensão, a disponibilidade de dados é maior quando comparado aos sedimentos de leito ou de arrasto, tornando-se necessário em alguns casos a utilização de métodos indiretos para a estimativa da descarga sólida de arrasto ou total (Carvalho, 2008; Geffer; Vestena, 2021; Lima; Silva; Carvalho, 2006).

Dentre os métodos utilizados na estimativa da descarga sólida de leito e/ou em suspensão, podem-se citar os métodos de Meyer Peter e Muller (1948), Einstein (1950), Einstein modificado por Colby e Hembree (1955), Colby (1957), Engelund e Hansen (1967), Yang (1973), Ackers e White (1973), Van Rijn (1984), Karim (1998) e Cheng (2002) (Scapin; Paiva; Beling, 2007).

<sup>5</sup> Imagem disponível em: < <https://www.environmental-expert.com/products/halltech-model-404-010-bedload-samplers-714437> >. Acesso em: 04 de abr. de 2023.

<sup>6</sup> Imagem disponível em: < <https://water.usgs.gov/fisp/products/4103016.html> >. Acesso em: 04 de abr. de 2023.

## 2.5 Curva chave de sedimentos

O monitoramento contínuo em rios nem sempre contempla dados de sedimentos em suspensão, sendo as campanhas voltadas para a realização da coleta de amostras e medição da descarga sólida realizadas em baixa frequência (Menezes; Marcuzzo; Pedrollo, 2021)(Menezes; Marcuzzo; Pedrollo, 2021). Deste modo, as curvas-chave podem ser utilizadas quando os dados diários de vazão são disponíveis e os de sedimento não.

As curvas de transporte de sedimentos são utilizadas para relacionar variáveis como concentração, descarga sólida ou valores provenientes de estudos sedimentológicos com outras grandezas como o tempo, vazão, profundidade, velocidade, entre outras (Carvalho, 2008; Vercruyse; Grabowski; Rickson, 2017), que geralmente apresentam maior disponibilidade de dados ou maior facilidade de medição e monitoramento.

De modo geral, as curvas-chave de sedimentos são representadas por uma função potencial (Equação 1), em que, na maioria dos casos, Y corresponde a concentração, descarga sólida total ou em suspensão, e X à variáveis relacionadas ao fluxo de água, como a vazão ou nível (Carvalho, 2008; Lima *et al.*, 2006; Menezes; Marcuzzo; Pedrollo, 2021; Peixoto *et al.*, 2020; Veiga *et al.*, 2015; Vercruyse; Grabowski; Rickson, 2017) e “a” e “b” correspondem aos coeficientes de ajuste.

$$Y = a \times X^b \quad (1)$$

De acordo com Asselman (2000) os coeficientes “a” e “b” não têm significado físico, mas acredita-se que estejam relacionados a fatores como a intensidade dos processos erosivos, a disponibilidade de sedimentos, o poder do rio para erodir e transportar o material disponível, e a medida em que novas fontes de sedimentos se tornam disponíveis em condições meteorológicas que resultam em vazões elevadas.

Segundo Lima *et al.* (2004) o maior valor do coeficiente “b” indica uma resposta rápida da descarga de sedimentos em suspensão em relação às variações de vazão. Segundo os autores para bacias com grandes áreas de contribuição essa constante geralmente varia entre 1 e 3. De acordo com Iadanza e Napolitano (2006), valores elevados do coeficiente “b” indicam rios em que um pequeno aumento na vazão resulta em um grande aumento na descarga sólida em suspensão.

A construção de barramentos também é um dos fatores que pode influenciar os coeficientes de ajuste da curva chave de sedimentos. De acordo com Zhang *et al.* (2012) a construção de barragens no rio das Pérolas, na China, resultou numa redução do fornecimento

de sedimentos. Este fato levou a um aumento do coeficiente “a” e a uma redução do coeficiente “b”.

A representatividade da curva dependerá da quantidade e distribuição dos dados, sendo que quanto maior o número de dados e quanto maior a amplitude (amostragem de valores extremos máximos e mínimos), melhor a curva representará a realidade local (Menezes; Marcuzzo; Pedrollo, 2021; Veiga *et al.*, 2015).

Para representar adequadamente a correlação entre os dados de vazão e descarga de sedimentos, em alguns casos é necessário a divisão em mais de uma curva-chave, que podem variar de acordo com a vazão (curvas para diferentes faixas de vazão) (Lima *et al.*, 2006) ou com o tempo (curvas para período de estiagem e chuvoso ou para diferentes anos) (Lima *et al.*, 2006; Menezes; Marcuzzo; Pedrollo, 2021).

Segundo Menezes, Marcuzzo e Pedrollo (2021) a necessidade de gerar mais de uma curva dependerá da qualidade do ajuste, que pode ser verificada por meio da utilização de coeficientes estatísticos, como por exemplo, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), ou até mesmo pela análise visual da curva em relação aos pontos medidos.

Lima *et al.* (2001) e Lima *et al.* (2004) adotaram como critério para a utilização da curva-chave de sedimentos valores para o Coeficiente de Determinação superiores à 0,6. Segundo os autores a presença de reservatórios à montante, o reduzido número de medições, o efeito de maré e remanso são fatores que prejudicam a obtenção de dados para o ajuste das curvas. Os autores também determinaram como critério a análise visual da curva gerada em relação aos pontos medidos.

De acordo com Melo, Filho e Carvalho (2020), a concentração de sedimentos varia no tempo e espaço, sendo necessário a realização de medições em intervalos de tempo curtos para que seja possível uma melhor compreensão da dinâmica dos sedimentos. Segundo Menezes, Marcuzzo e Pedrollo (2021) a curva-chave de sedimentos apresenta algumas deficiências devido a influência de fatores como uso e ocupação, intensidade da precipitação, práticas de controle de erosão, entre outros que são altamente variáveis no tempo e espaço.

Além dos fatores citados, a ocorrência de histerese pode influenciar no ajuste das curvas devido ao aumento da dispersão dos dados, uma vez que com a ocorrência do fenômeno podem ser observadas diferentes concentrações de sedimento para um mesmo valor de vazão (Leli *et al.*, 2011; Ziegler *et al.*, 2014).

De acordo com Aleixo *et al.* (2020), a heterogeneidade da bacia hidrográfica e dos eventos de precipitação pode resultar em concentrações de sedimentos em suspensão diferentes para os mesmos valores de vazão. Asselman (2000) sugere que a dispersão dos dados está

relacionada, dentre outros fatores, com variações no fornecimento de sedimentos, causadas por efeitos sazonais, condições antecedentes na bacia hidrográfica e diferenças na disponibilidade de sedimentos no início ou no fim de uma cheia. Vercruyssen, Grabowski e Rickson (2017) afirmam que os fatores hidrometeorológicos, como a precipitação e a descarga do rio, são os principais agentes do transporte de sedimentos.

Apesar de apresentar algumas limitações, a curva-chave tem sido bastante utilizada para estimar a produção de sedimentos, e muitos trabalhos podem ser encontrados na literatura (Melo; Araújo Filho; Carvalho, 2020; Menezes; Marcuzzo; Pedrollo, 2021; Veiga *et al.*, 2015).

Como exemplo pode-se citar Melo, Araújo Filho e Carvalho, (2020) que utilizaram a curva-chave de sedimentos para avaliar o transporte de sedimentos no trecho do Baixo São Francisco, após a barragem de Xingó, relacionando dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão. Segundo os autores, as curvas-chave obtidas apresentaram bons coeficientes de determinação.

Veiga *et al.* (2015) relacionaram dados de descarga sólida e vazão no traçado da curva chave de dez estações hidrossedimentológicas localizadas no Rio Araguaia, Goiás, e concluíram que as curvas-chave geradas foram representativas para as séries temporais estudadas.

Garrido *et al.* (2018) ajustaram curvas-chave para o rio Piranhas, localizado na Região Nordeste do Brasil, e obtiveram bons coeficientes de determinação (superiores a 0,80). Os autores realizaram o ajuste de duas curvas, referentes aos períodos chuvoso e de estiagem.

Menezes, Marcuzzo e Pedrollo (2021) avaliaram a produção de sedimentos utilizando curvas-chaves em estudo realizado no Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul. Os autores ajustaram a curva para um único tramo e para dois tramos, e concluíram que a curva-chave que melhor representou o conjunto de dados foi construída com a divisão em dois tramos.

Peixoto *et al.* (2020) elaboraram curvas-chave para quatro estações de monitoramento localizadas no Rio Jordão, estado de Minas Gerais, e verificaram que a correlação entre descarga sólida em suspensão e vazão apresentou menor  $R^2$  quando comparado com a correlação entre descarga sólida total e vazão. Os coeficientes de determinação observados pelos autores foram superiores a 0,87.

## **2.6 Relação entre turbidez e sólidos suspensos**

A turbidez de uma amostra de água é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la devido à presença de sólidos em suspensão (CETESB, 2018). A turbidez consiste em uma variável de fácil e rápida obtenção, que pode ser determinado em

campo ou em laboratório (Latuf *et al.*, 2019) e tem sido amplamente utilizada na determinação de sólidos suspensos devido a fatores como simplicidade e custo (Davies-Colley; Smith, 2001; Davies-Colley *et al.*, 2014; Rügner *et al.*, 2013).

Segundo Davies-Colley e Smith (2001) a determinação da concentração de sólidos suspensos é uma análise simples, no entanto, o procedimento demanda grande quantidade de tempo e é consideravelmente mais caro que as medições ópticas.

Além da redução no custo das análises e da praticidade em sua determinação, a utilização da turbidez possibilita o monitoramento contínuo da concentração de sólidos suspensos (Davies-Colley *et al.*, 2014; Williamson; Crawford, 2011). Outra vantagem é a possibilidade de monitorar eventos de cheia, em que ocorre o transporte da maior parte do sedimento em suspensão, uma vez que o monitoramento de rotina raramente coincide com a ocorrência destes eventos (Davies-Colley *et al.*, 2014; Huey; Meyer, 2010; Stutter *et al.*, 2017; Villa; Fölster; Kyllmar, 2019).

Rügner *et al.* (2013) destacam que a concentração de sólidos suspensos aumenta rapidamente durante eventos como inundações ou de perturbação mecânica de sedimentos em rios, causando picos na concentração que caso não sejam monitorados podem levar a uma subestimativa da carga de poluentes transportados. Louzada, Tavares e Uagoda (2022) destacam que a compreensão da dinâmica da produção de sedimentos em eventos extremos é de grande importância para a gestão de bacias hidrográficas.

No entanto, para se obter uma boa precisão na determinação dos sólidos suspensos utilizando a turbidez é necessário que os sensores ópticos sejam calibrados para o local de interesse (Davies-Colley *et al.*, 2014; Davies-Colley; Smith, 2001; Stutter *et al.*, 2017), uma vez que diferenças consideráveis podem ser observadas de um local para o outro (Hannouche *et al.*, 2011; Villa; Fölster; Kyllmar, 2019).

A relação entre turbidez e sólidos suspensos depende de vários fatores, como o tamanho das partículas transportadas, densidade, formato, cor da água, entre outros (Rügner *et al.*, 2013). Apesar dos diversos fatores que influenciam nesta relação, geralmente é observada uma relação próxima da linear entre as variáveis (Rügner *et al.*, 2013).

Embora a turbidez seja amplamente utilizada para estimar a concentração de sólidos em suspensão, fatores como a distribuição do tamanho das partículas, a concentração de matéria orgânica particulada (Bright; Mager; Horton, 2020), a forma das partículas e a presença de fito plâncton podem influenciar na relação entre turbidez e sólidos em suspensão (Bilotta; Brazier, 2008). Deste modo, níveis elevados de turbidez podem não corresponder a concentrações elevadas de sólidos em suspensão (Bilotta; Brazier, 2008).

Diversos trabalhos estudaram a relação entre turbidez e concentração de sólidos suspensos, entre eles, Villa, Fölster e Kyllmar (2019) avaliaram a relação entre turbidez e sólidos suspensos em 108 seções de monitoramento na Suécia e consideraram a turbidez como um bom estimador da concentração de sólidos suspensos ( $R^2 = 0,76$ ). Rügner *et al.* (2013) avaliaram a relação entre turbidez e sólidos suspensos em cinco cursos d'água na Alemanha e obtiveram coeficientes de determinação variando entre 0,59 e 0,98.

Latuf *et al.* (2019) avaliaram a relação entre as variáveis no Rio Machado, na região Sudeste do Brasil, e observaram uma correlação de 0,94 e coeficiente de determinação de 0,89. De Aquino *et al.* (2018) obtiveram um coeficiente de determinação de 0,92 no ajuste de um modelo que relaciona turbidez e sólidos suspensos, em estudo realizado no Centro Oeste do Brasil. Medeiros, Segundo e Magalhães (2015) avaliaram a correlação entre turbidez e sólidos suspensos no Rio São Francisco, Brasil, e observaram coeficientes de correlação (Spearman) de 0,99, 0,98 e 0,66 para os anos de 2001, 2004 e 2007 respectivamente. Os autores concluíram que a turbidez pode ser utilizada como indicador da concentração de sólidos suspensos.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 425, de 1º de fevereiro de 2011.** Aprova os critérios para definição das instalações de geração de energia elétrica de interesse do sistema elétrico interligado e daquelas passíveis de descentralização das atividades de controle e fiscalização, sob coordenação da Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração – SFG/ANEEL. 2011. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2011425.pdf>. Acesso em: 18 de abr. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 875, de 10 de março de 2020.** Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à aprovação dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de bacias hidrográficas, à obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamentos hidrelétricos, à comunicação de implantação de Central Geradora Hidrelétrica com Capacidade Instalada Reduzida e à realização de Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica e Projeto Básico de Usina Hidrelétrica sujeita à concessão. (Redação dada pela REN ANEEL 1.079, de 28.11.2023). 2020. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/atren2020875.pdf>. Acesso em: 18 de abr. 2024.

ALASKA SATELLITE FACILITY - ASF. **Alos Palsar: Terrain-Corrected (RTC).** 2014. Disponível em: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/>. Acesso em: 22 maio 2019.

ALEIXO, R., *et al.* Applying ADCPs for Long-Term Monitoring of SSC in Rivers. **Water Resources Research**, v. 56, p. 1-23, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019WR026087>

AMARAL, A. K. N.; ROSA, L. E.; FORMIGA, K. T. M. Estudo do transporte de sedimentos em suspensão ao longo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte – Go. **Ateliê Geográfico**, v. 15, n. 2, p. 94–113, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/66498>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ANDRADE NETO, J. S. de *et al.* Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. **Pesquisas em Geociências**, v. 39, n. 2, p. 161, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.35910>. Acesso em: 12 dez. 2022.

ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology**, v. 234, n. 3-4, p. 228-248, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00253-5)

BAHIA, T. de O. *et al.* Veredas na APA do Rio Pandeiros : importância , impactos ambientais e perspectivas Introdução. **MG.Biota**, v. 2, n. 3, p. 4–13, 2009. Disponível em: <http://mgbiota.ief.mg.gov.br/index.php/MB/issue/view/24>.

BARROS, E. N. de S. *et al.* Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, Recife, v. 13, n. 1, p. 1–9, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i1a5509>. Acesso em: 1 set. 2021.

BASTOS, L. A.; FERREIRA, I. M. Composições fitofisionômicas do bioma Cerrado: estudo sobre o subsistema de Vereda. **Espaço em Revista**, v. 12, n. 1, p. 97–108, 2010. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.5216/er.v12i1.17656>. Acesso em: 11 ago. 2022.

BETHONICO, M. B. de M. **Área de Proteção Ambiental Estadual do Rio Pandeiros - MG: espaço, território e atores**. 2009a. 288 f. f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

BETHONICO, M. B. de M. Rio Pandeiros: território e história de uma área de proteção ambiental no norte de Minas Gerais. **Revista ACTA Geográfica**, v. 3, n. 5, p. 23–38, 2009b. Disponível em: <http://www.ufrr.br/revista/index.php/actageo/article/view/214>.

BILOTTA, G. S.; BRAZIER, R. E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. **Water Research**, v. 42, p. 2849–2861, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>

BRAGA, C. de C. *et al.* Análise da descarga sólida em suspensão dos afluentes do reservatório da UHE Barra dos Coqueiros - go. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 4, p. 495–505, 2012. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1964>. Acesso em: 2 set. 2021.

BRIGHT, C.; MAGER, S.; HORTON, S. Reesponse of nephelometric turbidity to hydrodynamic particle size of fine suspended sediment. **International Journal of Sediment Research**, v. 35, p. 444–454, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.03.006>

CANTALICE, J. R. B. *et al.* Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 597–607, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000400012>. Acesso em: 1 set. 2021.

CARDOSO, A. T.; KOBAYAMA, M.; GRISON, F. Problemas na estimativa de sólidos em suspensão associados à elaboração da curva-chave para sensor de turbidez. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10., 2012, Foz do Iguaçu. **Anais do X ENES**. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2012. p. 1–15. Disponível em: <https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ENES121.pdf>. Acesso em: 13 set. 2021.

CARVALHO, N. de O. *et al.* **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000. *E-book*.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CAVALCANTE, A. A.; MAIA, R. P.; MORAIS, J. O. Dinâmica fluvial no baixo Jaguaribe-CE: uma avaliação a partir de estudos de descarga sólida. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais do VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**. Goiânia: UGB, 2006. p. 1–11. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/app/webroot/sinageo/6/2/065.pdf>. Acesso em: 1 set. 2021.

CHELLA, M. *et al.* Avaliação do Transporte de Sedimentos no Rio Barigüi. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 3, p. 105–111, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p105-111>. Acesso em: 15 ago. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. Apêndice E: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade. In: **Qualidade das águas doces no estado de são paulo 2017**. São Paulo: CETESB, 2018. p. 301. *E-book*.

CRISPIM, D. L. *et al.* Transporte e caracterização de sedimentos de fundo no rio piranhas em uma seção de controle próximo à sede do município de Pombal-PB. **HOLOS**, v. 3, p. 93–101, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2518>. Acesso em: 1 set. 2021.

DAVIES-COLLEY, R. J. *et al.* Light attenuation – a more effective basis for the management of fine suspended sediment than mass concentration? **Water Science and Technology**, v. 69, n. 9, p. 1867–1874, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2014.096>. Acesso em: 24 nov. 2022.

DAVIES-COLLEY, R. J.; SMITH, D. G. Turbidity suspended sediment, and water clarity: a review. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1085–1101, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x>. Acesso em: 24 nov. 2022.

DE AQUINO, I. G. *et al.* Temporal variation of suspended sediments and mineralogy using an improved automatic sampler system in the Riacho Fundo Stream, Brasília, Distrito Federal, Brazil. **Geologia USP - Serie Científica**, v. 18, n. 2, p. 171–185, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-140500>

DE GIROLAMO, A. M.; PAPPAGALLO, G.; LO PORTO, A. Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). **CATENA**, v. 128, p. 135–143, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.020>. Acesso em: 19 jan. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Súmula da X Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. 83p

FERREIRA, V. M. *et al.* Influência antrópica e atributos de solo: inter-relações em ambientes de voçorocas na mesorregião Campos das Vertentes, MG. **Geografia**, Rio Claro, v. 36, n. 1, p. 209–219, 2011. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/4915>. Acesso em: 2 set. 2021.

FONSECA, D. de S. R. *et al.* Diagnóstico do uso do solo e degradação ambiental na bacia hidrográfica do Pandeiros-MG como subsídio para estudos de impacto ambiental. **Revista Eletrônica Geoaraguaia**, v. 1, n. 1, p. 1–20, 2011. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/4798>. Acesso em: 7 mar. 2022.

FONSECA, E. M. B. *et al.* Rio Pandeiros: Uma complexa interface com a gestão ambiental regional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6., 2008, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2008.

GARRIDO, J. W. A. *et al.* Determination of key curves of discharges of suspended sediment in the hydrographic basin of piacó-piranhas-açu river. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 69–75, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018138711>

GEFFER, E.; VESTENA, L. R. Efficacy of methods for estimating total solid load in bedrock rivers. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 65–78, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1317>. Acesso em: 1 set. 2021.

HANNOUCHE, A. *et al.* Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 12, p. 2445–2452, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2011.779>. Acesso em: 19 dez. 2022.

HERNANI, L. C. *et al.* A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de.; PERES, J. R. R. (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 47-60.

HOFFMANN, T. C. P.; OLIVEIRA, F. A. de. Influência do uso da terra em áreas rurais e urbanas na produção e transporte de sedimentos em suspensão e turbidez na bacia do rio Capivari, Lapa-PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 4, p. 821–836, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1340>. Acesso em: 24 out. 2022.

HOFFMANN, T. O. *et al.* Scale breaks of suspended sediment rating in large rivers in Germany induced by organic matter. **Earth Surface Dynamics**, v. 8, p. 661–678, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/esurf-8-661-2020>. Acesso em: 30 nov. 2022.

HOROWITZ, A. J.; CLARKE, R. T.; MERTEN, G. H. The effects of sample scheduling and sample numbers on estimates of the annual fluxes of suspended sediment in fluvial systems. **Hydrological Processes**, v. 29, p. 531–543, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.10172>. Acesso em: 20 jan. 2022.

HUEY, G. M.; MEYER, M. L. Turbidity as an Indicator of Water Quality in Diverse Watersheds of the Upper Pecos River Basin. **Water**, v. 2, n. 2, p. 273–284, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w2020273>. Acesso em: 29 nov. 2022.

IADANZA, C.; NAPOLITANO, F. Sediment transport time series in the Tiber River. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 31, n. 18, p. 1212-1227, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.05.005>

IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Unidades de Conservação Estaduais**. Belo Horizonte: Instituto Estadual de Florestas (IEF), 2018a. Dado em formato vetorial (shapefile). Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 19 abr. 2024

IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Unidades de Conservação Federais**. Belo Horizonte: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), 2018b. Dado em formato vetorial (shapefile). Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 19 abr. 2024

IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Rios de preservação permanente**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), 2018c. Dado em formato vetorial (shapefile). Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 19 abr. 2024

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **APA Pandeiros**. 2013a. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/3306-nova-categoria/1769-apa-pandeiros->. Acesso em: 1 set. 2021.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Ofício n 021/2004**. Januária: 2004. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/siam/lc/2005/0000919900022005/0348232005.pdf>. Acesso em: 7 out. 2021.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros**. 2013b. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/3306-nova-categoria/1768-refugio-estadual-da-vida-silvestre-do-rio-pandeiros->. Acesso em: 12 out. 2020.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Unidades de Conservação**. 2024. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/unidades-de-conservacao>. Acesso em: 19 abr. 2024.

LATUF, M. D. O. *et al.* Aporte sedimentar em suspensão na bacia do rio Machado, sul de Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 1, p. 16–35, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp16>. Acesso em: 18 ago. 2022.

LELI, I. T. *et al.* Variabilidade temporal no transporte de sedimentos no rio Ivaí - Paraná (1977-2007). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 619–628, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414619628>

LIMA, A. C. P. de; AUGUSTIN, C. H. R. R.; OLIVEIRA, D. A. de. Distribuição espacial de voçorocas e sua relação com o relevo em escala de bacia para fins de amostragem: Rio Pandeiros - MG. In: PINHEIRO, L. S.; GORAYEB, A. (org.). **Geografia física e as mudanças globais**. Fortaleza: Editora UFC, 2019. p. 1–12. *E-book*.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco**. Brasília: EMBRAPA; ANEEL; ANA, 2001. *E-book*.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. *E-book*.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* Fluxo de sedimentos em suspensão no exutório de grandes bacias hidrográficas em território brasileiro. In: ENES, 7., 2006, Porto Alegre. **VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2006. p. 1–10. Disponível em: [http://www.abrh.org.br/eventos/modelo\\_trabalho\\_viii\\_enes.pdf](http://www.abrh.org.br/eventos/modelo_trabalho_viii_enes.pdf). Acesso em: 4 out. 2021.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. da S. Seleção de modelos para o traçado de curvas granulométricas de sedimentos em suspensão em rios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 101–107, 2007. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662007000100013&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a13.pdf](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662007000100013&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n1/v11n1a13.pdf). Acesso em: 6 out. 2021.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. da; CARVALHO, N. de O. Comparação de Modelos Matemáticos para o Traçado de Curvas Granulométricas de Sedimentos do Leito de Rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 1, p. 91–98, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v11n1.p91-98>. Acesso em: 2 set. 2021.

LOUZADA, R. S. P.; TAVARES, A. S.; UAGODA, R. Monitoramento da vazão e Carga Sólida Suspensa em Eventos Pluviais na Bacia do Ribeirão do Gama/DF. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 3, p. 1700–1715, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2134>. Acesso em: 16 ago. 2022.

MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 129–156, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/60896>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MATHI, L. K.; MARIANO, T. B.; MARTIM, A. L. S. Rio Jundiá - Bacia do PCJ: Determinação da correlação entre sedimentos em suspensão e turbidez NTU. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, XIII., 2018, Vitória. **Anais do XIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS**. Vitória: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2018. p. 1–8. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/65/PAP048.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2022.

MEDEIROS, P. R. P.; SEGUNDO, G. H. C.; MAGALHÃES, E. M. M. Comportamento da turbidez e material em suspensão, em um rio com vazão regularizada por sistema de barragens em cascata: Rio São Francisco (NE, Brasil). **Geochimica Brasiliensis**, v. 29, n. 1, p. 35–44, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z0102-9800201500010004>. Acesso em: 28 nov. 2022.

MELO, S. C. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; CARVALHO, R. M. C. M. de O. Curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1248–1262, 2020. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1124900/1/Curvas-chave-de-descargas-de-sedimentos-em-suspensao-no-Baixo-Sao-Francisco-2020.pdf>. Acesso em: 14 set. 2021.

MENEZES, D.; MARCUZZO, F. F. N.; PEDROLLO, M. C. R. Estimativa da produção de sedimentos utilizando a curva-chave de sedimentos. **Ciência e Natura**, v. 43, n. 17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/2179460X37263>. Acesso em: 13 set. 2021.

MEYBECK, M. *et al.* Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. **Global and Planetary Change**, v. 39, p. 65–93, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00018-3)

MINAS GERAIS. **Decreto n° 43.910, de 05 de novembro de 2004**. Cria o Refúgio Estadual de Vida Silvestre do Rio Pandeiros no Município de Januária. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2004. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/DEC/43910/2004/?cons=1>. Acesso em: 18 de abr. de 2024.

MINAS GERAIS. **Lei n° 11.901, de 01 de setembro de 1995**. Declara de proteção ambiental as Áreas de interesse ecológico situadas na Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 1995. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/11901/1995/>. Acesso em: 18 de abr. 2024.

MINAS GERAIS. **Lei nº 15.082, de 27 de abril de 2004**. Dispõe sobre rios de preservação permanente e dá outras providências. Belo Horizonte: 2004b. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=147>. Acesso em: 3 set. 2021.

MINELLA, J. P. G. *et al.* Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1637–1646, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600039>. Acesso em: 1 set. 2021.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 3, p. 424–432, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000300010>. Acesso em: 1 set. 2021.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, p. 1306–1313, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001200013>. Acesso em: 1 set. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Portaria nº 439, de 15 de outubro de 2018**. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/acao-informacao/legislacao/portarias/2018/portaria-n-439-2018.pdf>. Acesso em: 18 de abr. 2024.

MORAIS, R. C. de S.; SALES, M. C. L. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 27, n. 1, p. 84–105, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27nesp1p84>. Acesso em: 2 set. 2021.

NUNES, Y. R. F. *et al.* Pandeiros: o Pantanal Mineiro. **MG.Biota**, v. 2, n. 2, p. 4–17, 2009. Disponível em: <http://mgbiota.ief.mg.gov.br/index.php/MB/issue/view/23>. Acesso em: 7 mar. 2022.

OLIVEIRA, F. M. **Relações solo-vegetação em áreas desenvolvidas sobre o arenito Urucua na APA do Rio Pandeiros**. 75 f. 2013. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/13653>. Acesso em: 7 mar. 2022.

PEIXOTO, R. de A. O. *et al.* Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 921–931, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020180137>

PES, L. Z.; GIACOMINI, D. A. **Conservação do Solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2017. *E-book*.

PINTO, L. C.; MELLO, C. R. de; ÁVILA, L. F. Water quality indicators in the Mantiqueira Range region, Minas Gerais state. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 687–692, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000400020>

PEREIRA, L. C.; TOSTO, S. G.; CARVALHO, J.P. Erosão do solo e valoração de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.;

PRADO, R. B. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. P. 317-324.

REATTO, A. *et al.* Solos do bioma Cerrado: Aspectos pedológicos. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (org.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. v. 1. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. p. 107–134.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (org.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. v. 1. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. p. 151–199.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de (org.). **Cerrado : ambiente e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998. p. 89-166. *E-book*. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/554094>. Acesso em: 19 abr. 2024.

RODRIGUES, J. A. M. *et al.* Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Cervo – MG. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 531–542, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v36i3.11695>. Acesso em: 2 set. 2021.

RÜGNER, H. *et al.* Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, p. 373–380, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2307-1>. Acesso em: 24 nov. 2022.

SALES, E. S. G. *et al.* Influência de práticas conservacionistas na recuperação de áreas degradadas no semiárido. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 9298–9316, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-629>. Acesso em: 2 set. 2021.

SANTOS, U. *et al.* Fish fauna of the Pandeiros River, a region of environmental protection for fish species in Minas Gerais state, Brazil. **Check List**, v. 11, n. 1, p. 1507, 2015. Disponível em: <https://checklist.pensoft.net/article/19105/>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D. de; BELING, F. A. Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 5–21, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v12n4.p5-21>

SILVA, D. D. *et al.* Efeito da cobertura nas perdas de solo em um argissolo vermelho-amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 409–419, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000200014>

SILVA, F. A. M. da; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (org.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. v. 1. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. p. 69–87.

SILVA, M. L. N. *et al.* **Manejo e conservação do solo e da água: Guia de estudos**. Lavras: UFLA, 2015. *E-book*.

SOUZA, R. C. R. de *et al.* Ampliando o conhecimento sobre os peixes do Rio Pandeiros. **MG Biota**, v. 12, n. 1, p. 57–77, 2019. Disponível em: <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/MB/article/view/136>. Acesso em: 4 dez. 2023.

STUTTER, M. *et al.* Evaluating the use of in-situ turbidity measurements to quantify fluvial sediment and phosphorus concentrations and fluxes in agricultural streams. **Science of The Total Environment**, v. 607–608, p. 391–402, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.013>. Acesso em: 1 dez. 2022.

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - SUPRAM. **Parecer único N 34/2008 SUPRAM NM**. Montes Claros: SUPRAM, 2008. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/siam/lc/2005/0000919900022005/3165212008.pdf>. Acesso em: 7 out. 2021.

TEIXEIRA, N. C.; GUIMARÃES, C. D. de C. Métodos de contenção e estabilização de processos erosivos avançados e voçorocas no Brasil. **Saberes Interdisciplinares**, São João Del Rey, n. 10, p. 1–14, 2012. Disponível em: <http://186.194.210.79:8090/revistas/index.php/SaberesInterdisciplinares/article/view/126>. Acesso em: 2 set. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. 2010. Disponível em: [http://www.dps.ufv.br/?page\\_id=742](http://www.dps.ufv.br/?page_id=742). Acesso em: 12 out. 2020.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 55–64, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000100008>. Acesso em: 2 set. 2021.

VEIGA, A. M. *et al.* Determinação da produção de sedimento através da curva-chave sedimentométrica na bacia hidrográfica do rio Araguaia-GO. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015. p. 8. Disponível em: [https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15298/AR-Eventos\\_VEIGA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15298/AR-Eventos_VEIGA.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 13 set. 2021.

VERCRUYSSSE, K.; GRABOWSKI, R. C.; RICKSON, R. J. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. **Earth-Science Reviews**, v. 166, p. 38–52, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>. Acesso em: 20 jan. 2022.

VILLA, A.; FÖLSTER, J.; KYLLMAR, K. Determining suspended solids and total phosphorus from turbidity: comparison of high-frequency sampling with conventional monitoring methods. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 605, p. 16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7775-7>. Acesso em: 24 nov. 2022.

WILLIAMSON, T. N.; CRAWFORD, C. G. Estimation of Suspended-Sediment Concentration From Total Suspended Solids and Turbidity Data for Kentucky, 1978-19951. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 47, n. 4, p. 739–749, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00538.x>. Acesso em: 29 nov. 2022.

ZHANG, W. *et al.* Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. *Continental Shelf Research*, v. 38, p. 35–46, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.02.017>

ZIEGLER, A. D. *et al.* Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: Hysteresis, variability, and uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 519, n. PB, p. 2020–2039, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.010>. Acesso em: 19 dez. 2022.

## CAPÍTULO 2

### ARTIGO 1<sup>7</sup>

#### **Influence of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir on the concentration and composition of solids transported by the Pandeiros River, Brazil**

Jonas Faria Dionísio de Oliveira<sup>a,\*</sup>, Gilberto Coelho<sup>b</sup>, Ronan Naves Carvalho<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Federal University of Lavras, School of Engineering, Department of Water Resources, Lavras, Minas Gerais, Brazil, CEP: 37200-000. Email: jonas.dio.94@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6684-6357.

<sup>b</sup> Federal University of Lavras, School of Engineering, Department of Water Resources, Lavras, Minas Gerais, Brazil, CEP: 37200-000. Email: coelho@ufla.br. ORCID: 0000-0002-0654-2754.

<sup>c</sup> Federal University of Lavras, School of Engineering, Department of Water Resources, Lavras, Minas Gerais, Brazil, CEP: 37200-000. Email: ronnaves@hotmail.com ORCID: 0009-0005-2246-5532.

\* Corresponding author, Jonas Faria Dionísio de Oliveira, jonas.dio.94@gmail.com.

---

<sup>7</sup> Artigo aceito para publicação no periódico “Environmental Earth Sciences” – ISSN: 1866-6299, redigido e apresentado segundo as normas do mesmo. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11788-8>

## Abstract

Dams and artificial reservoirs can significantly alter the dynamics of sediment transport in a watercourse. Therefore, the main objective of this study is to assess the influence of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir on sediment transport in the Pandeiros River. The study also aims to characterize the sediment composition and assess the correlation between total and suspended solids with turbidity, flow, and precipitation variables. The study was carried out in the Pandeiros River basin, Brazil, between May 2019 and January 2023. The following variables were analyzed: flow, turbidity, precipitation, total solids (fixed and volatile), and suspended solids (fixed and volatile). The results showed that, under the conditions observed during the study, the reservoir did not affect the concentration and composition of the sediments. It was found that the solids transported by the Pandeiros River are mostly composed of inorganic material. A positive correlation was observed between the variables, which was stronger when correlated with suspended solids. The correlation analysis indicated that precipitation is one of the main factors related to sediment transport in the Pandeiros River. In conclusion, the reservoir did not significantly affect the sediment concentration in the Pandeiros River.

**Keywords:** Sediment; Water Quality; Spearman correlation; Suspended solids.

## 1. Introduction

Dams and artificial reservoirs can significantly alter the dynamics of sediment transport in a watercourse. The implementation of a reservoir causes changes in the cross-sections of watercourses, providing favorable conditions for sedimentation and siltation (Cabral 2005; Carvalho 2008).

Reservoirs created by the construction of dams can interrupt the sediment flux in rivers, resulting in sediment retention in the reservoir and, consequently, reducing its storage capacity (Lee et al. 2022). Furthermore, the implementation of reservoirs can cause changes in the sediment flux and sediment concentration, as reported in several studies (Dai et al. 2008; Le et al. 2020; Snoussi et al. 2002; Yang et al. 2018).

The Pandeiros Small Hydroelectric Plant was built in 1957 and operated until 2008, when the Regional Superintendence for the Environment and Sustainable Development (SUPRAM, for its acronym in Portuguese) rejected its request for renewal of its Operating

License. The cessation of power generation and bottom outlet flushing operations, aimed at desilting the reservoir (0.28 km<sup>2</sup>), resulted in the accumulation of sediments, leading to a reduction in the storage capacity and the reservoir area.

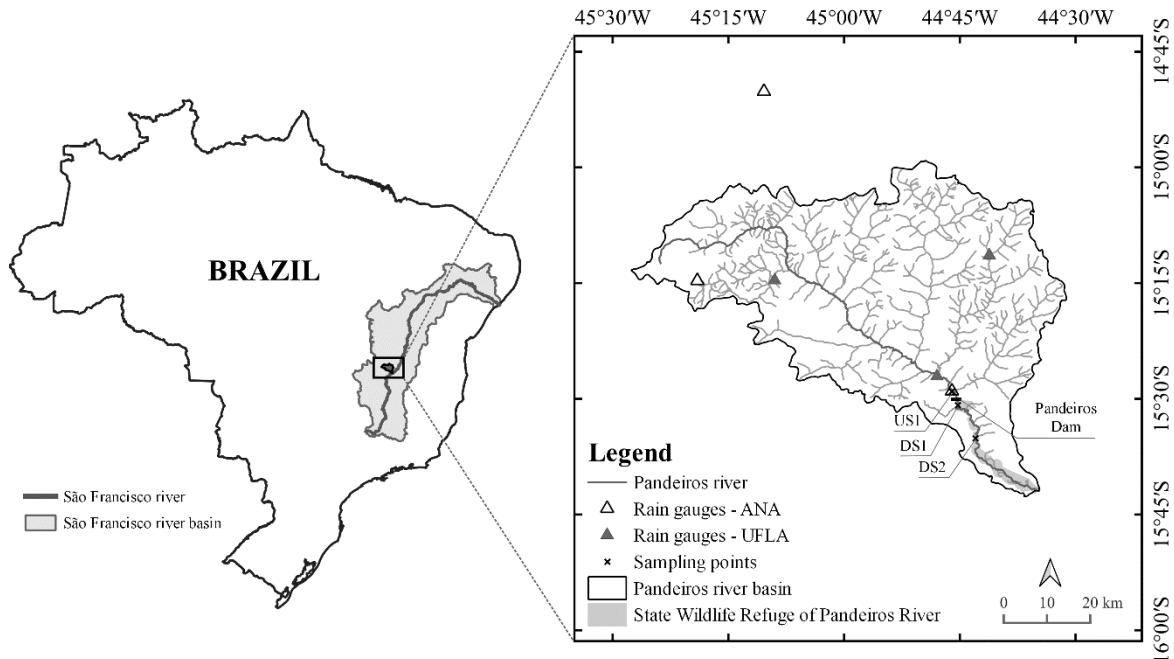
Therefore, hydro-sedimentological studies are necessary to confirm whether the Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir still influences the concentration and sediment flux in the Pandeiros River. Thus, the objectives of this work were: i) to verify whether the Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir influences the sediment concentration in the Pandeiros River; ii) to characterize the total and suspended solids transported by the Pandeiros River in terms of their fixed and volatile fractions; and iii) to assess the correlation between total solids and suspended solids with the turbidity, flow, and precipitation.

It is worth mentioning that the Pandeiros River Basin is considered an environmental protection area and many studies have been carried out in different fields of knowledge, such as myrmecology (Queiroz et al. 2022; Oliveira, 2021; Silva, G. et al. 2020), ichthyofauna (Souza, 2017; Souza, 2019; Souza et al. 2019), vegetation and ecological succession (Costa, 2023; Milhomens, 2022; Silva and Van Den Berg 2020), benthic macroinvertebrates (Linares and Callisto 2019), and hydrological modeling (Junqueira et al. 2020; Junqueira, 2022).

## **2. Materials and methods**

### **2.1. Location and characterization of the study region**

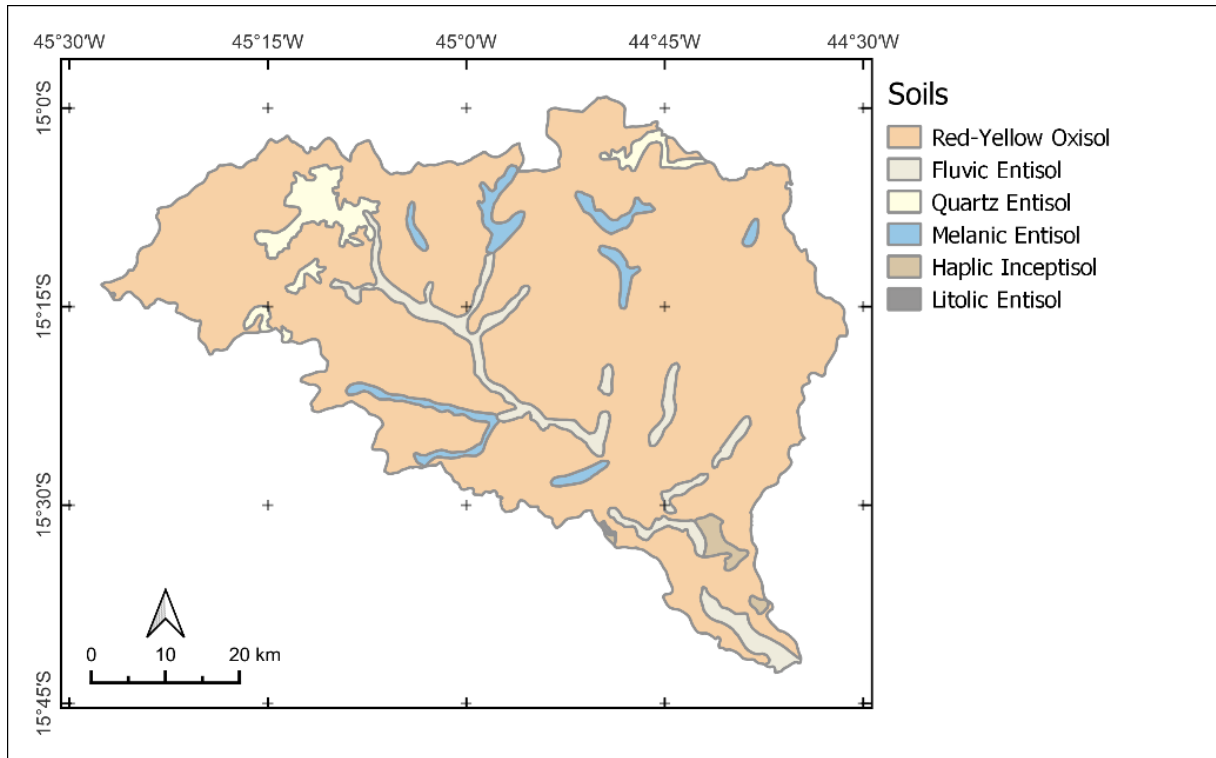
The study was conducted in the Pandeiros River basin (3,938 km<sup>2</sup>), which is located in the state of Minas Gerais, Brazil, on the left margin of the São Francisco River (Fig. 1) (IEF 2013a). The Pandeiros River basin is considered an environmental protection area under State Law N<sup>o</sup>. 11901 of September 1st, 1995. Within the basin is the Pandeiros River State Wildlife Refuge, which was created by Decree N<sup>o</sup>. 43910 of November 5th, 2004, with an area of 61.02 km<sup>2</sup> (IEF 2013a, b).



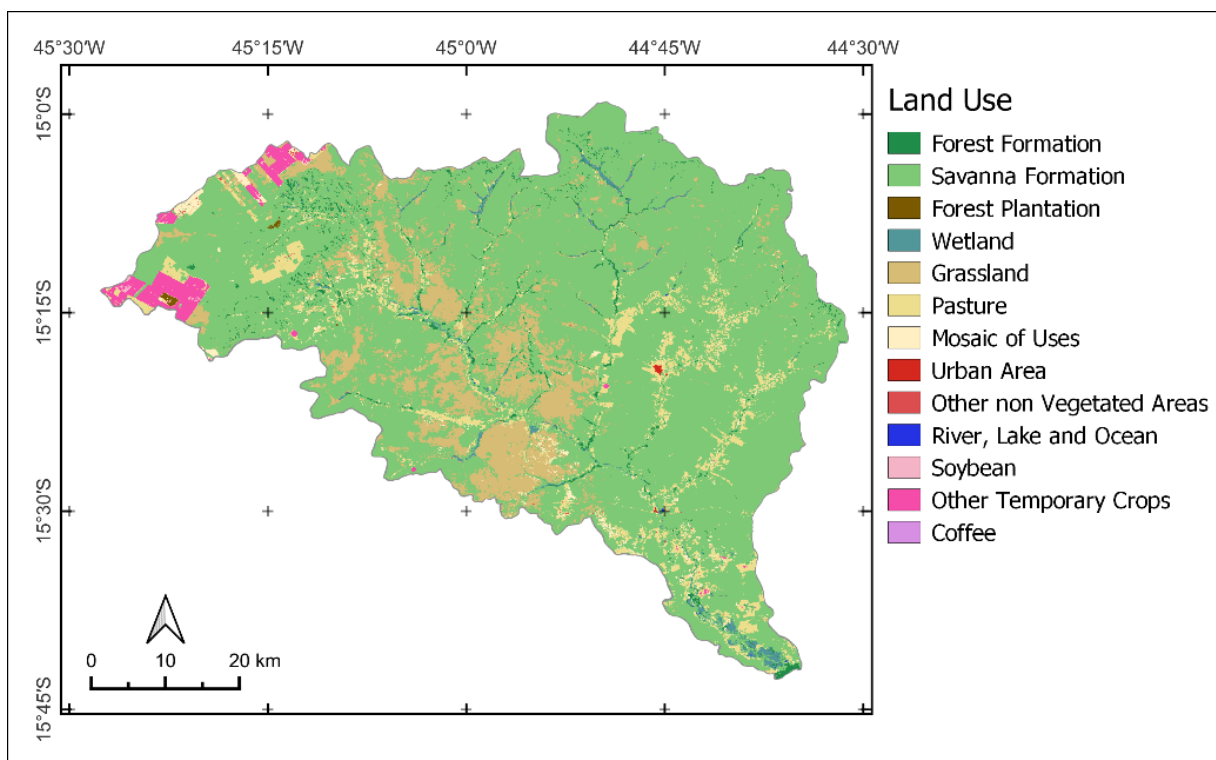
**Fig. 1** Location of the Pandeiros River basin, sampling points and rain gauges

The Köppen climate classification for the region is Aw, which corresponds to a tropical climate with a dry winter, a total precipitation of less than 60 mm in the driest month and a mean temperature of the coldest month above 18 °C (Martins et al. 2018; Silva, F. et al. 2008). The rainy season, which accounts for around 90% of precipitation, begins around September and October and lasts until March and April. For the period between 1992 and 2022, the total annual precipitation varied between 680 and 1,674 mm, with an average of 1,019 mm.

The elevation in the basin varies between 435 and 844 m, from the highest point to the mouth of the Pandeiros River. According to the Soil Map of the Minas Gerais state (UFV 2010), six soil classes are found in the basin (Fig. 2). The land cover (Fig. 3) is predominantly composed of savannah formations (Savanna Formation and Grassland). Table 1 shows the relief classes, soil classes and land uses present in the study area.



**Fig. 2** Soil map of the Pandeiros river basin



**Fig. 3** Land Use map of the Pandeiros river basin

**Table 1** Relief classes, soils and land use in the Pandeiros River basin.

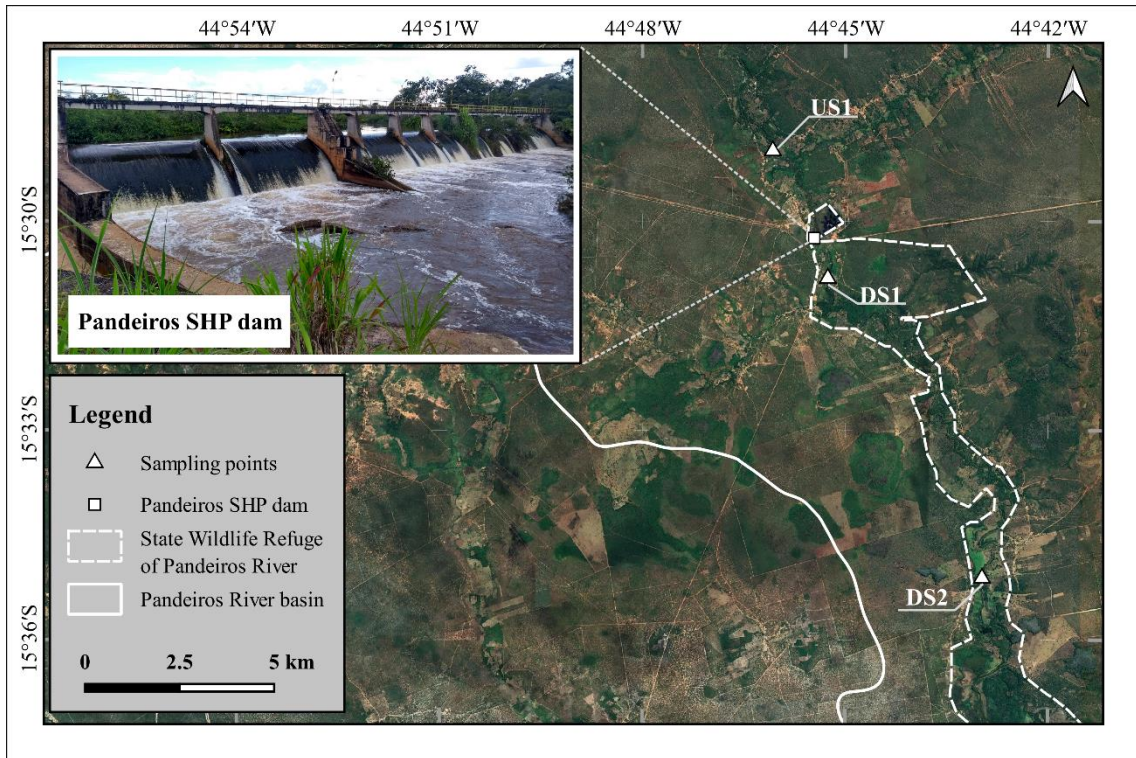
<b>Relief<sup>a</sup></b>	<b>%</b>	<b>Soils<sup>b</sup></b>	<b>%</b>	<b>Land Use<sup>c</sup></b>	<b>%</b>
Flat (0 - 3%)	17.2	Red-Yellow Oxisol	87.6	Savanna formation	70.3
Slightly undulating (3 – 8%)	63.4	Fluvic Entisol	5.4	Grassland	19.3
Undulating (8 – 20%)	17.1	Quartz Entisol	3.2	Pasture	3.9
Strong undulating (20 – 45%)	2.1	Melanic Entisol	3.0	Agriculture and Pasture	2.8
Mountainous (45 – 75%)	0.2	Haplic Inceptisol	0.7	Forest formation	2.0
Steep (> 75%)	0.0	Litolic Entisol	0.1	Other classes	1.7

Legend: <sup>a</sup> Classified according to the classification proposed by Embrapa (1979); <sup>b</sup> Obtained from the Soil Map of the state of Minas Gerais (UFV, 2010); <sup>c</sup> Obtained from MapBiomias Project - Collection 8 of the Annual Series of Land Cover and Land Use Maps of Brazil, accessed via the link: [https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection\\_8/lclu/coverage/brasil\\_coverage\\_2020.tif](https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_8/lclu/coverage/brasil_coverage_2020.tif)

## 2.2. Sampling points

The sampling points were selected based on accessibility, presence of government monitoring structures, and location in relation to the Pandeiros Small Hydroelectric Plant dam (upstream and downstream). Three sampling points (Fig. 4) were monitored along the Pandeiros River, one located upstream (US1) and two located downstream of the dam (DS1 and DS2).

The US1 (3.0 km upstream) and DS1 (1.26 km downstream) sampling points are located next to the streamflow stations “Usina do Pandeiros Montante” (code 44250000, under the responsibility of the National Agency of Water and Basic Sanitation — ANA, for its acronym in Portuguese) and “Usina do Pandeiros Jusante” (code 44252000, under the responsibility of the Minas Gerais Water Management Institute — IGAM, for its acronym in Portuguese), respectively.



**Fig. 4** Location of sampling points and Pandeiros SHP dam [Color should be used for Fig. 4]

The sampling point DS2 (18.0 km downstream) is located near a pedestrian bridge between the communities of Campos and Casa Armada. There are no government monitoring structures installed at this sampling point. This sampling point was selected due to its proximity to the site known as Pantanal Mineiro. The Pantanal Mineiro corresponds to a flooded area that varies from approximately 30 km<sup>2</sup> (dry) to 50 km<sup>2</sup> (rainy) and is of great importance for the reproduction and development of the São Francisco River's ichthyofauna (Nunes et al. 2009). The coordinates, elevation, drainage area, and perimeter of the monitored cross-sections can be found in the Supplementary Material (Table S1).

### 2.3. Hydro-sedimentological monitoring

Monitoring was carried out between May 2019 and January 2023. Precipitation data were obtained from three rain gauge stations (Fig. 1) (codes: 1445000; 1544032 and 1545006) belonging to the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA, for its acronym in Portuguese) and three automatic rain gauges (model Data Logging Rain Gauge RG3-M, Onset brand) installed in the watershed (Fig. 1). The automatic rain gauges (UFLA 01; UFLA 02 and UFLA 03) were installed in October 2021.

Total precipitation in the watershed was calculated using the Thiessen method, as described by Tucci (2001). For the period between May 2019 and October 2021, data obtained

from ANA's rain gauge stations were used. From October 2021 onwards, data from the automatic rain gauges installed in the basin were used.

The conventional method was used to determine the flow rate. The average water velocity was determined using a Global Water flow probe, model FP 111. The flow rate was obtained as the product of the average water velocity and the cross-sectional area (National Agency of Water and Basic Sanitation — ANA 2009; Brandão et al. 2011). The measurements were carried out without the aid of a vessel. In situations where it was not possible to measure the flow without the aid of a vessel, the OTT Qliner2 flow meter was used to determine the flow based on the acoustic principle of the Doppler effect (Acoustic Doppler Current Profiler — ADCP).

Suspended sediment samples were collected using the US DH-48 sediment sampler. The procedures were conducted as described by Carvalho et al. (2000) and Carvalho (2008). Water samples were collected from five verticals of each cross-section, with a volume of 1.5 liters. Sample preservation during transport and storage in the laboratory was performed according to the recommendations of the National Guide for Sample Collection and Preservation (Brandão et al. 2011). The water quality analyses were performed at the Water Analysis Laboratory of the Federal University of Lavras' Water Resources Department.

The following variables were analyzed: total solids, fixed total solids, volatile total solids, suspended solids, fixed suspended solids, volatile suspended solids, and dissolved solids. The analyses followed the methodology of the American Public Health Association (APHA 2017).

The turbidity of the samples was determined in the field using a portable turbidimeter (Digimed brand, model DM-TU), however, this variable was not determined in all campaigns carried out due to the unavailability of the equipment in some campaigns. It was only possible to determine the turbidity of the samples in eight campaigns. The campaigns carried out and the variables measured can be found in the Supplementary Material (Table S2).

Due to logistical difficulties, mainly caused by the COVID-19 pandemic, no sampling frequency was defined, and the campaigns were conducted randomly. However, to represent the seasonal behavior of the Pandeiros River, at least one campaign was carried out in each period of the hydrological year (dry and rainy).

## **2.4. Data analysis**

Descriptive statistics were used to present the data (minimum, maximum, mean, standard deviation). The data were also subjected to statistical tests to make comparisons between periods (dry and rainy) and sampling points.

In order to determine which type of test should be used, whether parametric or non-parametric, the data were subjected to the Shapiro-Wilk test (Royston 1995; Shapiro and Wilk 1965), with a significance level of 5%. The results indicated that the data were not normal ( $p < 0.05$ ), thus, using non-parametric tests was necessary.

To compare data from different periods (dry and rainy periods), the Mann-Whitney test (Hollander and Wolfe 1973) was performed, and the Kruskal-Wallis test (Hollander and Wolfe 1973) was performed to compare data between different sampling points. Once a significant difference between sampling points was found as a result of the Kruskal-Wallis test, the Dunn test was applied to determine which groups differed, with adjustment of the p-value using the Bonferroni method. All tests were performed at a 5% significance level using RStudio software (“stats” package).

The correlation between the variables was assessed using Spearman's correlation coefficient (Hollander and Wolfe 1973), since the data did not show normality. An evaluation was conducted to determine the correlation between the total solids and suspended solids variables with the variables turbidity, flow rate, and total precipitation over periods of one day, three days and five days before collecting water samples. Correlation analyses were performed using RStudio software (“Hmisc” package).

## **3. Results and discussion**

### **3.1. Sediment transport characterization**

To assess the normality of the data, the Shapiro-Wilk test was applied, which indicated that none of the variables had a normal distribution ( $p < 0.05$ ). Therefore, non-parametric tests were used to compare different sampling points and periods (dry and rainy). Table 2 shows the descriptive statistics used to present the data.

**Table 2** Minimum, maximum, mean and standard deviation values of total solids (TS), fixed total solids (FTS), volatile total solids (VTS), suspended solids (SS), volatile suspended solids (VSS), fixed suspended solids (FSS), dissolved solids (DS) and flow.

Sampling point		TS	FTS	VTS	SS	VSS	FSS	DS	Flow
		(mg L <sup>-1</sup> )							(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
US1	Minimum	43.1	23.3	15.8	3.5	0.9	2.0	14.3	5.2
	Maximum	931.3	799.4	136.3	843.5	54.5	789.0	107.3	33.7
	Mean	168.7	115.6	53.1	96.1	8.4	87.7	76.0	12.6
	Standard deviation	195.6	171.4	33.0	197.1	11.9	185.9	24.6	8.7
	Mean (Dry)	81.9	46.9	35.0	8.8	3.1	5.7	73.1	6.5
	Mean (Rainy)	205.9	145.0	60.8	136.3	10.9	125.5	77.3	15.3
DS1	Minimum	70.3	38.1	23.4	3.0	0.8	2.0	40.8	5.5
	Maximum	230.0	154.1	75.9	169.0	26.3	154.0	123.7	35.0
	Mean	117.6	72.8	44.8	48.7	8.0	40.7	77.1	12.9
	Standard deviation	50.2	38.6	13.6	57.5	7.4	51.1	19.1	8.6
	Mean (Dry)	89.6	53.8	35.8	8.5	2.8	5.7	81.1	7.3
	Mean (Rainy)	131.6	82.4	49.3	68.7	10.5	58.2	75.0	15.5
DS2	Minimum	81.6	30.7	20.7	6.6	2.0	3.8	69.3	5.3
	Maximum	633.3	514.8	118.5	504.3	62.4	441.9	164.9	28.0
	Mean	168.6	111.0	57.6	75.0	11.1	63.8	96.8	12.2
	Standard deviation	128.2	108.4	29.3	121.3	14.8	106.6	24.8	7.1
	Mean (Dry)	92.3	63.0	29.2	10.5	3.0	7.4	81.8	6.7
	Mean (Rainy)	197.9	129.5	68.5	101.8	14.5	87.3	103.1	14.4

As shown in Table 2, the total solids concentration varied from 43.1 to 931.3 mg L<sup>-1</sup> across sampling points. The suspended solids concentration varied from 3.0 to 843.5 mg L<sup>-1</sup>. Based on the classification proposed by Meybeck et al. (2003) (Table 3), the suspended solids concentration was classified as "Very Low (less than 20 mg L<sup>-1</sup>)" at all sampling points during the dry season, while in the rainy season it was classified as "Low (20 to 100 mg L<sup>-1</sup>)" at DS1 and DS2 sampling points and as "Medium (100 to 500 mg L<sup>-1</sup>)" at US1 sampling point. During the monitoring period, suspended solids concentrations considered "High (500 to 2000 mg L<sup>-1</sup>)" were also observed in isolated events at US1 and DS2 sampling points during the rainy season.

**Table 3** Ranges of suspended solids concentration and classification (adapted from Meybeck et al. (2003)).

Classification	SS (mg L <sup>-1</sup> )
Very Low	< 20
Low	20 - 100
Medium	100 - 500
High	500 - 2000
Very High	2000 - 10000
Extremely High	> 10000

In general, the highest values were observed during the rainy season, as indicated by the mean values for each period. Precipitation was one of the main factors associated with the transport of solids to watercourses, mainly due to the generation of surface runoff. In addition, the generation of surface runoff during precipitation events may be related to the high concentrations of total and suspended solids (greater than 500 mg L<sup>-1</sup>) at sampling points US1 and DS2. It is worth mentioning that in some campaigns carried out during the rainy season, surface runoff was observed in several parts of the watershed. According to Vercruyse et al. (2017), hydro-meteorological factors such as rainfall and river discharge are the main drivers of sediment transport.

Another factor related to sediment transport in the Pandeiros River basin is the presence of gullies, which are responsible for producing a large amount of sediment. According to Lima et al. (2019), there are more than 200 gullies scattered throughout the Pandeiros River basin. In addition, recurrent practices in the basin, such as burning, road opening, and deforestation, alter the land cover and may affect sediment production. These practices were reported in other studies (Borges and Costa 2022; Fonseca et al. 2011; Nunes et al. 2009). In consonance with the present study, Stutter et al. (2017) observed elevated suspended solids concentrations during the rainy season in a study performed in Scotland. The authors reported values of up to 907.0 mg L<sup>-1</sup> after precipitation. Ziegler et al. (2014) also verified the same behavior in a study carried out in Thailand.

Other studies have also found higher solids concentrations during the rainy season when compared to the dry season. Nogueira et al. (2012) assessed sediment transport in tributaries of the Barra dos Coqueiros Hydropower reservoir in Central-western Brazil and found suspended solids concentrations ranging from 0.0 to 78.0 mg L<sup>-1</sup>. The authors also found that the highest

values were obtained during the rainy season. This behavior was attributed to the occurrence of precipitation during this period.

In a study conducted in the Piranhas River basin, in Northeastern Brazil, Garrido et al. (2018) found that the suspended solids concentration ranged from 2.5 to 161.9 mg L<sup>-1</sup>, and that the highest concentrations were recorded after rainfall events at the beginning of the rainy season. Latuf et al. (2019) also observed an increase in the solids concentration after rainfall events in a study carried out in the Machado River basin, in Southeastern Brazil.

In contrast, Vanzela et al. (2012) found no significant difference between the dry and rainy periods when assessing the total and suspended solids concentrations. The authors monitored two basins located in the state of São Paulo, in Southeastern Brazil. During the monitoring conducted at the Pandeiros River, a significant difference ( $p < 0.05$ ) was observed when comparing the dry and rainy periods using data from all sampling points.

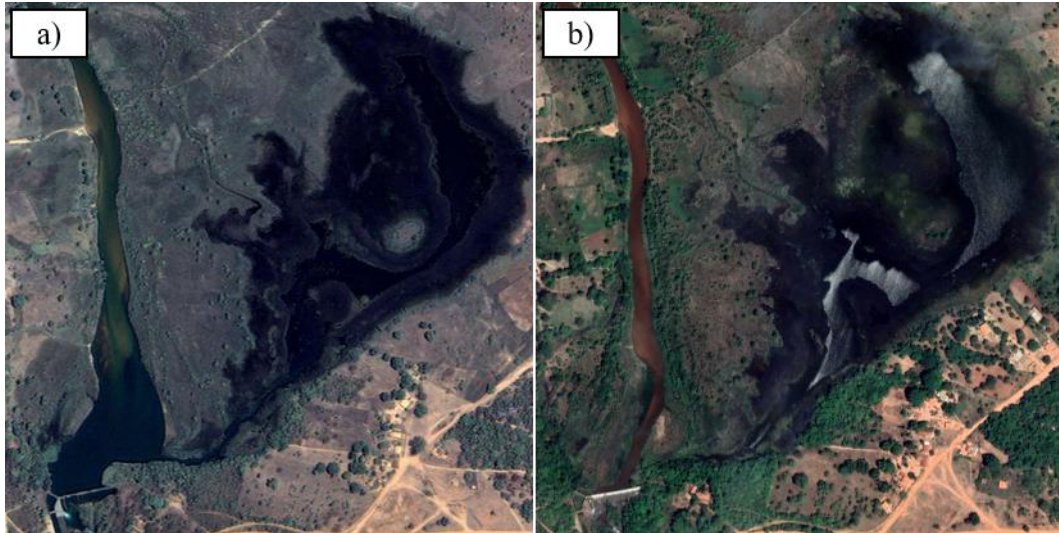
When comparing the sampling points, the Kruskal-Wallis test showed that there was no significant difference for any of the variables analyzed ( $p > 0.05$ ). The results indicated that the reservoir did not significantly affect the sediment concentration in the Pandeiros River under the conditions it was in during the study.

According to Lee et al. (2022), reservoirs created by damming watercourses can retain part of the transported sediment, leading to a reduction in storage capacity. According to Cabral (2005), all reservoirs, regardless of their purpose, size or operating characteristics, are susceptible to partial or total sedimentation of their storage capacity.

According to Le et al. (2020), the construction of reservoirs on watercourses is one of the main factors responsible for changes in sediment transport dynamics. In a study carried out on the Red River basin in China, the authors found a 72–98% reduction in sediment flux after the construction of reservoirs for power generation. Snoussi et al. (2002) also reported a reduction in sediment flux in a study conducted on the Sebou River in Morocco. According to the authors, the suspended sediment flux was reduced by around 73% after the construction of dams in the basin.

The implementation of a reservoir provides an increase in the cross-sectional area of the watercourse, which results in a reduction in water velocity and the creation of areas with favorable conditions for sediment deposition. Siltation and reduction in storage capacity cause a reduction in the cross-sectional area and an increase in velocity in the reservoir, increasing the amount of sediment that flows downstream (Cabral 2005; Carvalho 2008).

The siltation of the reservoir and the consequent reduction in storage capacity probably contributed to the absence of significant sedimentation during the monitored period. More than a decade after the end of operations, a large part of the reservoir has silted up (Fig. 5) as a result of the lack of bottom outlet flushing, which was not performed after the end of power generation in 2008.

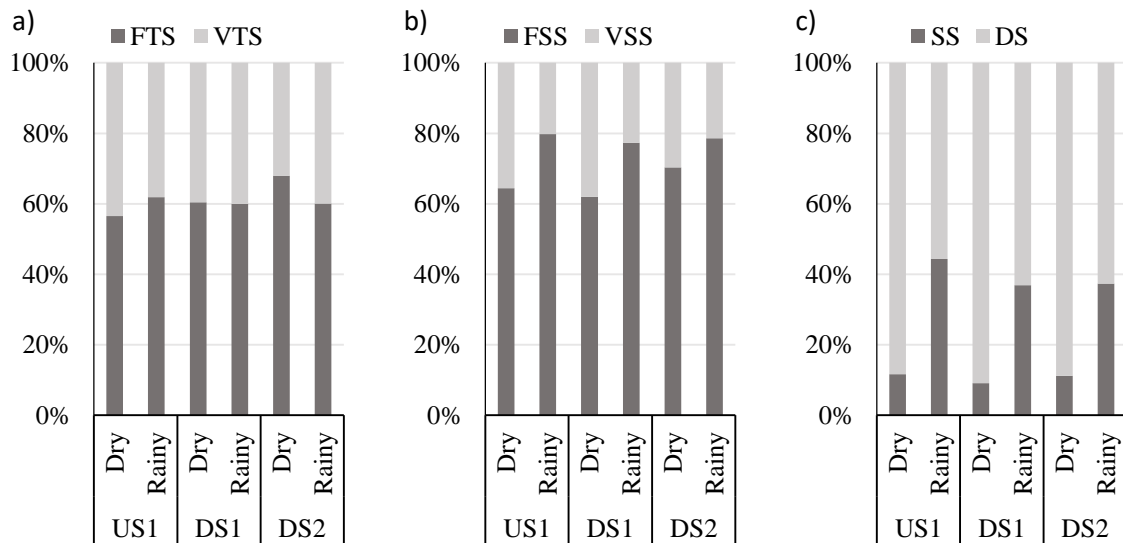


**Fig. 5** Satellite image (from Google Earth) of Pandeiros Small Hydroelectric Plant reservoir: a) before silting (2006/09/17) and b) after silting (2022/08/11) [Color should be used for Fig. 5]

### 3.2. Solids composition

In general, the solids transported by the Pandeiros River are composed of inorganic material, which corresponds to fixed total solids and fixed suspended solids. The mean percentage of inorganic material varied from 56.6% to 67.9% for total solids (Fig. 6a) and from 61.9% to 79.8% for suspended solids (Fig. 6b).

No significant difference ( $p > 0.05$ ) was found when comparing the percentage composition across the sampling points in terms of the division of solids into fixed and volatile for either total solids or suspended solids. These values indicate that the presence of the reservoir in between the sampling points did not significantly affect the composition of the solids.



**Fig. 6** Solids composition in percent: a) fixed total solids (FTS) and volatile total solids (VTS); b) fixed suspended solids (FSS) and volatile suspended solids (VSS) c) dissolved solids (DS) and suspended solids (SS).

In a study performed in Southern Brazil, Chella et al. (2005) also found that the inorganic fraction predominated over the organic fraction in most of the samples collected. In line with the present work, Hoffmann et al. (2020) analyzed the composition of suspended solids in two rivers in Germany and found that the volatile fraction accounted for around 38% of the suspended solids in the Moselle River and 23.0% in the Rhine River. Mathers et al. (2019) found that the mean percentages of volatile suspended solids in two rivers located in the United Kingdom were 21.0 and 26.0%, respectively. The mean values found in the Pandeiros River ranged from 20.2 to 38.0%.

Regarding the separation of suspended and dissolved solids (Fig. 6c), it was observed that during the dry season, suspended solids represent from 9.1 to 11.7% of the total solids. In the rainy season, when the suspended solids concentration increases, they represent from 36.9 to 44.4% of the total solids.

The increase in the suspended solids concentration during the rainy season is due to the contribution of sediments that are dragged during the occurrence of surface runoff. In consonance with this work, Vanzela et al. (2012) verified the predominance of dissolved solids in the total solids composition, with dissolved solids representing an average of 72.3 to 74.1% of total solids.

### 3.3. Correlation of solids with flow, turbidity and precipitation

Table 4 shows the correlations between the variables monitored in this study. In all cases, a positive correlation was observed between the variables, and was significant at the 5% probability level.

**Table 4** Spearman's correlation values obtained between the suspended solids (SS) and total solids (TS) with turbidity (T), flow and one-day accumulated antecedent precipitation (AAP - 1), three-day accumulated antecedent precipitation (AAP - 3) and five-day accumulated antecedent precipitation (AAP - 5).

	SS				TS			
	US1	DS1	DS2	ALL	US1	DS1	DS2	ALL
<b>Flow</b>	0.86	0.87	0.80	0.83	0.63	0.74	0.78	0.71
<b>T</b>	0.81	0.79	0.76	0.76	0.41	0.69	0.68	0.62
<b>AAP - 1</b>	0.72	0.66	0.84	0.71	0.74	0.60	0.83	0.72
<b>AAP - 3</b>	0.86	0.78	0.79	0.81	0.79	0.69	0.78	0.76
<b>AAP - 5</b>	0.79	0.70	0.63	0.72	0.74	0.65	0.73	0.70

In general, the correlations between turbidity and flow with suspended solids were close, ranging from 0.76 to 0.87, with the correlation with flow being greater or equal in all situations. The same behavior was observed when correlating turbidity and flow with total solids.

In all situations, the correlation between turbidity and flow with suspended solids was stronger than the correlation with total solids. These values suggest that both flow and turbidity can more accurately estimate the suspended solids concentration than the total solids concentration.

Other studies have also found a positive correlation between the variables. Souza and Gastaldini (2014) monitored four sampling points in the Vacacaí-Mirim River basin, in Southern Brazil, and found a positive correlation between turbidity and flow when correlated with total solids and suspended solids in most sections. A negative correlation was observed only at two different sampling points when flow and suspended solids and flow and total solids were correlated. In another study carried out in Southern Brazil, Daneluzzi et al. (2018) observed a positive correlation between turbidity and total solids.

In contrast, Oliveira and Queiroz (2018) concluded that there was no correlation between turbidity and total solids in a study conducted in a tributary of the Paraguay River, in

Central-western Brazil. Quinelato et al. (2020) did not find a correlation between turbidity and suspended solids and considered the correlation between turbidity and total solids to be weak. The authors monitored three watercourses in the south of the state of Bahia, in Northeastern Brazil.

Medeiros et al. (2015) observed a positive correlation between suspended solids and turbidity, however, no correlation was observed between suspended solids and flow. According to the authors, the lack of correlation between suspended solids and flow indicates the influence of the flow regularization due to the dam for power generation. The study was carried out on the São Francisco River, in Northeastern Brazil.

Huey and Meyer (2010) also found a positive correlation between turbidity and suspended solids in a study conducted in the United States. The values obtained by the authors ranged from 0.59 to 0.96. The correlation between suspended solids and flow was positive as well, but showed lower values when compared to turbidity, ranging from 0.28 to 0.51, in contrast to the results obtained in the present study. Louzada et al. (2022) also found that the correlation between suspended solids, turbidity, and flow was positive in the Ribeirão do Gama, in Central-Western Brazil.

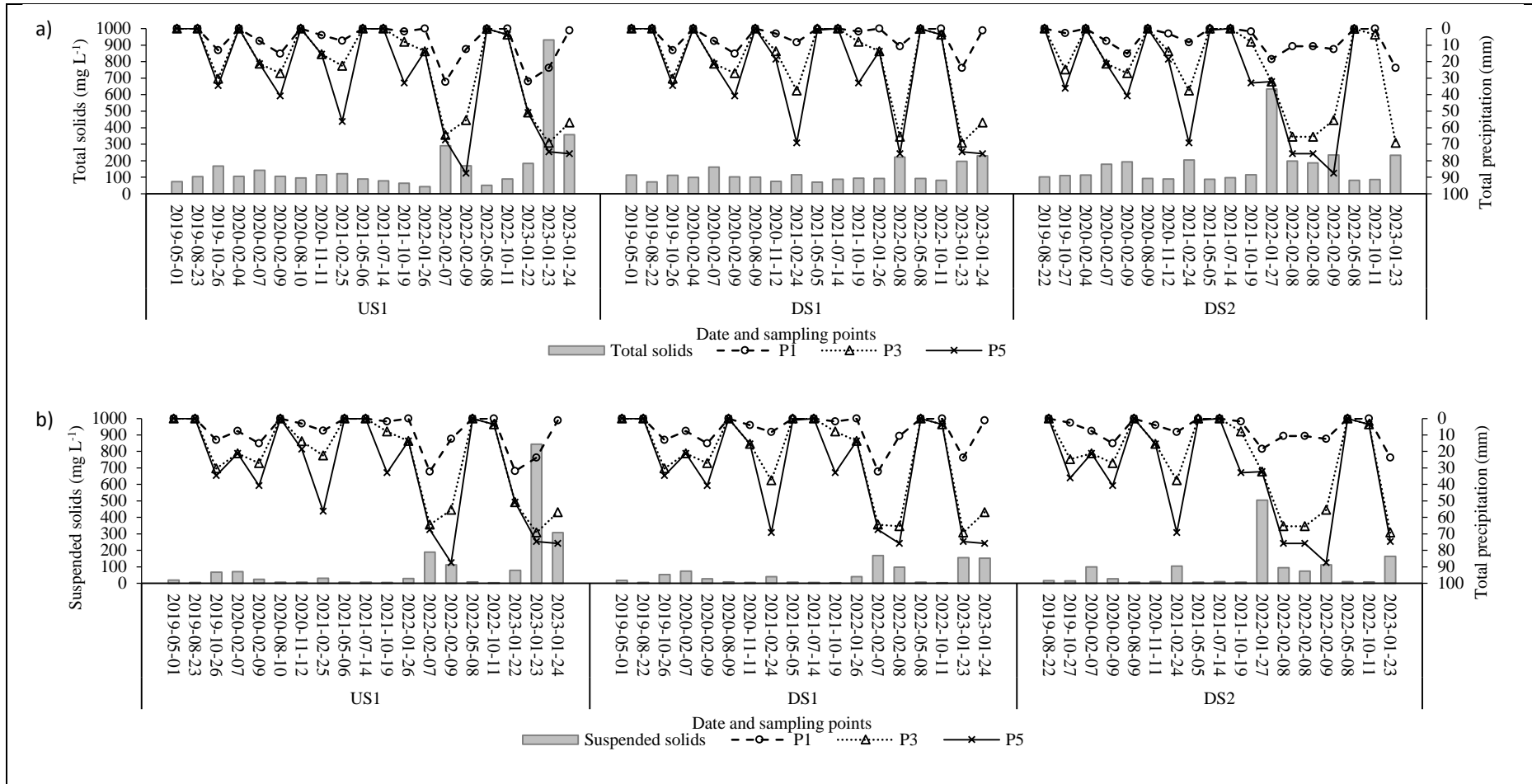
The positive correlation between suspended solids and turbidity was also observed by Aquino et al. (2018), Davies-Colley et al. (2014), Galatto et al. (2011), Hoffmann and Oliveira (2018), Medeiros et al. (2015), Souza and Gastaldini (2014), Villa et al. (2019), and Williamson and Crawford (2011), corroborating the results of the present work.

According to Huey and Meyer (2010), the positive correlation between solids and flow is indicative of sediment transport to watercourses during the precipitation events that generate surface runoff. According to Cunha and Thomaz (2015) and Hoffmann and Oliveira (2018), the presence of rural roads is one of the factors that contribute to an increase in sediment transport and, consequently, an increase in turbidity and solids concentration.

During this study, it was observed that most of the rural roads located in the Pandeiros River basin lack maintenance. Most of the roads did not have conservation practices to reduce the generation and transport of sediment, such as infiltration basins.

In addition, the practice of burning and the removal of vegetation cover was also observed in different points of the basin, as mentioned above. These factors, combined with the characteristics of the soil in the region, which is predominantly sandy, may contribute to a greater amount of sediment reaching the watercourses. As mentioned above, surface runoff was also observed at various points in the watershed.

Regarding the correlation between total and suspended solids with the antecedent precipitation, positive values were observed (Table 4), indicating an increase in the solids concentration with increasing precipitation, as can be seen in Fig. 7. These values indicate the influence of precipitation on the sediment transport dynamics and strengthen the hypothesis that precipitation is one of the main factors related to sediment transport in the Pandeiros River basin, mainly due to the generation of surface runoff.



**Fig. 7** Total solids (a) and suspended solids concentration (b) and total precipitation in the basin one day (P1), three days (P3) and five days (P5) before sediment sampling

In line with the present study, other authors have also found a positive correlation between solids concentration and precipitation. Zhang et al. (2017) observed an increase in the solids concentration with increasing precipitation, in a study carried out in the Yuqiao reservoir in China. According to the authors, precipitation may have caused particulate matter to be dragged into the watercourse, or sediment resuspension, leading to an increase in the solids concentration. The same behavior was described by He et al. (2019), who observed a positive correlation between precipitation and sediment concentration in a study conducted in the Yangtze River estuary in China.

In studies carried out in Brazil, Garrido et al. (2018), Latuf et al. (2019), and Nogueira et al. (2012) also reported an increase in the solids concentration during the rainy season. According to the authors, the solids concentration is related to the occurrence of precipitation.

#### **4. Conclusions**

The hydro-sedimentological monitoring conducted on the Pandeiros River led to the conclusion that the reservoir of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant, in the condition observed during the period of this study, did not significantly affect the sediment concentration.

There was also no influence of the reservoir on the solids composition during the monitoring period. It was concluded that most of the total and suspended solids are composed of inorganic material, which corresponds to the fixed fraction of the solids. Furthermore, the dissolved fraction of the total solids predominates over the suspended fraction in both dry and wet periods.

The data also indicated the existence of a positive correlation between the solids concentration (total and suspended) with turbidity, flow, and precipitation. The analysis of the correlation between the variables, along with the analysis of the mean values observed in the dry and rainy periods, indicated that precipitation was one of the main factors associated with sediment transport in the Pandeiros River basin. The correlations obtained between total and suspended solids with turbidity and flow indicate that these variables have the potential to be used in the estimation of solids concentration.

## Acknowledgements

This study was developed in partnership with Cemig and Aneel's Research and Development Program (R&D GT-0611) and partially financed by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) — Finance Code 001.

## Supplementary Material

### Table S1

Sampling points, coordinates, elevation, drainage area (DA) and perimeter.

Sampling Point	Latitude	Longitude	Elevation (m)	DA (km <sup>2</sup> )	Perimeter (km)
US1	15°28'59.50"	44°46'04.30"	490	3227.35	544.57
DS1	15°30'49.06"	44°45'15.40"	463	3622.52	475.13
DS2	15°35'06.86"	44°42'58.32"	446	3776.95	446.37

**Table S2**

Date of sample collection, variables measured and number of samples taken.

Date	Turbidity			SS and Flow		
	US1	DS1	DS2	US1	DS1	DS2
05/01/2019	-	-	-	1	1	-
08/22/2019 - 08/23/2019	-	-	-	1	1	1
10/26/2019 - 10/27/2019	-	-	-	1	1	1
02/07/2020 - 02/09/2020	-	-	-	2	2	1
08/09/2020 - 08/10/2020	-	-	-	1	1	1
11/11/2020 - 11/12/2020	-	-	-	1	1	1
02/24/2021 - 02/25/2021	5	5	5	1	1	1
05/05/2021 - 05/06/2021	5	5	5	1	1	1
07/14/2021	5	5	5	1	1	1
10/19/2021	5	5	5	1	1	1
01/26/2022 - 01/27/2022	-	-	-	1	1	1
02/07/2022 - 02/09/2022	1	3	3	2	2	3
05/08/2022	5	5	5	1	1	1
10/11/2022	5	5	5	1	1	1
01/22/2023 - 01/24/2023	1	2	4	1	2	1

## References

- APHA (2017) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Twenty-third edition. APHA, AWWA, WEF, Washington.
- ANA (2009) Medição de descarga líquida em grandes rios: Manual técnico. ANA; SGH, Brasília.
- Aquino IG, Roig HL, Oliveira ES, Garnier J, Guimarães EM, Koide S (2018) Temporal variation of suspended sediments and mineralogy using an improved automatic sampler system in the Riacho Fundo Stream, Brasília, Distrito Federal, Brazil. *Geologia USP - Serie Cientifica* 18(2):171–185. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-140500>
- Borges MG, Costa LRF da (2022) Tipologia de áreas úmidas na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros em Minas Gerais – Brasil. *Caderno de Geografia* 32(69):508-522. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2022v32n69p508>
- Brandão CJ, Botelho MJC, Sato MIZ, Lamparelli MC (2011) Guia nacional de coleta e preservação de amostras: Água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. ANA, Brasília.
- Cabral JBP (2005) Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. *Caminhos de Geografia* 6(14):62–69. <https://doi.org/10.14393/RCG61415371>
- Carvalho NdeO (2008) Hidrossedimentologia prática, segunda edição. Interciência, Rio de Janeiro.
- Carvalho NdeO, Filizola Júnior NP, Santos PMCdos, Lima JEFW (2000) Guia de práticas sedimentométricas. ANEEL, Brasília.
- Chella M, Fernandes C, Fermiano G, Fill H, Santos I (2005) Avaliação do Transporte de Sedimentos no Rio Barigüi. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 10(3):105–111. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p105-111>
- Cunha MCda, Thomaz EL (2015) É possível reduzir a turbidez da água em bacia rural por meio de implantação de caixas de infiltração? *Revista Brasileira de Geomorfologia* 16(4):657-667. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i4.725>
- Dai SB, Yang SL, Cai AM (2008) Impacts of dams on the sediment flux of the Pearl River, southern China. *Catena* 76(1):36–43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.08.004>

Daneluzzi NS, Gonçalves VD, Freitas RPde (2018) Avaliação da qualidade da água de uma bacia hidrográfica urbana: estudo de caso bacia do rio Pinhalzinho II, Umuarama - PR. *Ambiência* 14(3):678–698. <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2018.03.17>

Davies-Colley RJ, Ballantine DJ, Elliott SH, Swales A, Hughes AO, Gall MP (2014) Light attenuation – a more effective basis for the management of fine suspended sediment than mass concentration? *Water Science and Technology* 69(9):1867–1874. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.096>

EMBRAPA (1979) Sumula da X reunião técnica de levantamento de solos. SNLCS, Rio de Janeiro.

Fonseca DdeSR, Nascimento CR, Miranda WdeA, Figueiredo FPde (2011) Diagnóstico do uso do solo e degradação ambiental na bacia hidrográfica do Pandeiros-MG como subsídio para estudos de impacto ambiental. *Revista Eletrônica Georaguaia* 1(1):1-20. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/4798>

Galatto SL, Alexandre NZ, Pereira JL, Patrício TB, Vassiliou M, Fernandes AN, Frassetto J, Valvassori ML (2011) Diagnóstico ambiental de nascentes no município de Criciúma, Santa Catarina. *Revista de Ciências Ambientais* 5(1):39–56. <https://doi.org/10.18316/136>

Garrido JWA, de Sousa TMI, Ismael LL, Crispim DL, Ferreira PMDL, de Queiroz MMF (2018) Determination of key curves of discharges of suspended sediment in the hydrographic basin of piancó-piranhas-açu river. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 23(1):69–75. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018138711>

He C, Yao Y, Lu X, Chen M, Ma W, Zhou L, (2019) Exploring the Influence Mechanism of Meteorological Conditions on the Concentration of Suspended Solids and Chlorophyll-a in Large Estuaries Based on MODIS Imagery. *Water* 11(2):375. <https://doi.org/10.3390/w11020375>

Hoffmann TCP, Oliveira FAde (2018) Influência do uso da terra em áreas rurais e urbanas na produção e transporte de sedimentos em suspensão e turbidez na bacia do rio Capivari, Lapa-PR. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 19(4):821–836. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1340>

Hoffmann TO, Baulig Y, Fischer H, Blöthe J (2020) Scale breaks of suspended sediment rating in large rivers in Germany induced by organic matter. *Earth Surface Dynamics* 8(3):661–678. <https://doi.org/10.5194/esurf-8-661-2020>

Hollander M, Wolfe DA (1973) Nonparametric statistical methods. John Wiley Sons, New York.

Huey GM, Meyer ML (2010) Turbidity as an Indicator of Water Quality in Diverse Watersheds of the Upper Pecos River Basin. *Water* 2(2):273–284. <https://doi.org/10.3390/w2020273>

IEF (2013a) APA Pandeiros. Instituto Estadual de Florestas. <http://www.ief.mg.gov.br/component/content/article/3306-novacategoria/1769-apa-pandeiros>. accessed 4 December 2023

IEF (2013b) Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros. Instituto Estadual de Florestas. <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/3306-nova-categoria/1768-refugio-estadual-da-vida-silvestre-do-rio-pandeiros->. accessed 4 December 2023

Latuf MDO, Musselli DG, Chinen HSdeS, Carvalho PHS (2019) Aporte sedimentar em suspensão na bacia do rio Machado, sul de Minas Gerais. *Caderno de Geografia* 29(1):16–35. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp16>

Le NDa, Le TPQ, Phung TXB, Duong TT, Didier O (2020) Impact of hydropower dam on total suspended sediment and total organic nitrogen fluxes of the Red River (Vietnam). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 383:367–374. <https://doi.org/10.5194/piahs-383-367-2020>

Lee F-Z, Lai J-S, Sumi T (2022) Reservoir Sediment Management and Downstream River Impacts for Sustainable Water Resources—Case Study of Shihmen Reservoir. *Water* 14(3):479. <https://doi.org/10.3390/w14030479>

Lima ACPde, Augustin CHRR, Oliveira DAde (2019) Distribuição espacial de voçorocas e sua relação com o relevo em escala de bacia para fins de amostragem: Rio Pandeiros - MG. In Pinheiro LS, Gorayeb A (org.), *Geografia física e as mudanças globais*. Editora UFC, Fortaleza. pp 1-12

Linares MS, Callisto M (2019) Pequena Central Hidrelétrica de Pandeiros e seu efeito sobre moluscos aquáticos invasores. *MG Biota* 12(1):78–89. <http://mgbiota.ief.mg.gov.br/index.php/MB/article/view/139>

Louzada RSP, Tavares AS, Uagoda R (2022) Monitoramento da Vazão e Carga Sólida Suspensa em Eventos Pluviais na Bacia do Ribeirão do Gama/DF. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 23(3):1700–1715. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2134>

- Martins FB, Gonzaga G, Dos Santos DF, Reboita MS (2018) Classificação climática de köppen e de thornthwaite para minas gerais: cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia* 1:129–156. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>
- Mathers KL, Rice SP, Wood PJ (2019) Discharge and suspended sediment time series as controls on fine sediment ingress into gravel river beds. *Catena* 173:253–263. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.001>
- Medeiros PRP, Segundo GHC, Magalhães EMM (2015) Comportamento da turbidez e material em suspensão, em um rio com vazão regularizada por sistema de barragens em cascata: Rio São Francisco (NE, Brasil). *Geochimica Brasiliensis* 29(1):35–44. <https://doi.org/10.5327/Z0102-9800201500010004>
- Meybeck M, Laroche L, Dürr H, Syvitski JP (2003) Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change* 39(1–2):65–93. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00018-3)
- Nogueira PF, Cabral JBP, Oliveira SF (2012) Análise da concentração dos sólidos em suspensão, turbidez e tds nos principais afluentes do reservatório da UHE Barra dos Coqueiros-GO. *Revista Geonorte* 3(4):485–494
- Nunes YRF, Azevedo IFP, Neves WV, Veloso MdDM, Souza RdeA, Fernandes GW (2009) Pandeiros: O Pantanal Mineiro. *Mg Biota* 2(2):4-17. <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/MB/issue/view/23>
- Quinelato RV, Farias EdaS, Brito JMSde, Virgens WA, Pires LC (2020) Análise espaço temporal da qualidade da água dos rios Peruípe, Itanhém e Jucuruçu, Bahia. *Scientia Plena* 16(7):1–12. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.071701>
- Royston P (1995) Remark AS R94: A remark on Algorithm AS 181: The W-test for normality. *Applied Statistics* 44:547–551. <https://doi.org/10.2307/2986146>
- Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3/4):591-611.
- Silva FAMda, Assad ED, Evangelista BA (2008) Caracterização climática do bioma Cerrado. In Sano SM, Almeida SP, Ribeiro JF (Eds.) (2008) *Cerrado: Ecologia e Flora*. EMBRAPA Informação Tecnológica.

- Silva GSda, Rabelo MA, Canedo-Júnior, EdeO, Ribas CR (2020) Formigas removedoras de sementes apresentam potencial para auxiliar na regeneração de áreas impactadas. *MG Biota* 12(2):44–54. <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/MB/article/view/146/97>
- Silva RG, Van Den Berg E (2020) A flora da Zona de Transição Aquático-Terrestre (ATTZ) de uma lagoa marginal perenizada no Rio Pandeiros : retrato do impacto da PCH de Pandeiros sobre um gradiente ambiental. *MG Biota* 12(2):55–69. <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/MB/article/view/149>
- Snoussi M, Haïda S, Imassi S (2002) Effects of the construction of dams on the water and sediment fluxes of the Moulouya and the Sebou Rivers, Morocco. *Regional Environmental Change* 3(1–3):5–12. <https://doi.org/10.1007/s10113-001-0035-7>
- Souza MMde, Gastaldini MdoCC (2014) Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 19(3):263–274. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000001097>
- Souza RCRde, Bueno ML, Rufino MS, Moreira MF, Pompeu PS (2019) Ampliando o conhecimento sobre peixes do Rio Pandeiros. *MG Biota* 12(1):57-77.
- Souza RCRde (2017) Investigating the feasibility to remove SHP Pandeiros: Lessons from fish fauna. Thesis, Universidade Federal de Lavras
- Stutter M, Dawson JJC, Glendell M, Napier F, Potts JM, Sample J, Vinten A, Watson H (2017) Evaluating the use of in-situ turbidity measurements to quantify fluvial sediment and phosphorus concentrations and fluxes in agricultural streams. *Science of The Total Environment* 607–608:391–402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.013>
- Tucci CEM (2001) Hidrologia: ciência e aplicação, segunda edição. Ed. Universidade/UFRGS, Porto Alegre.
- UFV (2010) Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais. <https://dps.ufv.br/software/>. accessed 4 December 2023
- Vanzela LS, De Souza RA, Pitaro FAdAM, Freitas e Silva PA, Sanches AC (2012) Influência da ocupação do solo e do excedente hídrico sobre a vazão e transporte de sedimentos. *Irriga* 1(01):181. <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v1n01p181>
- Vercruysse K, Grabowski RC, Rickson RJ (2017) Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews* 166:38-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>

Villa A, Fölster J, Kyllmar K (2019) Determining suspended solids and total phosphorus from turbidity: comparison of high-frequency sampling with conventional monitoring methods. *Environmental Monitoring and Assessment* 191(605):16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7775-7>

Williamson TN, Crawford CG (2011) Estimation of Suspended-Sediment Concentration from Total Suspended Solids and Turbidity data for Kentucky, 1978-19951. *Journal of the American Water Resources Association* 47(4):739–749. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00538.x>

Yang HF, Yang SL, Xu KH, Milliman JD, Wang H, Yang Z, Chen Z, Zhang CY (2018) Human impacts on sediment in the Yangtze River: A review and new perspectives. *Global and Planetary Change* 162: 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.001>

Zhang C, Zhang W, Huang Y, Gao X (2017) Analysing the correlations of long-term seasonal water quality parameters, suspended solids and total dissolved solids in a shallow reservoir with meteorological factors. *Environmental Science and Pollution Research* 24(7):6746–6756. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8402-1>

Ziegler AD, Benner SG, Tantasirin C, Wood SH, Sutherland RA, Sidle RC, Jachowski N, Nullet MA, Xi LX, Snidvongs A, Giambelluca TW, Fox JM (2014) Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: Hysteresis, variability, and uncertainty. *Journal of Hydrology* 519:2020–2039. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.010>

**ARTIGO 2<sup>8</sup>****Determination of suspended sediment rating curve and models to estimate the suspended solids concentration in the Pandeiros River, Brazil****Determinação das curvas chave de descarga sólida em suspensão e de modelos para estimativa da concentração de sólidos suspensos no Rio Pandeiros, Brasil**

Jonas Faria Dionísio de Oliveira<sup>a,\*</sup>, Gilberto Coelho<sup>b</sup>, Ronan Naves Carvalho<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Federal University of Lavras, School of Engineering, Department of Water Resources, Lavras, Minas Gerais, Brazil, CEP: 37200-000. Email: jonas.dio.94@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6684-6357.

<sup>b</sup> Federal University of Lavras, School of Engineering, Department of Water Resources, Lavras, Minas Gerais, Brazil, CEP: 37200-000. Email: coelho@ufla.br. ORCID: 0000-0002-0654-2754.

<sup>c</sup> Federal University of Lavras, School of Engineering, Department of Water Resources, Lavras, Minas Gerais, Brazil, CEP: 37200-000. Email: ronannaves@hotmail.com ORCID: 0009-0005-2246-5532.

\* Corresponding author, Jonas Faria Dionísio de Oliveira, jonas.dio.94@gmail.com.

---

<sup>8</sup> Artigo aceito para publicação no periódico “Revista Brasileira de Recursos Hídricos” – ISSN: 2318-0331, redigido e apresentado segundo as normas do mesmo. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230138>

## ABSTRACT

The present study aimed to fit the sediment rating curves in three sampling points of the Pandeiros River (Brazil), as well as to establish models for estimating the suspended solids concentration using the flow and turbidity data. The study used data measured between May 2019 and January 2023. The following variables were determined: flow, suspended solids concentration, suspended solids discharge and turbidity. The sediment rating curves were fitted using the power model. The coefficient of determination was higher than 0.93 for all the fits. As for the models fitted to estimate the suspended solids concentration, the best results were obtained by the power model, using flow as the independent variable, and the linear model, using turbidity as the independent variable. It was concluded that both the rating sediment curve and the models fitted to estimate the solids concentration can be used to assist in the hydrosedimentological monitoring of the Pandeiros River.

**Keywords:** water resources; sediments; hydrosedimentology, Pandeiros River, sediment rating curve.

## RESUMO

O presente estudo teve como objetivo ajustar as curvas chave de transporte de sedimentos em três seções do Rio Pandeiros (Brasil), bem como estabelecer modelos para a estimativa da concentração de sólidos suspensos utilizando as variáveis vazão e turbidez. O estudo utilizou dados medidos entre maio de 2019 e janeiro de 2023. Foram determinadas: a vazão, a concentração de sólidos suspensos, a descarga sólida em suspensão e a turbidez. As curvas chave de sedimentos foram ajustadas seguindo o modelo potencial. O coeficiente de determinação foi superior a 0,93 em todos ajustes. Quanto aos modelos ajustados para estimar a concentração de sólidos suspensos, os melhores resultados foram obtidos pelo modelo potencial, utilizando a vazão como variável independente, e linear, utilizando a turbidez como variável independente. Concluiu-se que as curvas chave de sedimentos e os modelos ajustados para estimar a concentração de sólidos podem ser utilizados para auxiliar no monitoramento hidrossedimentológico no Rio Pandeiros.

**Palavras chave:** recursos hídricos; sedimentos; hidrossedimentologia, Rio Pandeiros, curva chave de sedimentos.

## INTRODUCTION

The activities carried out in a watershed can directly affect the watercourse, influencing water quality and hydrosedimentological processes (Giri & Qiu, 2016; Mello et al., 2020; Su et al., 2016). Monitoring solid discharge can reveal the impact of anthropogenic interference in the basin (Garrido et al., 2018; Louzada et al., 2022; Melo et al., 2020; Silva et al., 2021) and assist in the decision-making process aimed at conservation and rational use of water resources.

The Pandeiros River basin, considered an Environmental Protection Area, is located in the Minas Gerais state, Brazil (Instituto Estadual de Florestas, 2013a; Minas Gerais, 1995), and erosion processes are recurrent in its drainage area, with a significant number of gullies (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba, 2021; Lima et al., 2019) which can significantly affect sediment transport in the Pandeiros River. Furthermore, the Pandeiros River State Wildlife Refuge (Minas Gerais, 2004a) is located in the lower course of the Pandeiros River, which is an integral protection conservation unit (Instituto Estadual de Florestas, 2013b) designed to protect natural environments that provide conditions for the existence or reproduction of species or communities of local flora and resident or migratory fauna (Brasil, 2000).

The information obtained from the hydrosedimentological monitoring of the Pandeiros River is of great importance, as it can be used by the authorities responsible for the management of the conservation units located in the Pandeiros River basin. Additionally, this information can aid in the decommissioning of the Pandeiros Small Hydroelectric Plant, which ceased energy production in 2008.

However, measuring solid discharge is a laborious process, which requires financial resources and cannot always be carried out very often, since it involves traveling to the field to determine the flow rate and collecting water samples to determine the suspended solids concentration (Bright et al., 2020; Melo et al., 2020; Menezes et al., 2021; Sultana, 2020). In addition, the direct sampling is a challenging task under high-flow conditions (Aleixo et al., 2020), when most of the sediment is transported (Carvalho, 2008; Hoffmann et al., 2020; Horowitz et al., 2015; Syvitski et al., 2000). Determining the suspended solids concentration is a simple analysis, however, it requires a large amount of time and is considerably more expensive than other alternative methods, such as determining turbidity (Bilotta & Brazier, 2008; Davies-Colley & Smith, 2001).

Turbidity is the degree of attenuation of the intensity that a beam of light suffers when passing through water due to the presence of suspended solids (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2018; Putri & Arisalwadi, 2023), and has been used to estimate the suspended solids concentration by several authors (Bilotta & Brazier, 2008; López et al., 2021; Stutter et al., 2017; Villa et al., 2019). Like turbidity, flow can also be used to estimate sediment load by fitting a curve that relates flow to solid discharge or sediment concentration (Carvalho, 2008). Suspended sediment rating curves are used all around the world and are low-cost, reliable (Jung et al., 2020) and can be used in situations where collecting daily information is not economically viable (Melo et al., 2020; Menezes et al., 2021).

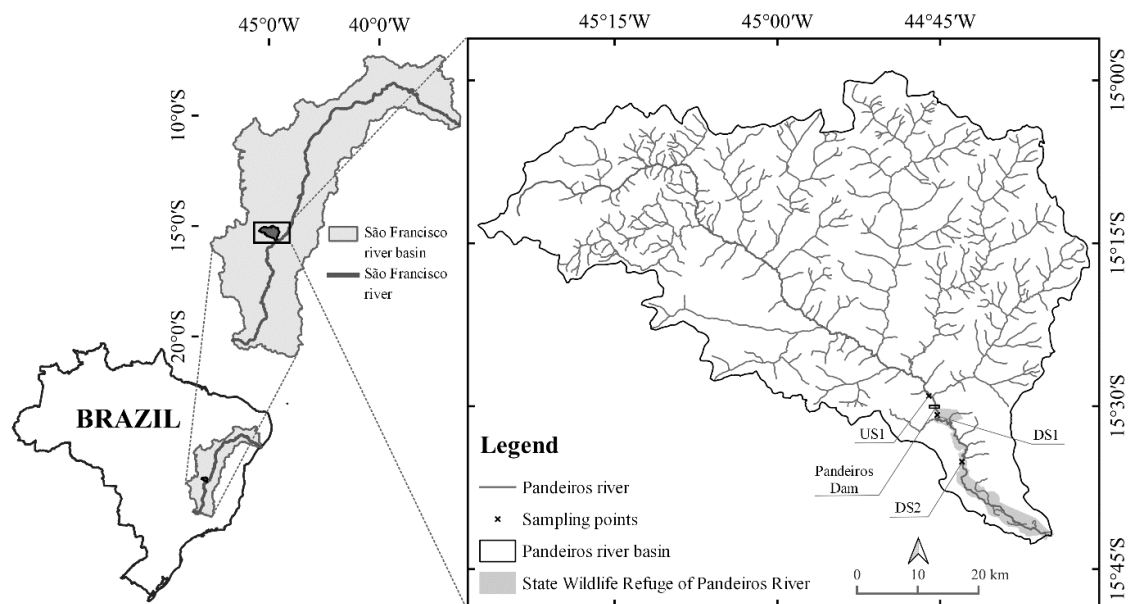
Therefore, the aims of this study were: i) to carry out hydrosedimentological monitoring in three cross-sections of the Pandeiros River and provide a general description of sediment transport, ii) to determine the suspended sediment rating curves in the monitored sampling points and iii) to fit models to estimate the suspended solids concentration using the variables flow and turbidity.

## **MATERIAL AND METHODS**

### **Study area**

The study was carried out in the Pandeiros River basin (3938 km<sup>2</sup>), located in the northwest of the Minas Gerais state, Brazil (Figure 1). The Pandeiros River is a tributary on the left bank of the São Francisco River and is considered a permanent preservation river by Law N<sup>o</sup> 15 082, of April 27, 2004 (Minas Gerais, 2004b).

The Pandeiros River basin is considered an environmental protection area by State Law N<sup>o</sup> 11 901 of September 1, 1995, known as the Pandeiros River Environmental Protection Area (APA Pandeiros, for its acronym in Portuguese). Also located within the basin is the State Wildlife Refuge of Pandeiros River, created by Decree N<sup>o</sup> 43 910 of November 5, 2004, with an area of 61.02 km<sup>2</sup>.



**Figure 1.** Location of the Pandeiros River basin.

The climate in the region is classified as Aw according to the Köppen classification (tropical with dry winter and humid summer) (Martins et al., 2018). The rainy season occurs between October and March, and the mean rainfall for the hydrological year (October to September) is 1085 mm (Junqueira et al., 2020).

The relief classes observed in the study area, considering the classes proposed by Embrapa (1979), are: slightly undulating (3 – 8%, 63.4% of the area); flat (0 – 3%, 17.2% of the area); undulating (8 – 20%, 17.1% of the area); strong undulating (20 – 45%, 2.1% of the area) and mountainous (45 – 75%, 0.2% of the area). Elevation in the basin ranges from 844 m at the highest point in the basin to 435 m at the mouth of the Pandeiros River.

According to Oliveira (2013), in the Pandeiros Environmental Protection Area, the soil classes of Oxisols and Quartz Entisol stand out, developed from sandstones from the Urucuia formation. According to the Soil Map of the Minas Gerais state (Universidade Federal de Viçosa, 2010), six soil classes are found in the basin, these being: Red-Yellow Oxisol (87.6%); Fluvic Entisol (5.4%); Quartz Entisol (3.2%); Melanic Entisol (3.0%) and Haplic Inceptisol (0.7%) and Litolic Entisol (0.1%).

The land cover is predominantly composed of savannah formations (Savanna Formation - 70.3% and Grassland - 19.3%), which total 89.6% of the area. The other classes observed in the area are Pasture (3.9%), Agriculture and Pasture (2.8%) and Forest Formation (2.0%). Other classes occupy 1.7% of the area. The characterization of land cover was obtained from the Land Use and Cover Map for the year 2020 made available by the MapBiomass project (MapBiomass Project, 2020).

## Hydrological monitoring

Monitoring was carried out between May 2019 and January 2023. Due to logistical difficulties, mainly caused by the COVID-19 pandemic, no sampling frequency was defined and the campaigns were carried out randomly. However, to represent the seasonal behavior of the Pandeiros River, at least one campaign was carried out in each period of the hydrological year (dry and rainy). In the campaigns carried out the flow rate was determined and samples of the water were collected to determine the suspended solids concentration (SS).

The flow rate was determined without the aid of a vessel in most campaigns. The conventional method was used, in which the flow rate is obtained as a product of the mean water velocity (determined using a flow probe, from the Global Water brand, model FP 111) and the cross-section area, as described in the publication “Measurement of liquid discharge in large rivers: technical manual” (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2009). In some campaigns, it was not possible to carry out the process without the aid of a vessel. Therefore, the flow rate was determined using the acoustic method (Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP), using the OTT Qliner2 flow meter.

Water samples were collected in five verticals of each cross-section using a US DH-48 sampler. Sample collection followed the procedures recommended by Carvalho (2008). The preservation of samples during transport and storage in the laboratory was performed according to the recommendations of the National Guide for Sample Collection and Preservation (Brandão et al., 2011).

The turbidity of the samples was determined in the field, using a portable turbidimeter (Digimed brand, model DM-TU). However, due to the unavailability of equipment, this variable was not determined in all campaigns. It was only possible to determine the turbidity of the samples in eight campaigns. The campaigns carried out and the variables measured are shown in Table 1.

**Table 1.** Date of sample collection, variables measured and number of samples taken.

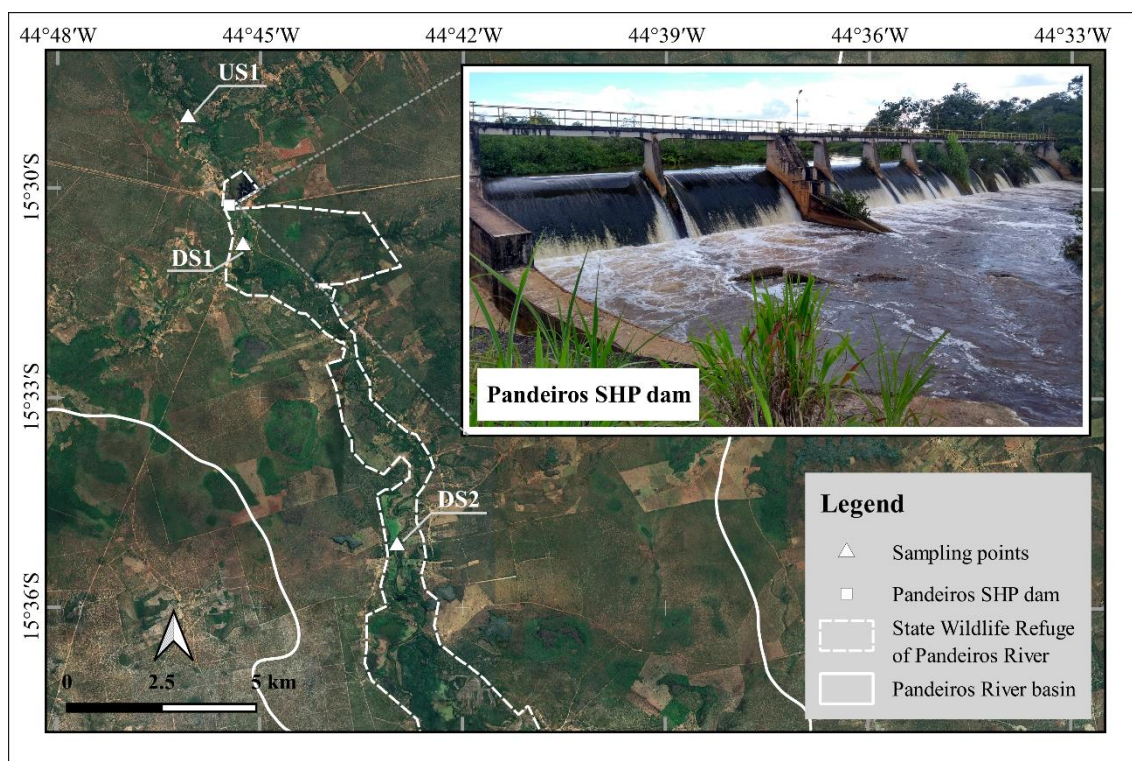
Date	Turbidity			SS and Flow		
	US1	DS1	DS2	US1	DS1	DS2
05/01/2019	-	-	-	1	1	-
08/22/2019 - 08/23/2019	-	-	-	1	1	1
10/26/2019 - 10/27/2019	-	-	-	1	1	1
02/07/2020 - 02/09/2020	-	-	-	2	2	1
08/09/2020 - 08/10/2020	-	-	-	1	1	1
11/11/2020 - 11/12/2020	-	-	-	1	1	1
02/24/2021 - 02/25/2021	5	5	5	1	1	1
05/05/2021 - 05/06/2021	5	5	5	1	1	1
07/14/2021	5	5	5	1	1	1
10/19/2021	5	5	5	1	1	1
01/26/2022 - 01/27/2022	-	-	-	1	1	1
02/07/2022 - 02/09/2022	1	3	3	2	2	3
05/08/2022	5	5	5	1	1	1
10/11/2022	5	5	5	1	1	1
01/22/2023 - 01/24/2023	1	2	4	1	2	1

The suspended solids concentration was determined at the Water Analysis Laboratory of the Water Resources Department of the Federal University of Lavras. The analyses followed the methodologies adapted from the American Public Health Association (American Public Health Association, 2017).

### Sampling points

Three cross-sections were monitored along the Pandeiros River (Figure 2). The sampling points were chosen based on accessibility, the existence of monitoring structures of government agencies (Figure 3) and location relative to the Pandeiros Small Hydroelectric Plant (Pandeiros SHP) reservoir (upstream and downstream).

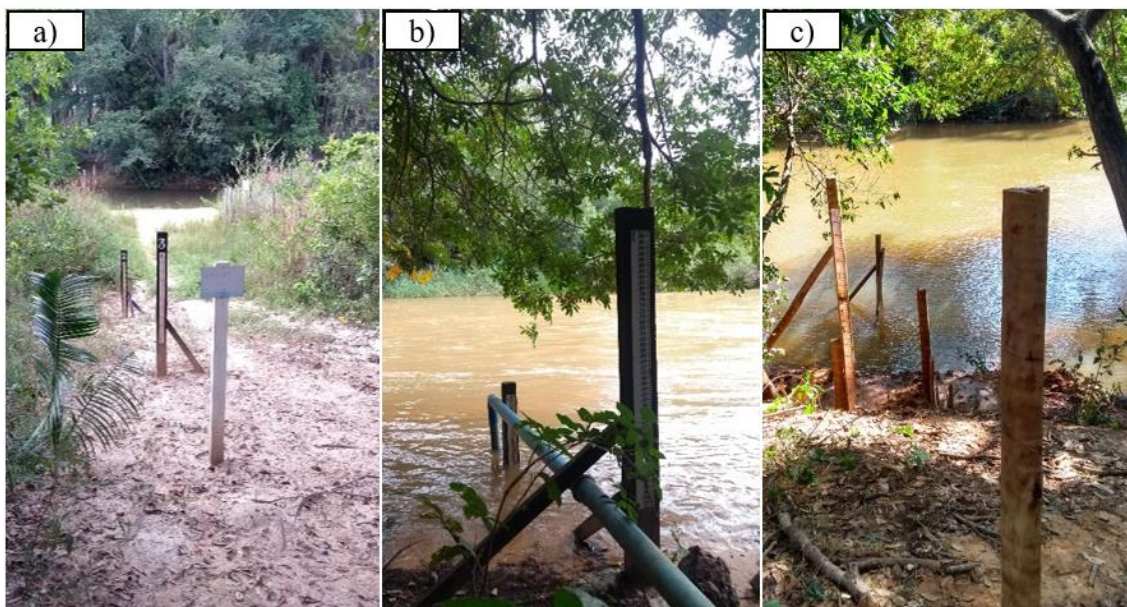
Sampling point US1 (15°28'59.50" S; 44°46'04.30" W; 3227.35 km<sup>2</sup>) is located 3.0 kilometers upstream from the Pandeiros Small Hydroelectric Plant dam. In the same cross-section is the streamflow station under the responsibility of the National Water and Sanitation Agency (ANA, for its acronym in Portuguese) called *Usina do Pandeiros Montante* (code 44250000). This sampling point is located in a position that is not affected by the backwater of the Pandeiros SHP reservoir.



**Figure 2.** Location of sampling points.

The sampling point DS1 ( $15^{\circ}30'49.06''$  S;  $44^{\circ}45'15.40''$  W;  $3622.52$  km<sup>2</sup>) is located 1.26 kilometers downstream of the dam, close to the place popularly known as *Cachoeira do Pandeiros*. In sampling point DS1 there is also a streamflow station called *Usina do Pandeiros Jusante* (code 44252000), under the responsibility of the Minas Gerais Water Management Institute (IGAM, for its acronym in Portuguese).

Finally, sampling point DS2 ( $15^{\circ}35'06.86''$  S;  $44^{\circ}42'58.32''$  W;  $3776.95$  km<sup>2</sup>) was installed approximately 18.3 kilometers downstream of the dam, close to a crossing between the communities of *Campos* and *Casa Armada*. There are no structures from government agencies installed in this sampling point.



**Figure 3.** Monitoring structures installed on the monitored cross-sections: a) US1; b) DS1; and c) DS2.

The DS2 sampling point was chosen because of its proximity to the area known as "*Pantanal Mineiro*". The "*Pantanal Mineiro*" corresponds to a flooded area that varies from approximately 30 km<sup>2</sup> (dry) to 50 km<sup>2</sup> (rainy) and is of great importance for the reproduction and development of the ichthyofauna of the São Francisco River (Nunes et al., 2009).

### Data analysis

For data analysis and presentation, descriptive statistics were used (minimum, maximum, mean, standard deviation and coefficient of variation (CV)). The data was also subjected to non-parametric tests to compare periods (dry and rainy) and sampling points. Non-parametric tests were applied since the data did not show normality when subjected to the Shapiro-Wilk test (Royston, 1995; Shapiro & Wilk, 1965).

The Mann-Whitney test (Hollander & Wolfe, 1973) was used to compare periods. The Kruskal-Wallis test (Hollander & Wolfe, 1973) was used to compare sampling points. Once a significant difference was found using the Kruskal-Wallis test, the Dunn test was applied, with the p-value adjusted using the Bonferroni method to identify which groups differed. All tests were applied at a significance level of 5% and run on the RStudio software ("*stats*" package).

## Model fitting

Models were fitted to determine the suspended solids discharge from flow rate data (suspended sediment rating curve) and to estimate the suspended solids concentration using flow and turbidity data.

The suspended solids discharge ( $Q_{ss}$ ) was determined by the product between the suspended solids concentration (SS), given in mg/L, and the flow (Q), given in m<sup>3</sup>/s, as described by Carvalho (2008) (Equation 1). The conversion factor 0.0864 was used to convert the unit of suspended solids discharge to Mg/d.

$$Q_{ss} = 0.0864 \times Q \times SS \quad (2)$$

The suspended sediment rating curves, which relate the flow rate to the suspended solids discharge, were fitted using a power function (Equation 2). In the model presented, "a" and "b" are fitting constants.

$$Q_{ss} = a \times Q^b \quad (3)$$

Discrepant data was excluded during the adjustment process to improve the coefficient of determination. To facilitate visualization and identification of discrepant values, the data were plotted using the logarithmic scale on both axes, as recommended by Carvalho (2008).

In addition to the curves relating flow and suspended solids discharge, a curve was fitted in terms of specific yield, relating the specific yield, given in L/(s km<sup>2</sup>), and the specific suspended solids yield (SSY), given in kg/(d km<sup>2</sup>). Data from the three sampling points were used to fit the curve that relates specific yield and specific suspended solids yield.

Two criteria were adopted to assess the quality of the curve fit and the need to generate more than one curve, as proposed by Lima et al. (2006) and observed in other studies. The criteria adopted were: a coefficient of determination value of at least 0.6 (Andrade, 2013; Bellinaso et al., 2007; Lima et al., 2006; Melo et al., 2020; Poletto, 2007); and visual analysis of the curve generated around the measured points (Lima et al., 2006; Menezes et al., 2021; Poletto, 2007).

To estimate the suspended solids concentration, three models were considered: linear, power and exponential models. The models related the flow and turbidity variables (independent) with the suspended solids concentration (dependent). To compare the fitted

models, the following were used: the coefficient of determination and the mean absolute error (MAE) as described by Moriasi et al. (2015).

## RESULTS AND DISCUSSIONS

### Sediment transport characterization

The results of the Shapiro-Wilk test indicated that none of the variables had a normal distribution ( $p < 0.05$ ). Therefore, non-parametric tests were used to compare different sampling points and periods (dry and rainy). The descriptive statistics of the measured variables are shown in Table 2.

**Table 2.** Descriptive statistics for suspended solids (SS), flow rate (Q), suspended solids discharge (Q<sub>ss</sub>) and specific suspended solids yield (SSY) variables.

		<b>SS</b> <b>(mg/L)</b>	<b>Q</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q<sub>ss</sub></b> <b>(Mg/d)</b>	<b>SSY</b> <b>(kg/d km<sup>2</sup>)</b>
<b>US1</b>	<b>Minimum</b>	3.5	5.2	2.0	0.6
	<b>Maximum</b>	190.0	22.6	316.6	98.1
	<b>Mean</b>	39.6	10.5	54.2	16.8
	<b>Standard deviation</b>	50.7	5.8	89.4	27.7
	<b>CV (%)</b>	127.9	55.2	164.9	164.9
	<b>Mean (Dry)</b>	8.8	6.5	5.1	1.6
	<b>Mean (Rainy)</b>	56.4	12.7	81.0	25.1
<b>DS1</b>	<b>Minimum</b>	3.0	5.5	1.9	0.5
	<b>Maximum</b>	169.0	35.0	460.5	127.1
	<b>Mean</b>	48.7	13.1	91.4	25.2
	<b>Standard deviation</b>	57.5	8.8	147.0	40.6
	<b>CV (%)</b>	118.1	66.8	160.9	160.9
	<b>Mean (Dry)</b>	8.5	7.3	5.6	1.5
	<b>Mean (Rainy)</b>	68.7	16.0	134.3	37.1
<b>DS2</b>	<b>Minimum</b>	6.6	5.3	3.7	1.0
	<b>Maximum</b>	504.3	28.0	765.5	202.7
	<b>Mean</b>	75.0	12.4	118.3	31.3
	<b>Standard deviation</b>	121.3	7.3	199.1	52.7
	<b>CV (%)</b>	161.8	58.6	168.3	168.3
	<b>Mean (Dry)</b>	10.5	6.7	5.9	1.6
	<b>Mean (Rainy)</b>	101.8	14.8	165.2	43.7

As shown in Table 2, the suspended solids discharge varied between 1.9 and 765.2 Mg/d between sampling points. The highest value was observed in sampling point DS2, in a collection carried out after precipitation occurrence upstream of the sampling point. Although there are no records of this event using rain gauges, surface runoff was

observed in the field in an ephemeral watercourse (Figure 4) upstream of the monitored sampling point, moments before the collection was carried out.



**Figure 4.** Ephemeral watercourse upstream of sampling point DS2 a) during runoff and b) after the end of runoff.

Precipitation led to the generation of surface runoff and, consequently, the dragging of particles into the watercourse, thus justifying the observed values. Furthermore, the Pandeiros River basin is characterized by a large number of gullies (Lima et al., 2019), which increase sediment input during the rainy season, resulting in higher sediment concentrations. According to Verduyn et al. (2017), changes in precipitation and hydrology can cause variations in the suspended solids transport in rivers, especially on a seasonal scale. These changes can be intensified by alterations in land cover.

As in this study, Peixoto et al. (2020) found higher discharges and concentrations during the rainy season, in a study carried out in the Minas Gerais state, Brazil. The same behavior was observed by Garrido et al. (2018), in a study carried out in the Northeast region of Brazil.

The mean suspended solids concentration during the dry period was less than 10.5 mg/L, considered “Very Low (< 20 mg/L)” according to the classification proposed by Meybeck et al. (2003). Similar behavior was observed by Garrido et al. (2018). According to Amaral et al. (2021), sediment concentration is intrinsically related to seasonality, and rainfall is one of the main factors contributing to sediment availability. According to the authors, low sediment concentrations during the dry season may be related to the state of conservation of riparian zones, which are one of the main sources of sediment during this period.

Regarding specific suspended solids yield, the general mean considering data from the two periods varied between 16.8 and 31.3 kg/(km<sup>2</sup> d), classified as “Low (10 –

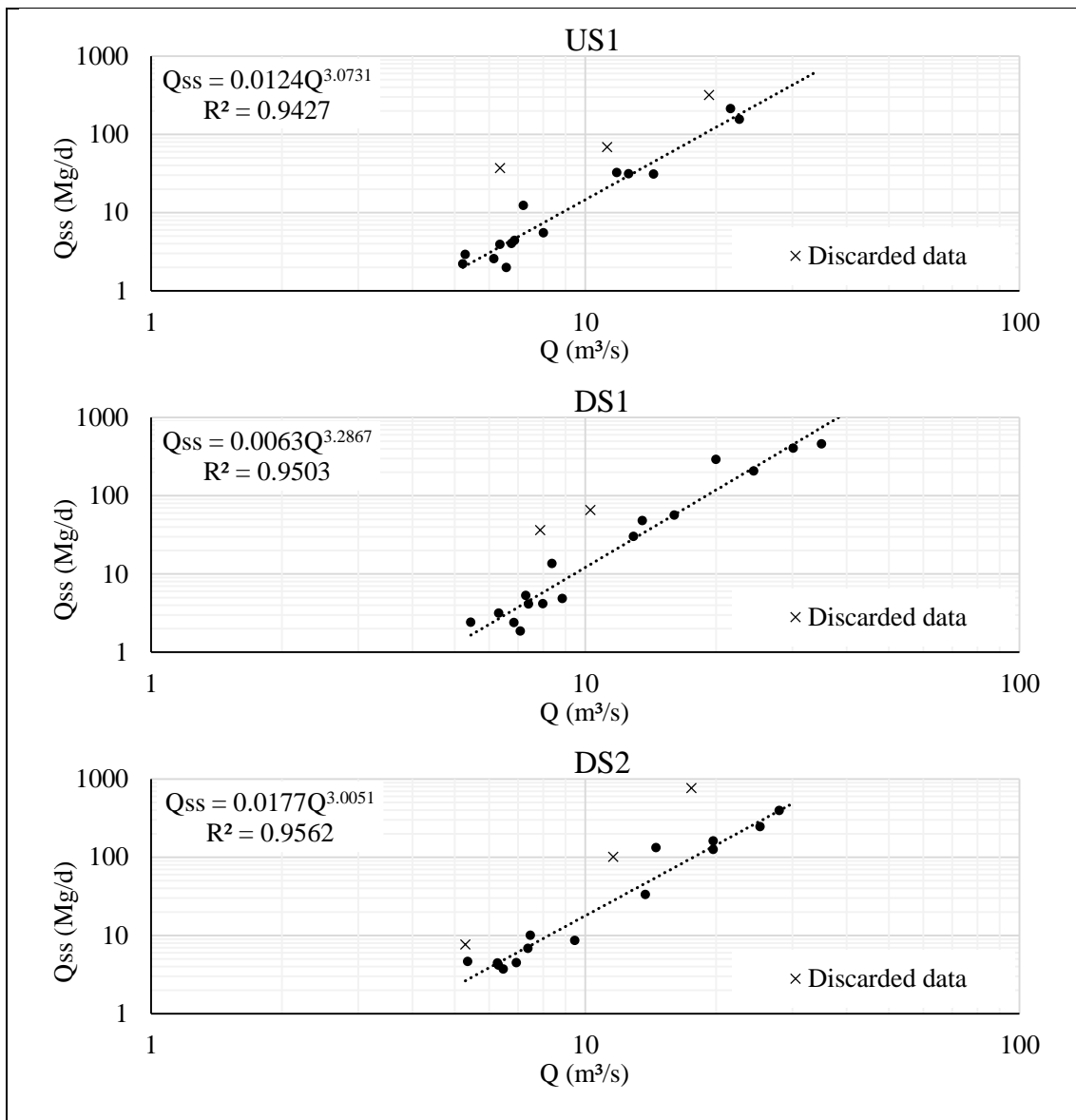
50 kg/(km<sup>2</sup> d))” according to the classification proposed by Meybeck et al. (2003). In all sampling points, the mean specific suspended solids yield for the dry period was considered “Very Low (<10 kg/(km<sup>2</sup> d))” and “Low” for the rainy period. Only in one campaign carried out in sampling point DS2 was the specific suspended solids yield considered “High (200 – 1000 kg/(km<sup>2</sup> d))”. In other sampling points, the highest values observed were classified as “Moderate (50 – 200 kg/(km<sup>2</sup> d))”.

When the Mann-Whitney test was applied, using data from all sampling points together, a significant difference ( $p < 0.05$ ) was observed between the dry and rainy periods for all variables. When applying the test using data from isolated sampling points, no significant difference was observed ( $p > 0.05$ ), except for the flow variable in sampling point DS1. The Kruskal-Wallis test indicated that there was no significant difference between sampling points for all variables analyzed.

As in this study, Vanzela et al. (2012) found no significant difference between the dry and rainy periods when assessing the suspended solids concentration in the same sampling point. However, in one of the basins studied, a difference was observed between the periods when analyzing the total solid yield.

### **Suspended sediment rating curve**

Three suspended sediment rating curves relating flow to suspended solids discharge were fitted (Figure 5), one for each sampling point. A suspended sediment rating curve relating specific yield to specific suspended solids yield was also fitted (Figure 6), using data from all sampling points.



**Figure 5.** Suspended sediment rating curves relating flow ( $Q$ ) and suspended solids discharge ( $Q_{ss}$ ), plotted with axes on a logarithmic scale.

Discrepant data was discarded to improve the coefficient of determination of the sediment rating curves. An example of discrepant data is the data collected on 01/27/2022 in sampling point DS2. This collection was influenced by the contribution of an ephemeral stream (Figure 4), which resulted in a high suspended solids discharge (765.2 Mg/d).

In all sampling points, the coefficients of determination were greater than 0.94, indicating a good fit of the suspended sediment rating curves to the data and meeting the criteria proposed by Lima et al. (2006).

According to Asselman (2000), the coefficients “a” and “b” have no physical meaning, but are believed to be related to factors such as the erosion severity, or the

availability of sediment, the power of the river to erode and transport the available material, and on the extent to which new sediment sources become available in weather conditions that cause high flows.

According to Zhang et al. (2012), the building of dams on the Pearl River in China resulted in a decrease in sediment supply. This has led to an increase in the rating coefficient “a” and a decrease in the rating exponent “b”. According to Lima et al. (2004), the higher value of this constant indicates a rapid response of the suspended sediment discharge in relation to flow variations. According to the authors, for basins with large contributing areas, this constant generally varies between 1 and 3. According to Iadanza & Napolitano (2006), high values of the “b” coefficient indicate rivers in which a small increase in flow results in a large increase in suspended solids discharge.

In the Pandeiros River, the value of the constant “b” varied between 3.00 and 3.28 between sampling points. The observed values in the Pandeiros River are related to the presence of gullies in the basin, which are responsible for producing a large amount of sediment. Thus, small variations in flow lead to substantial variations in suspended solids discharge. Lima et al. (2019) report the existence of at least 215 gullies in the Pandeiros River basin.

Regarding adjustments involving flow and suspended solids discharge, as in this study, several authors adopted the power function in tracing the key curves. Some examples are the studies carried out by Chella et al. (2005), Leli et al. (2011), Melo et al. (2020), Menezes et al. (2021) and Silva et al. (2021). However, other models can be used when the power model does not present a good fit, such as the linear model, which showed better results in the study carried out by Sirqueira et al. (2022).

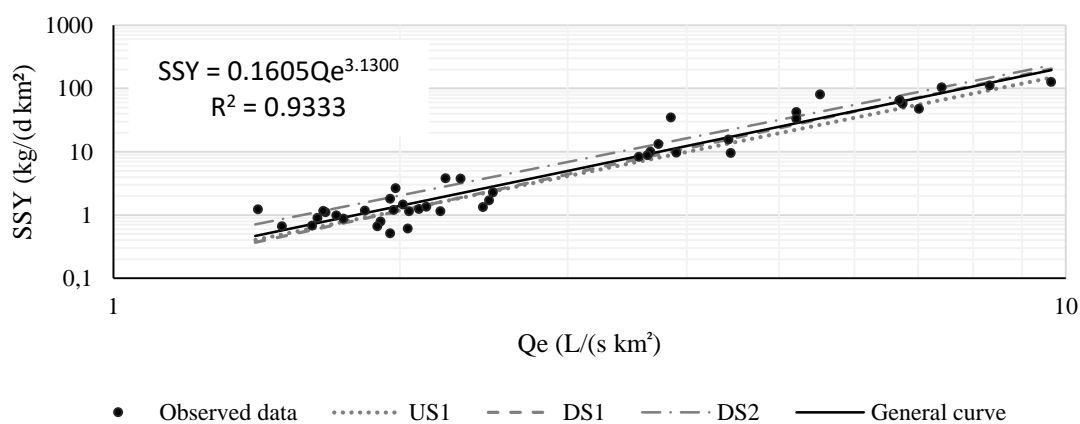
According to Lima et al. (2006), there are cases in which more than one curve is necessary to adequately represent the relationship between flow and suspended solids discharge, and the curves may vary according to the period or flow. Tilahun et al. (2022) emphasize that to obtain estimates of sediment production with low uncertainty, it is necessary to develop curves on appropriate temporal scales. According to Hapsari et al. (2019), data separating between seasons and the increasing sampling frequency may be necessary to improve estimates. However, in some cases, the separation between dry and rainy seasons may not improve the adjustment, as observed by Silva et al. (2021).

In this study, only a single sediment rating curve was fitted for each section, since dividing it into periods or flow ranges would result in curves with a reduced number of

data. In addition, the coefficient of determination values met the established criterion with an  $R^2$  greater than 0.6.

As in this study, Peixoto et al. (2020) adjusted suspended sediment rating curves for 4 cross-sections of the Jordan River, in the southeast of Brazil, and obtained  $R^2$  higher than 0.87. The authors adjusted a single curve per sampling point. In contrast, Garrido et al. (2018) adjusted two curves for a single sampling point, in the Northeast of Brazil, one representing the dry period and the other the rainy period. The  $R^2$  values were 0.81 and 0.90. Melo et al. (2020) adjusted suspended sediment rating curves for 3 stations located on the São Francisco River, Brazil, and obtained  $R^2$  varying between 0.64 and 0.89. In some streamflow stations, the authors adjusted more than one curve for different periods (years). As for the coefficient of determination, the value obtained by Louzada et al. (2022) was 0.80, considered good by the authors.

The coefficient of determination of the general curve, adjusted using specific yield and specific suspended solids yield (Figure 6), was 0.93, indicating a good fit. As in this study, Chella et al. (2005) adjusted a curve relating specific yield and specific suspended solids yield, however, the value of the coefficient of determination obtained by the authors was 0.55, lower than the value recommended by Lima et al. (2006). The authors used data from four sampling points located in the same basin in southern Brazil.



**Figure 6.** Suspended sediment rating curve relating specific yield ( $Q_e$ ) and specific suspended solids yields (SSY), plotted with axes on a logarithmic scale.

Regarding data dispersion, Chella et al. (2005) suggest that dispersal may be associated with factors such as land use, precipitation and erosion control, which vary greatly in time and space. Louzada et al. (2022) also associated factors such as vegetation cover, soil characteristics and terrain slope with variations in sediment concentration.

According to Aleixo et al. (2020), the heterogeneity of watershed and precipitation events may result in very different suspended sediment concentrations for the same flow values. Asselman (2000) suggests that data scatter is related to, among other things, variations in sediment supply, caused by seasonal effects, antecedent conditions in the watershed and differences in sediment availability at the beginning or end of a flood. Vercruyssen et al. (2017) state that hydro-meteorological factors such as rainfall and river discharge are the main agents of sediment transport.

In the Pandeiros River basin, several factors are related to the variability of sediment concentration. The main ones are precipitation (seasonality) and land cover characteristics. In addition to the presence of gullies, already mentioned, anthropogenic activities such as burning, road opening and deforestation alter the characteristics of the land cover and affect the dynamics of sediment transport. These activities were reported in studies carried out by Borges and Costa (2022), Fonseca et al. (2011) and Nunes et al. (2009).

Another factor that may be related to data dispersion is the occurrence of the phenomenon of hysteresis. According to Leli et al. (2011), "hysteresis is the effect in which the same flow values correspond to different suspended sediment concentration values". According to the authors, hysteresis can occur in both the dry and rainy seasons.

### **Models for estimating solids concentration**

Among the three models adjusted to estimate the suspended solids concentration using the flow rate, the power function presented the highest values for the coefficient of determination. Regarding the models that used turbidity to estimate the suspended solids concentration, the highest coefficients of determination were obtained by the linear models. The value of the coefficient of determination and mean absolute error obtained for each of the adjustments can be seen in Table 3.

**Table 3.** Coefficients of determination ( $R^2$ ) and mean absolute error (MAE) of the models fitted to estimate the suspended solids concentration (SS) using the flow (Q) and turbidity (T) variables.

Sampling point	Q x SS			T x SS		
	Lin.	Pot.	Exp.	Lin.	Pot.	Exp.
	$R^2$					
US1	0.8738	<b>0.8807</b>	0.8620	<b>0.8997</b>	0.8960	0.8044
DS1	0.8411	<b>0.9006</b>	0.8158	<b>0.9544</b>	0.8858	0.6875
DS2	0.8851	<b>0.9047</b>	0.8766	<b>0.9611</b>	0.9279	0.8483
All	0.8589	<b>0.8834</b>	0.8284	<b>0.9185</b>	0.8843	0.6930
	$MAE$					
US1	7.62	<b>6.10</b>	7.10	3.43	<b>3.04</b>	8.17
DS1	13.35	<b>16.53</b>	29.90	6.00	<b>4.97</b>	23.41
DS2	11.71	<b>9.90</b>	17.07	7.12	<b>5.99</b>	27.57
All	11.73	<b>11.31</b>	22.07	7.64	<b>5.74</b>	24.80

Legend: Exp. = Exponential; Lin. = Linear; Pow. = Power;

All the adjusted models were significant at a 5% probability. In general, the models that used turbidity to estimate the suspended solids concentration had a higher coefficient of determination when compared to the models that used flow. The exponential model presented the lowest values in both cases.

Although the power models that utilized turbidity to estimate the concentration of suspended solids did not have the highest coefficients of determination, they had the lowest mean absolute errors. However, the difference was no more than two units. According to Singh et al. (2004), the mean absolute error describes the difference between observed and estimated values in the unit of the variable. The authors suggest that values lower than half of the standard deviation of the observed values may be considered low, while values close to zero indicate a perfect fit. For all models fitted in this study, the mean absolute error was lower than the standard deviation of the observed data.

As in this study, Stutter et al. (2017) also obtained higher coefficients of determination in the fit between suspended solids concentration and turbidity when compared to the fit between suspended solids concentration and flow rate and concluded that suspended solids concentration was better related to turbidity. Sirqueira et al. (2022) observed coefficients of determination of up to 0.88 when relating turbidity and suspended solids concentration, while López et al. (2021) observed values varying between 0.53 and 0.58. Ferreira et al. (2023), Gall et al. (2022) and Hoffmann & Oliveira (2018) also observed a positive correlation between turbidity and suspended solids, in contrast, Quinelato et al. (2020) found no correlation between turbidity and suspended solids concentration. Putri & Arisalwadi (2023) found that with an increase in the

suspended solids concentration, there was an increase in turbidity, indicating a directly proportional relationship between the variables.

Several authors have concluded that turbidity can be used to estimate the suspended solids concentration, such as Latuf et al. (2019), Rügner et al. (2013) and Villa et al. (2019). Although turbidity is widely used to estimate suspended solids concentration, factors such as particle size distribution, particulate organic matter concentration (Bright et al., 2020), particle shape and the presence of phytoplankton, can influence the turbidity-suspended solids relationship (Bilotta & Brazier, 2008). Therefore, high turbidity levels may not correspond to high concentrations of suspended solids (Bilotta & Brazier, 2008).

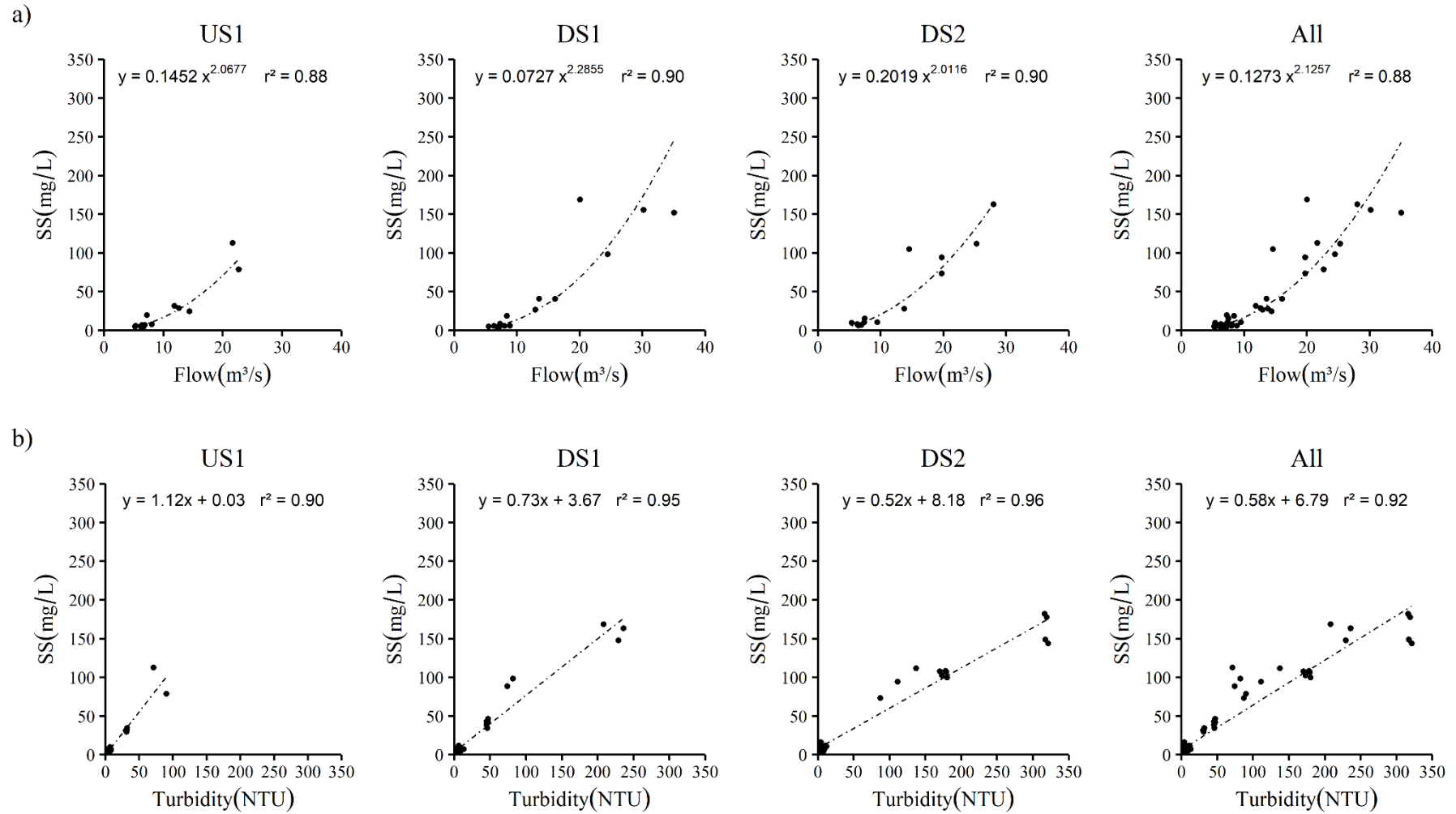
Regarding adjustments involving flow, Leli et al. (2011) state that low values of the coefficient of determination may be due to the phenomenon of hysteresis, in which different suspended solids concentrations can be observed for the same flow rate value. The authors found this phenomenon in a study carried out in the Southern Region of Brazil. Ziegler et al. (2014) also reported the occurrence of hysteresis as one of the factors that affect the relationship between flow and suspended solids.

Most of the models adjusted with the data from a single sampling point had a higher coefficient of determination than the one obtained when fitting the data from all the sampling points. The exceptions were the exponential and linear models using flow rate, adjusted for sampling point DS1, the exponential model adjusted for sampling point DS1 using turbidity, and the linear model adjusted for sampling point US1 using turbidity.

The higher values of the coefficient of determination observed for specific sampling points, as well as the different adjustment coefficients (Figure 7), indicate that the relationship between the variables can change between cross-sections and that adjustment is necessary for the conditions of the location of interest. As in this study, Villa et al. (2019) found that the models adjusted for specific sampling points showed better results than the models adjusted using data from different sampling points together. However, the authors pointed out that in some cases the general models still presented coefficient of determination values close to the values obtained for the models adjusted for the specific sampling points.

Stutter et al. (2017) suggest that the models should be calibrated for specific sampling points since there is variation in the adjustment coefficients between locations. Rügner et al. (2013) stated that turbidity can be used to estimate suspended solids concentration if the correlation between the variables is determined. For Pandeiros River

we consider that in the absence of available data for the location of interest, models adjusted with data from different sampling points can be used to estimate the suspended solids concentration.



**Figure 7.** Models relating a) flow and suspended solids concentration and b) turbidity and suspended solids concentration.

## CONCLUSIONS

The data obtained allowed us to conclude that monitoring suspended solid discharge using the suspended sediment rating curve in the Pandeiros River is viable. Furthermore, the curve relating specific yield and specific suspended solids yield presented a good fit ( $R^2 = 0.93$ ) and can be considered an alternative for estimating suspended solids discharge in cross-sections that do not have sedimentometric data, through the flow monitoring.

It was also evident that both flow rate and turbidity can be used to estimate the suspended solids concentration in the Pandeiros River. However, despite the models that used data from all sampling points presenting a coefficient of determination above 0.88, it is recommended that, to use turbidity and flow to estimate the suspended solids concentration, relationships between the variables should be established for the site of interest, since the relationships may vary from one site to another.

Finally, despite the good quality of the adjustments obtained in this study, it is recommended to continue monitoring and increase the sampling frequency, especially during the rainy season, to capture possible temporal variations in the relationships studied and increase the accuracy and representativeness of the suspended sediment rating curves and adjusted models.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was developed in partnership with Cemig and Aneel's Research and Development Program (P&D GT0611).

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

## REFERENCES

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. (2009) *Medição de descarga líquida em grandes rios*: Manual técnico. Brasília: ANA; SGH.

Aleixo, R., Guerrero, M., Nones, M., & Ruther, N. (2020). Applying ADCPs for Long-Term Monitoring of SSC in Rivers. *Water Resources Research*, 56, 1-23. <https://doi.org/10.1029/2019WR026087>

- Amaral, A. K. N., Rosa, L. E., & Formiga, K. T. M. (2021). Estudo do transporte de sedimentos em suspensão ao longo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte – Go. *Ateliê Geográfico*, 15(2), 94-113. <https://doi.org/10.5216/ag.v15i2.66498>
- American Public Health Association - APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington: APHA, AWWA, WEF.
- Andrade, M. A. (2013). Análise da dinâmica hidrossedimentológica na estação de Porto das Andorinhas no rio São Francisco, Minas Gerais. In *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves: ABRH.
- Asselman, N. E. M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234, (3-4), 228-248. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00253-5)
- Bellinaso, T. B., Dornelles, F., & Goldenfum, J. A. (2007). Avaliação de incertezas na determinação de curvas-chave de sedimentos ajustadas por mínimos quadrados. In *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves: ABRH.
- Bilotta, G. S., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42, 2849-2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>
- Borges, M. G., & Costa, L. R. F. da. (2022). Tipologia de áreas úmidas na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros em Minas Gerais – Brasil. *Caderno de Geografia*, 32(69), 508-522. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2022v32n69p508>
- Brandão, C. J. (Org). (2011). *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA.
- Brasil. (2000, 18 de julho). Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília.
- Bright, C., Mager, S., & Horton, S. (2020). Reesponse of nephelometric turbidity to hydrodynamic particle size of fine suspended sediment. *International Journal of Sediment Research*, 35, 444-454. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.03.006>
- Carvalho, N. de O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- Chella, M., Fernandes, C. V. S., Fermiano, G. A., & Fill, H. D. (2005). Avaliação do Transporte de Sedimentos no Rio Barigüi. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(3), 105-111. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p105-111>

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB. (2018). Apêndice E: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade. In Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, *Qualidade das águas doces no estado de são paulo 2017*. São Paulo: CETESB.

Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba – CODEVASF. (2021). *Codevasf prepara diagnóstico para revitalizar bacia do Rio Pandeiros, em Minas Gerais*. Recuperado em 30 de março de 2021, de <https://www.codevasf.gov.br/noticias/2021/codevasf-prepara-diagnostico-para-revitalizar-bacia-do-rio-pandeiros-em-minas-gerais>

Davies-Colley, R. J., & Smith, D. G. (2001). Turbidity suspended sediment, and water clarity: a review. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1085-1101. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (1979). *Sumula da X reunião técnica de levantamento de solos*. Rio de Janeiro: SNLCS.

Ferreira, W. J., Targa, M. dos S., & Catelani, C. de S. (2023). Temporal evolution of suspended solids in the management of medium-sized watersheds in the Metropolitan Region of Paraíba Valley. *Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 18(3), 1-14. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2945>

Fonseca, D. de S. R., Nascimento, C. R., Miranda, W. de A., & Figueiredo, F. P. de. (2011). Diagnóstico do uso do solo e degradação ambiental na bacia hidrográfica do Pandeiros-MG como subsídio para estudos de impacto ambiental. *Revista Eletrônica Geoaraguaia*, 1(1), 1-20. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/4798>

Gall, M. P., Davies-Colley, R., Milne, J., & Stott, R. (2022). Suspended sediment and faecal contamination in a stormflow plume from the Hutt River in Wellington Harbour, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 56(3), 389-409. <https://doi.org/10.1080/00288330.2022.2088569>

Garrido, J. W. A., De Sousa, T. M. I., Ismael, L. L., Crispim, D. L., Ferreira, P. M. de L., & De Queiroz, M. M. F. (2018). Determination of key curves of discharges of suspended sediment in the hydrographic basin of piacó-piranhas-açu river. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(1), 69-75. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018138711>

- Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. *Journal of Environmental Management*, 173, 41-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.029>
- Hapsari, D., Onishi, T., Imaizumi, F., Noda, K., & Senge, M. (2019). The use of sediment rating curve under its limitations to estimate the suspended load. *Reviews in Agricultural Science*, 7, 88-101. [https://dx.doi.org/10.7831/ras.7.0\\_88](https://dx.doi.org/10.7831/ras.7.0_88)
- Hoffmann, T. O., Baulig, Y., Fischer, H., & Blöthe, J. (2020). Scale breaks of suspended sediment rating in large rivers in Germany induced by organic matter. *Earth Surface Dynamics*, 8, 661-678. <https://doi.org/10.5194/esurf-8-661-2020>
- Hoffmann, T. C. P., & Oliveira, F. A. de. (2018). Influência do uso da terra em áreas rurais e urbanas na produção e transporte de sedimentos em suspensão e turbidez na bacia do rio Capivari, Lapa-PR. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(4), 821-836. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1340>
- Hollander, M., & Wolfe, D. A. (1973). *Nonparametric statistical methods*. New York: John Wiley & Sons.
- Horowitz, A. J., Clarke, R. T., & Merten, G. H. (2015). The effects of sample scheduling and sample numbers on estimates of the annual fluxes of suspended sediment in fluvial systems. *Hydrological Processes*, 29, 531-543. <https://doi.org/10.1002/hyp.10172>
- Iadanza, C., & Napolitano, F. (2006). Sediment transport time series in the Tiber River. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(18), 1212-1227. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.05.005>
- Instituto Estadual de Florestas - IEF. (2013a). APA Pandeiros. Available at: <http://www.ief.mg.gov.br/component/content/article/3306-novacategoria/1769-apa-pandeiros>. Accessed on: December 04, 2023.
- Instituto Estadual de Florestas - IEF. (2013b). Refúgio Estadual da Vida Silvestre do Rio Pandeiros. Available at: <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/3306-nova-categoria/1768-refugio-estadual-da-vida-silvestre-do-rio-pandeiros->. Accessed on: December 04, 2023.
- Jung, B. M., Fernandes, E. H., Möller Jr., O. O., & García-Rodríguez, F. (2020). Estimating suspended sediment concentrations from river discharge data for reconstructing gaps of information of long-term variability studies. *Water*, 12(9), 1-15. <https://doi.org/10.3390/w12092382>

- Junqueira, R., Viola, M. R., Amorim, J. da S., & Mello, C. R. de. (2020). Hydrological response to drought occurrences in a brazilian savanna basin. *Resources*, 9(10), 1-11. <https://doi.org/10.3390/resources9100123>
- Latuf, M. de O., Musselli, D. G., Chinen, H. S. de S., & Carvalho, P. H. S. (2019). Aporte sedimentar em suspensão na bacia do rio Machado, sul de Minas Gerais. *Caderno de Geografia*, 29(1), 16-35. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp16>
- Leli, I. T., Stevaux, J. C., Nóbrega, M. T. da, & Souza Filho, E. E. (2011). Variabilidade temporal no transporte de sedimentos no rio Ivaí - Paraná (1977-2007). *Revista Brasileira de Geociências*, 41(4), 619-628. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414619628>
- Lima, A. C. P. De, Augustin, C. H. R. R., & Oliveira, D. A. De. (2019). Distribuição espacial de voçorocas e sua relação com o relevo em escala de bacia para fins de amostragem: Rio Pandeiros - MG. In Pinheiro, L. S., Gorayeb, A. (org.), *Geografia física e as mudanças globais* (pp. 1-12). Fortaleza: Editora UFC.
- Lima, J. E. F. W., Dos Santos, P. M. C., Carvalho, N. de O., & Silva, E. M. da. (2004). *Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados.
- Lima, J. E. F. W., Lopez, W. T. A., Carvalho, N. de O., Silva, E. M. da V., & Vieira, M. R. (2006). Fluxo de sedimentos em suspensão no exutório de grandes bacias hidrográficas em território brasileiro. In *Anais do VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Recuperado em 4 de outubro de 2021, de [http://www.abrh.org.br/eventos/modelo\\_trabalho\\_viii\\_enes.pdf](http://www.abrh.org.br/eventos/modelo_trabalho_viii_enes.pdf)
- López, N. C., Reguera, F., & Rango, B. J. (2021). Analysis of the suspended solids transport in a stream located in the southwest of the Buenos Aires province, Argentina. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(4), 604-612. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.02.003>
- Louzada, R. S. P., Tavares, A. S., & Uagoda, R. (2022). Monitoramento da vazão e Carga Sólida Suspensa em Eventos Pluviais na Bacia do Ribeirão do Gama/DF. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(3), 1700-1715. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2134>
- MapBiomas Project. (2020). *Collection 8 of the Annual Series of Land Cover and Land Use Maps of Brazil*. Recuperado de [https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection\\_8/lclu/coverage/brasil\\_coverage\\_2020.tif](https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_8/lclu/coverage/brasil_coverage_2020.tif)

- Martins, F. B., Gonzaga, G., Dos Santos, D. F., & Reboita, M. S. (2018). Classificação climática de köppen e de thornthwaite para minas gerais: cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1, 129-156. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>
- Mello, K. de, Taniwaki, R. H., De Paula, F. R., Valente, R. A., Randhir, T. O., Macedo, D. R., Leal, C. G., Rodrigues, C. B., & Hughes, R. M. (2020). Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 270, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110879>
- Melo, S. C. De, Araújo Filho, J. C. De; & Carvalho, R. M. C. M. De O. (2020). Curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão no Baixo São Francisco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(3), 1248-1262. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1248-1262>
- Menezes, D., Marcuzzo, F. F. N., & Pedrollo, M. C. R. (2021). Estimativa da produção de sedimentos utilizando a curva-chave de sedimentos. *Ciência e Natura*, 43(17). <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/2179460X37263>
- Meybeck, M., Laroche, M., Dürr, H. H., & Syvitski, J. P. M. (2003). Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 65-93. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00018-3)
- Minas Gerais. (1995, 02 de setembro). Lei nº 11.901, de 01 de setembro de 1995. Declara de proteção ambiental as áreas de interesse ecológico situadas na bacia hidrográfica do Rio Pandeiros. *Diário do executivo – “Minas Gerais”*. Belo Horizonte: Governador do Estado.
- Minas Gerais. (2004a, 06 de novembro). Decreto 43.910, de 05 de novembro de 2004. Cria o Refúgio Estadual de Vida Silvestre do Rio Pandeiros no Município de Januária. *Diário do executivo – “Minas Gerais”*. Belo Horizonte: Governador do Estado.
- Minas Gerais. (2004b, 28 de abril). Lei nº 15.082, de 27 de abril de 2004. Dispõe sobre rios de preservação permanente e dá outras providências. *Diário do executivo – “Minas Gerais”*. Belo Horizonte.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785. <http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Nunes, Y. R. F., Azevedo, I. F. P., Neves, W. V., Veloso, M. das D. M., Souza, R. de A., & Fernandes, G. W. (2009). Pandeiros: O Pantanal Mineiro. *Mg Biota*, 2(2), 4-17. <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/MB/issue/view/23>

- Oliveira, F. M. (2013). *Relações solo-vegetação em áreas desenvolvidas sobre o arenito Urucuia na APA do Rio Pandeiros* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Recuperado em 7 de março de 2022, de <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/13653>
- Peixoto, R. de A. O., Pereira, C. E., Salla, M. R., Filho, J. E. A., & Nishimura, A. (2020). Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 25(6), 921-931. <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020180137>
- Poletto, K. W. G. (2007). *Curva chave para o monitoramento automático de sedimentos na bacia do rio São Francisco Falso – PR* (Dissertação de mestrado). Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascável. <https://tede.unioeste.br/handle/tede/2688>
- Putri, A. I., & Arisalwadi, M. (2023). Analysis of the influence between turbidity value on total suspended solid (TSS) value at the river water surface in Kutai Kartanegara. *Frontier Advances in Applied Science and Engineering*, 1(1), 14-20. <https://jurnal.tintaemas.id/index.php/faase/article/view/129/105>
- Quinelato, R. V., Farias, E. da S., Brito, J. M. S. de, Virgens, W. A., & Pires, L. C. (2020). Análise espaço temporal da qualidade da água dos rios Peruípe, Itanhaém e Jucuruçu, Bahia. *Scientia Plena*, 16(7), 1-12. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.071701>
- Royston, P. (1995). Remark AS R94: A remark on Algorithm AS 181: The W-test for normality. *Applied Statistics*, 44, 547–551. <https://doi.org/10.2307/2986146>
- Rügner, H., Schwientek, M., Beckingham, B., Kuch, B., & Grathwohl, P. (2013). Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. *Environmental Earth Sciences*, 69, 373-380. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2307-1>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- Silva, M. S. da, Cavalcante, R. L., Filho, P. W. M. S., Silva Júnior, R. O. da, Pontes, P. R., Dallagnol, R., & Rocha, E. J. P. da. (2021). Comparison of sediment rating curves and sediment yield in subbasins of the Itacaiúnas River Watershed, Eastern Amazon. *Brazilian Journal of Water Resources*, 26(18), 1-20. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.2621202100009>

- Singh, H. J., Knapp, V., & Demissie, M. (2004). Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey. <https://hdl.handle.net/2142/94220>
- Sirqueira, E. S., Almeida, F. T. de, Araújo, H. B., Zolin, C. A., Carvalho, R. S., Paulista, R. S. D., Silva, A. F. da, & Borella, D. R. (2022). Vazão líquida, sedimentos em suspensão e turbidez na microbacia do rio Caiabi, no ecótono Cerrado-Amazônia. *Nativa*, 10(4), 252-532. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i4.13961>
- Stutter, M., Dawson, J. J. C., Glendell, M., Napier, F., Potts, J. M., Sample, J., Vinten, A., & Watson, H. (2017). Evaluating the use of in-situ turbidity measurements to quantify fluvial sediment and phosphorus concentrations and fluxes in agricultural streams. *Science of The Total Environment*, 607-608, 391-402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.013>
- Su, W., Ahern, J. F., & Chang, C. (2016). Why should we pay attention to “inconsistent” land uses? A viewpoint on water quality. *Landscape and Ecological Engineering*, 12, 247-254. <https://doi.org/10.1007/s11355-016-0293-7>
- Sultana, Q. (2020). Analysis of uncertainty of sediment rating curve parameters. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(6), 3646-3657. [https://www.researchgate.net/profile/Qamar-Sultana/publication/349109667\\_Analysis\\_of\\_Uncertainty\\_of\\_Sediment\\_Rating\\_Curve\\_Parameters/links/602fdbf1a6fdcc37a8382722/Analysis-of-Uncertainty-of-Sediment-Rating-Curve-Parameters.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Qamar-Sultana/publication/349109667_Analysis_of_Uncertainty_of_Sediment_Rating_Curve_Parameters/links/602fdbf1a6fdcc37a8382722/Analysis-of-Uncertainty-of-Sediment-Rating-Curve-Parameters.pdf)
- Syvitski, J. P., Morehead, M. D., Bahr, D. B., & Mulder, T. (2000). Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. *Water Resources Research*, 36(99), 2747-2760. <https://doi.org/10.1029/2000WR900133>
- Tilahun, A. K., Verstraeten, G., Chen, M., Gulie, G., Belayneh, L., & Endale, T. (2022). Temporal and spatial variability of suspended sediment rating curves for rivers draining into the Ethiopian Rift Valley. *Land Degradation & Development*, 34(2), 478-492. <https://doi.org/10.1002/ldr.4473>
- Universidade Federal De Viçosa - UFV. (2010) *Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais*. Recuperado em 12 de outubro de 2020, de [http://www.dps.ufv.br/?page\\_id=742](http://www.dps.ufv.br/?page_id=742)
- Vanzela, L. S., De Souza, R. A., Pitaro, F. A. da M., Silva, P. A. F., & Sanches, A. C. (2012). Influência da ocupação do solo e do excedente hídrico sobre a vazão e transporte de sedimentos. *IRRIGA*, 1(1), 181. <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v1n01p181>

- Vercruyssen, K., Grabowski, R. C., & Rickson, R. J. (2017). Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews*, 166, 38-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016>
- Villa, A., Fölster, J., & Kyllmar, K. (2019). Determining suspended solids and total phosphorus from turbidity: comparison of high-frequency sampling with conventional monitoring methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(605), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7775-7>
- Zhang, W., Wei, X., Zheng, J., Zhu, Y., & Zhang, Y. (2012). Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. *Continental Shelf Research*, 38, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.02.017>
- Ziegler, A. D., Benner, S. G., Tantasirin, C., Wood, S. H., Sutherland, R. A., Sidle, R. C., Jachowski, N., Nullet, M. A., Xi, X. L., Snidvongs, A., Giambelluca, T. W., & Fox, J. M. (2014). Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: Hysteresis, variability, and uncertainty. *Journal of Hydrology*, 519(PB), 2020-2039. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.010>

## CAPÍTULO 3

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia do Rio Pandeiros tem grande importância do ponto de vista ambiental e este fato fica nítido ao listar a série de leis que tornam a bacia e algumas áreas do seu interior Espaços Territoriais Especialmente Protegidos. Sendo assim, toda ação realizada na bacia deve ser embasada em estudos, visando a redução de possíveis impactos ambientais. Além disso, deve-se ressaltar que estudos e dados hidrossedimentológicos são escassos no Brasil, ainda mais se tratando do descomissionamento de barragens construídas para a geração de energia elétrica, aumentando a importância deste trabalho.

Os resultados obtidos neste trabalho contribuem para um melhor entendimento da influência do reservatório da PCH Pandeiros sobre o transporte de sedimentos, bem como possibilitam uma melhor compreensão sobre a relação entre as variáveis monitoradas durante o estudo. Sendo assim, espera-se que as informações obtidas possam ser utilizadas como base para novos estudos, como por exemplo, de modelagem hidrossedimentológica, ou ainda, fornecer bases para o planejamento e a realização de novos estudos hidrossedimentológicos que envolvam a coleta de dados em campo.

Por fim, espera-se que os trabalhos apresentados possam contribuir com o desenvolvimento de metodologias para avaliar a influência de reservatórios sobre o transporte de sedimentos, bem como auxiliar na tomada de decisões durante o processo de descomissionamento de barragens. No entanto, deve-se destacar que assim como nos estudos de avaliação de impactos ambientais, o processo de descomissionamento de barragens deve ser multidisciplinar, sendo indispensável a realização de estudos que englobem os meios físico, biótico e socioeconômico para embasar qualquer decisão.