

MODELAGEM DE CENÁRIOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE AIMORÉS

Camila Begmann Goulart ¹ ; Fernando Mainardi Fan ²

ABSTRACT – The generation of electric energy by hydroelectric plants represents a large part of the world energy matrix. In Brazil, about 65% of energy is generated by hydroelectric plants. The construction of dams generates several effects in the watercourse, among them the retention of sediments that were previously carried by the river. These accumulated sediments, among other effects, can lead to silting up of the reservoir and water intakes, decreasing its useful life. Due to these problems, studies are made on sediment management techniques, both to avoid the accumulation of sediments inside the reservoirs, and to recover already lost volumes. These techniques can harm the environment, largely due to the high concentrations that can be released downstream of the reservoir. Therefore, studies are necessary to evaluate the most appropriate techniques for each reservoir, as well as to evaluate the possible effects of their application on the system, in order to optimize the operation of the reservoir and minimize its impacts on the ecosystem. This research aimed to evaluate hydrodynamic modeling and sediment transport scenarios, applying different reservoir level reductions (in order to evaluate flushing and pass-through techniques), transport equations, granulometry and sediment layers, in order to evaluate the influence of these parameters on the modeling results. For this, the Aimorés hydroelectric plant case study was used, using the Delft3D-FLOW model, with two-dimensional modeling. The results show that the uncertainties in the parameterization overcome the uncertainties between the techniques (different lowering), presenting great variations when the use of different transport equations is evaluated.

Palavras-Chave – gestão de sedimentos; reservatórios; *flushing*.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, camilabgoulart@gmail.com, (51) 3308-7511

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, fernando.fan@ufrgs.br, (51) 3308-7511

1 - INTRODUÇÃO

O efeito de uma barragem sobre o escoamento afluente é o de reduzir a sua velocidade, depositando sedimentos a montante e causando erosão a jusante. Este efeito depende das características das barragens, em que quanto maior a relação entre o volume útil e a vazão média afluente (tempo de residência), maior o efeito mencionado anteriormente.. Além da erosão, outro efeito preocupante é a falta de nutrientes disponível no curso. Uma vez que muitos nutrientes presentes na água se ligam aos sedimentos, sendo transportados em conjunto ao longo do rio, a retenção desses nutrientes a montante tem um grande impacto no ecossistema a jusante da barragem (Kondolf *et al.*, 2014).

Existem diferentes técnicas para a gestão de sedimentos em reservatórios, que podem tanto evitar que ocorra nova deposição, quanto remover parte dos sedimentos já depositados, sendo as principais: *by-pass*, *pass-through* (*sluicing* e/ou correntes de turbidez), *flushing* e dragagem (Morris e Fan, 1998). Todas essas movimentações geram impactos na operação do reservatório, bem como no curso d'água e no ecossistema que dele depende. Sabe-se que o *flushing* de sedimentos pode levar ao decaimento do número de peixes a jusante do reservatório (Buermann *et al.*, 1995).

Este estudo visa avaliar e comparar diferentes cenários de modelagem de gestão de sedimentos em reservatórios, avaliando a influência dos diferentes parâmetros e de diferentes rebaixamentos de nível d'água, como uma evolução do *pass-through* (*sluicing*) em direção ao *empty flushing*.

2 - ESTUDO DE CASO

Na presente pesquisa, foi utilizado como estudo de caso o empreendimento hidrelétrico de Aimorés, inserido na bacia hidrográfica do rio Doce, localizada nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo (Figura 1). Esta bacia situa-se na região hidrográfica do Atlântico Sudeste, com uma área de drenagem de cerca de 86.700 km².

A usina de Aimorés está localizada entre o médio e baixo rio Doce, na divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Possui um potencial de geração de 330 MW, com 172 MW de energia assegurada em operação. Sua configuração é composta por duas partes, segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2009): uma barragem principal de terra, com 18 m de altura e 565 m de comprimento a partir da margem direita, contígua ao sistema extravasor, que se estende até a margem esquerda, na montanha Pedra Lorena; um circuito de adução, com um canal escavado na margem esquerda de 12 km, com uma casa de força ao final, abrigando três turbinas do tipo Kaplan.

No início deste canal, existe uma barreira física, com cota de soleira de 84 m, a fim de impedir que os sedimentos de fundo entrem no canal. A Figura 2 mostra esta configuração.

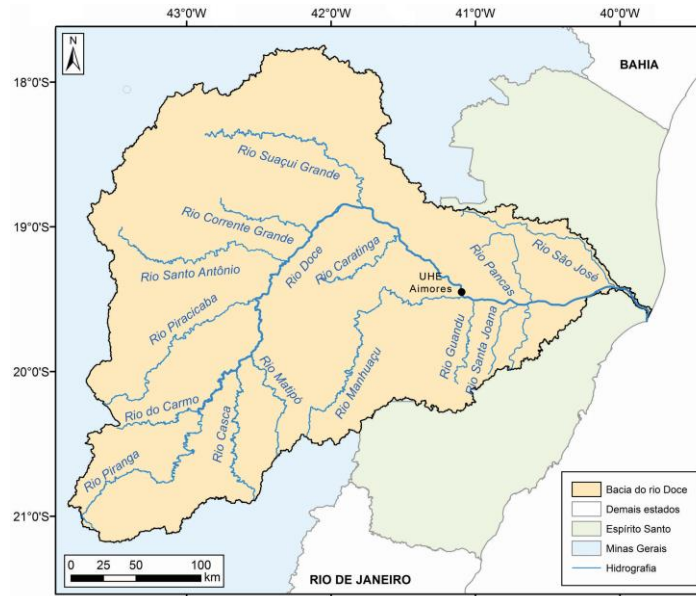


Figura 1 – Localização da área de estudo na bacia do rio Doce.

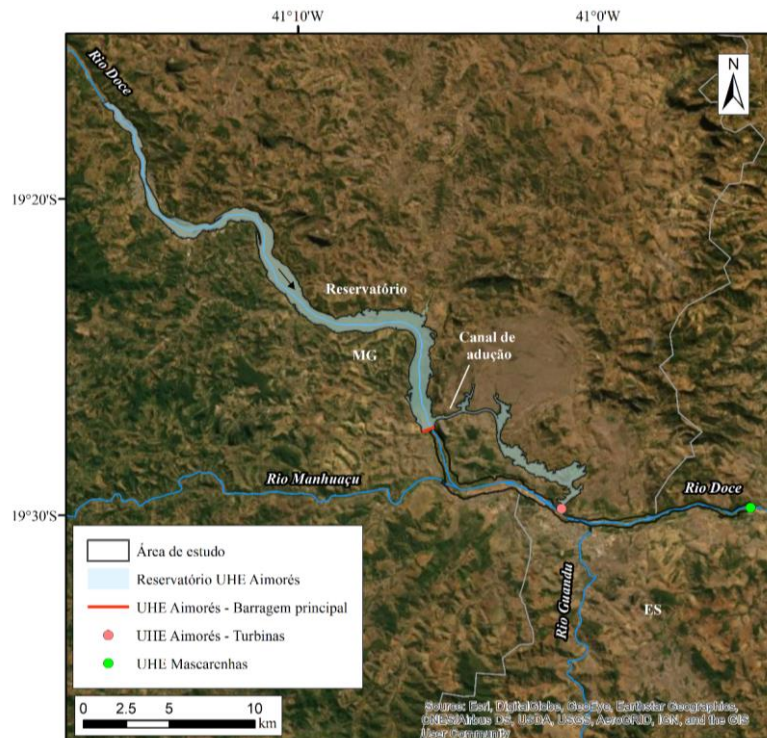


Figura 2 – Configuração do reservatório da UHE Aimorés.

Em 2008, visando recuperar parte de seu volume, foi realizada a operação de *flushing* no reservatório. O rebaixamento (aproximadamente 4 m) ocorreu no período de 25/11/2008 a 06/12/2008, enquanto o *flushing* ocorreu no período de 16/12 a 25/12, cerca de dez dias de espera,

consideradamente elevado para uma hidrelétrica para seu funcionamento. A vazão de pico associada a operação foi $3.749 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Como resultado, ocorreram remoções de até 2 m de altura em bancos existentes ao longo do reservatório.

Ainda, em 2015 houve o rompimento da barragem de mineração em Mariana (MG), a montante, que alterou as condições de transporte de sedimentos na bacia, na medida que o rompimento produziu 40 milhões de m^3 de sedimentos que foram liberados para jusante, onde parte deste volume foi transportado até a UHE de Aimorés. O reservatório foi concebido para ser a fio d'água, com potencial pequeno no efeito para montante ou jusante. No entanto, as condições mostraram transformações nos últimos anos, com sedimentação no trecho de montante e consequente risco de inundações.

3 - METODOLOGIA

Foi utilizado o modelo Delft3D-FLOW, bidimensional, em que primeiramente foi desenvolvido o modelo hidrodinâmico, ajustando-se depois o modelo de sedimentos. O período simulado foi de 5 meses, de 01 de setembro de 2008 a 31 de janeiro de 2009, sendo o período da operação de 25 de novembro (início do rebaixamento) a 25 de dezembro de 2008 (final do *flushing* e início do enchimento do reservatório).

3.1 - Modelo hidrodinâmico

Para o modelo hidrodinâmico, foi construída uma grade numérica curvilínea regular, de resolução média de 150 m, com 3454 células. Foi utilizada uma batimetria do reservatório de junho de 2015 (ANA, 2019) como condição inicial. Para os testes de sensibilidade do modelo, foram realizadas análises com os parâmetros numéricos e físicos. Analisou-se a influência do vento, com dados da estação de Aimorés do INMET, que não se mostrou significativa. Como o reservatório é a fio d'água, com profundidade média de 5 m e tempo de residência inferior a 40 dias, desconsiderou-se a influência da temperatura e de uma possível estratificação térmica. As condições iniciais, parâmetros físicos e numéricos utilizados foram os apresentados na Tabela 1. Foram utilizados dados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) do período de simulação, de vazão e nível, para as condições de contorno do modelo.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados ao final da análise de sensibilidade.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Condição inicial: nível (m)	90	Aceleração da gravidade (m.s ⁻²)	9,81
Passo de tempo (s)	30	Coefficiente de rugosidade de Manning	0,035
Massa específica da água (kg.m ³)	1.000	Viscosidade turbulenta (m ² .s ⁻¹)	1,0

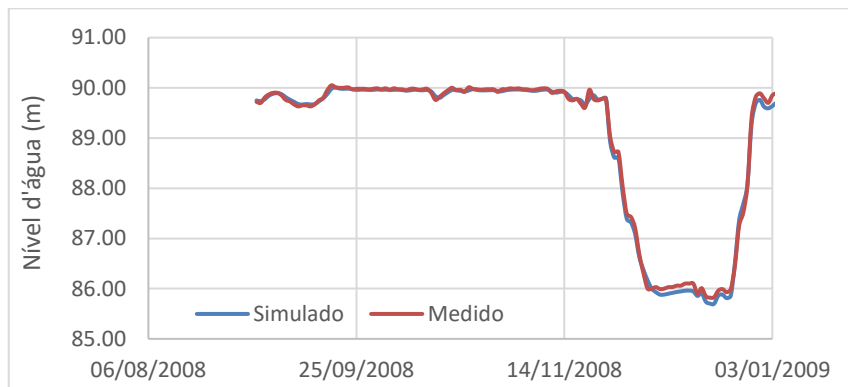


Figura 3 – Ajuste dos níveis no modelo hidrodinâmico.

3.2 - Modelo de sedimentos

Para a modelagem dos sedimentos, não foram encontrados dados detalhados que permitam uma validação das operações de *flushing* ou *pass-through* do reservatório. Sendo assim, a presente pesquisa trabalhou com a elaboração de cenários, assumindo limites aceitáveis dos parâmetros do modelo. Os dados de concentração de sedimentos utilizados como condições de contorno do modelo foram obtidos de Fagundes *et al.* (2019), que calibrou o modelo MGB-SED para a bacia do rio Doce. As tensões limites utilizadas são apresentadas na Tabela 2. Foram simulados 7 cenários, com variações na equação de transporte de leito utilizada, na camada inicial de sedimentos disponível no leito, na granulometria do material e no rebaixamento do nível d'água. Um resumo destes cenários é apresentado na Tabela 3. Os dados disponíveis para o caso, de 2008, foram usados para definir o cenário mais parecido com o que já foi observado no local, e assim escolher o cenário de referência (cenário 3) para comparação dentre os testados.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na modelagem de sedimentos.

Parâmetro	Valor
Tensão de cisalhamento de início de movimento	5 N.m ⁻²
Tensão de cisalhamento de início de destacamento	11 N.m ⁻²
Taxa de erosão	0.001 kg.m ² .s ⁻¹

Tabela 3 – Resumo dos cenários simulados.

Cenário	Equação de transporte*	Camada de sedimentos (m)	Granulometria (µm)	Rebaixamento do nível d'água (m)
1	VR	3	125 (A)	1,5
2	VR	1	125 (A)	4,0
3	VR	3	125 (A)	4,0
4	VR	3	125 (A)	5,0
5	VR	3	396 (B)	4,0
6	MPM	3	125 (A)	4,0
7	EH	3	125 (A)	4,0

*VR: Van Rijn (1993); MPM: Meyer-Peter-Muller (1948); EH: Engelund-Hansen (1967).

4 - RESULTADOS OBTIDOS

Ao longo das simulações, o foco da análise foi no interior do reservatório principal, uma vez que o objetivo é liberar parte do volume assoreado neste. A Figura 4 apresenta as seções analisadas e a relação de erosão e deposição espacial no reservatório, para o cenário 3. A Tabela 4 apresenta os diferentes resultados, em termos de erosão e deposição, no interior do reservatório, para as diferentes simulações. A Figura 5 mostra algumas séries de concentração de sedimentos coesivos e de transporte de leito para diferentes seções no reservatório.

Tabela 4 – Resumo dos valores de erosão e deposição obtidos nas simulações.

Erosão e deposição	Cenário						
	1	2	3	4	5	6	7
Deposição máxima (m)	0,84	0,44	1,20	1,36	2,80	1,25	2,04
Erosão máxima (m)	-1,02	-0,74	-1,23	-1,86	-1,66	-1,09	-1,57
Deposição média (m)	0,12	0,15	0,15	0,19	0,21	0,10	0,12
Erosão média (m)	-0,22	-0,29	-0,29	-0,33	-0,38	-0,18	-0,26

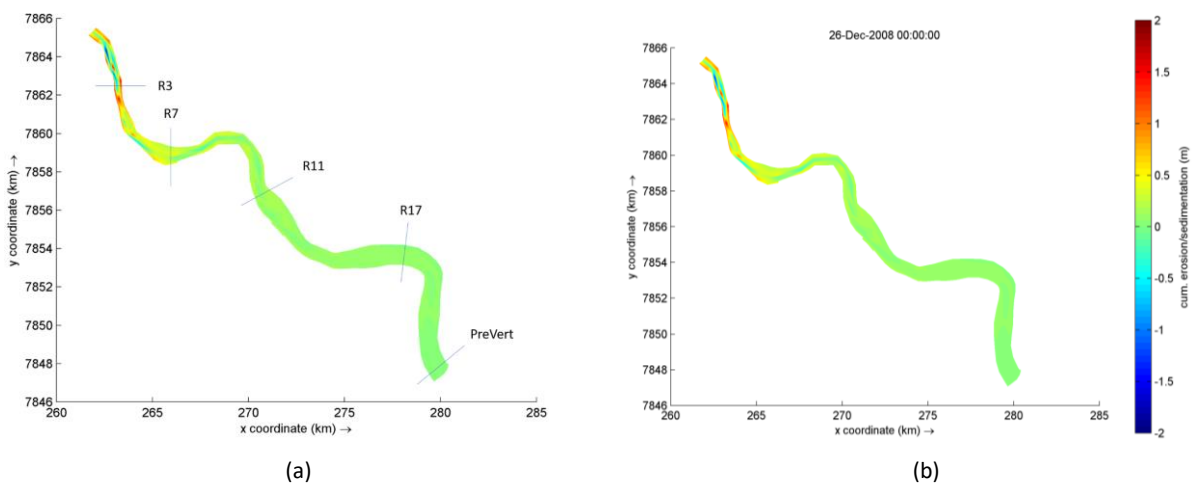
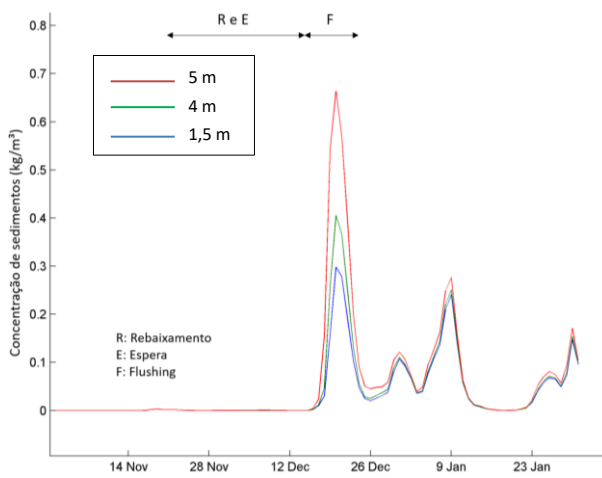
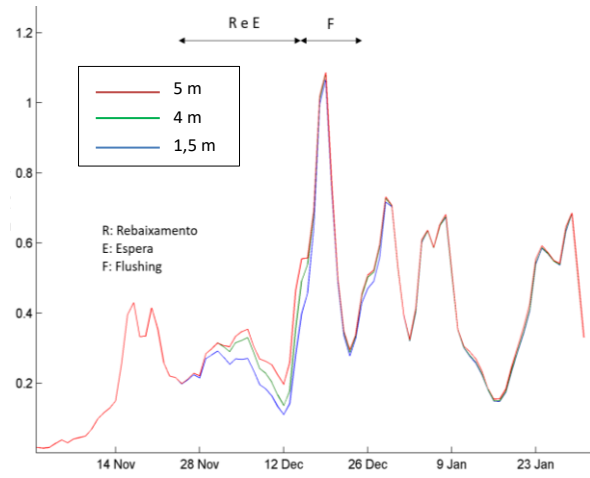


Figura 4 – (a) Seções analisadas no interior do reservatório principal; (b) erosão (azul) e deposição (vermelho) no interior do reservatório no cenário 4.

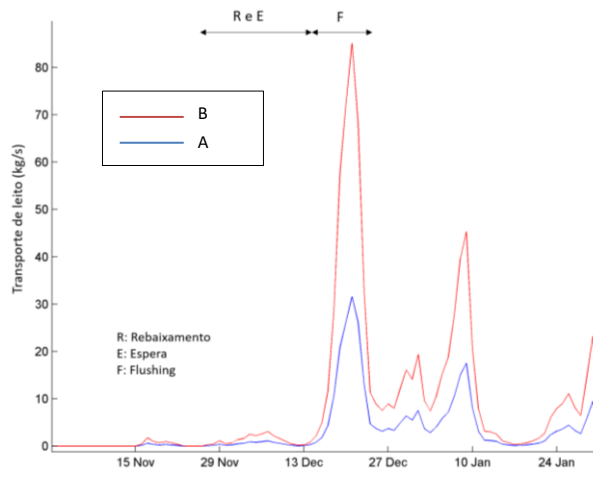
Quanto maior o rebaixamento do reservatório, maiores a erosão e a deposição em seu interior, ampliando a área interna alcançada pela erosão. Quanto ao transporte de leito, a utilização das diferentes equações levou a um acréscimo, chegando a variações de até 370 kg.s^{-1} (EH) nos valores máximos e 43 kg.s^{-1} nos valores médios a montante do reservatório. O rebaixamento do reservatório possui grande influência na concentração de sedimentos coesivos liberada pelo vertedouro. Ao triplicar o rebaixamento, aproximadamente, os resultados de concentração a jusante do barramento mais do que dobram de valor, chegando ao máximo de 664 mg.L^{-1} . Foram avaliadas também as incertezas devido à variação dos parâmetros e à do rebaixamento (Figura 6).



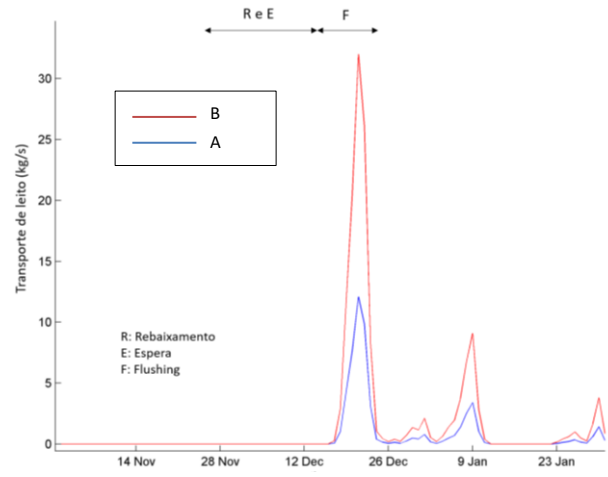
(a) após vertedouro



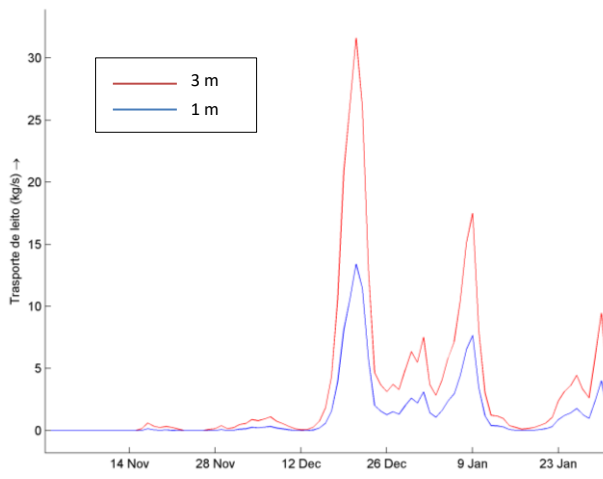
(b) seção R3



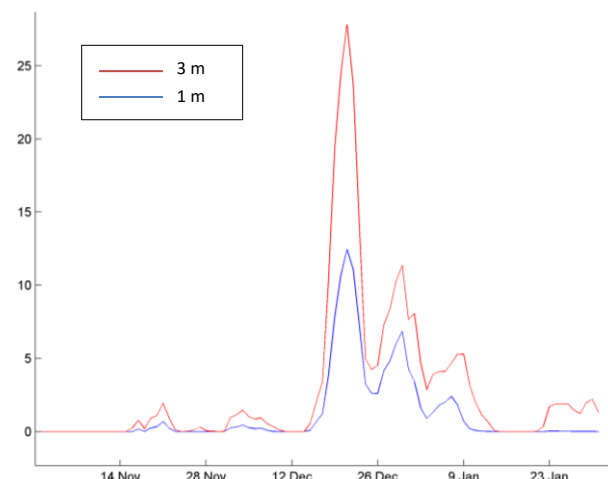
(c) seção R7



(d) seção R11



(e) seção R3



(f) após o vertedouro

Figura 5 – (a) e (b) Concentração de sedimentos coesivos (em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) para os diferentes rebaixamentos; (c) e (d) transporte de leito (em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) para as diferentes granulometrias; (e) e (f) transporte de leito (em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) para as diferentes camadas iniciais.

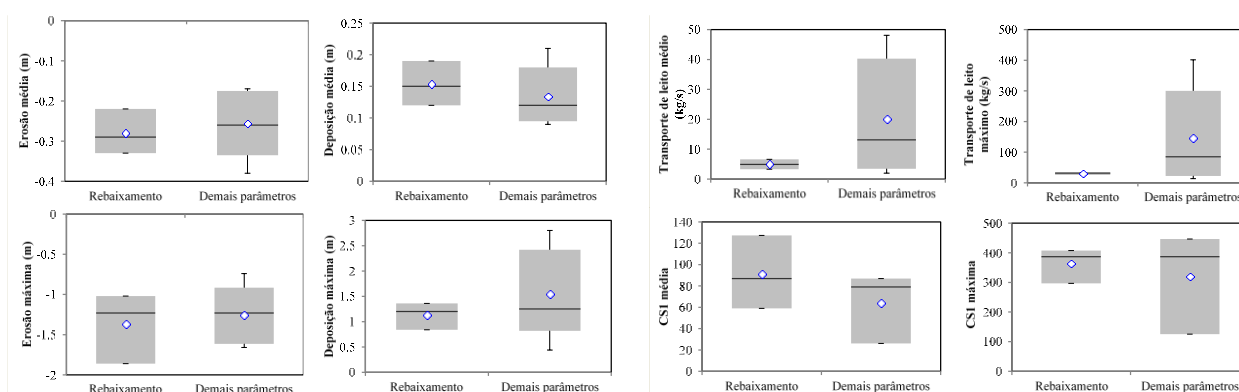


Figura 6 – Incertezas entre os cenários analisados (as concentrações médias são referentes ao dia de maior concentração, 21 de dezembro; o transporte foi avaliado para a seção R3).

5 - CONCLUSÕES

Todos os parâmetros apresentaram grande influência nos resultados conforme sua variação. De maneira geral, as incertezas nos parâmetros superaram as incertezas da variação de rebaixamento (técnicas aplicadas). Estes resultados demonstram que, sem a estimativa correta dos parâmetros, é possível aplicar um rebaixamento maior e, ao final, obter remoções equivalentes a menores rebaixamentos. Em outras palavras, um tomador de decisão pode aplicar um rebaixamento de 5m esperando uma grande remoção de sedimentos do reservatório, mas ao final chegar em uma remoção equivalente a operação prevista para 1m de rebaixamento, porque os dados de entrada não foram bem estimados.

BIBLIOGRAFIA

- KONDOLF, G. M. *et al.* (2014). "Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents." *Earth's Future*, v. 2, n. 5, p. 256–280, maio 2014.
- BUERMANN, Y. *et al.* *Suspended silt concentrations in the lower Olifants River (Mpumalanga) and the impact of silt releases from the Phalaborwa Barrage on water quality and fish survival*. Koedoe, 1995.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. (1998) *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill Book Co.
- ANA. (2019). GeoNetwork. UHE Aimorés - Dados geográficos contendo limites do reservatório, seções de controle, curvas de nível e o modelo digital de elevação do reservatório. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>.
- CBDB. (2009). Comitê Brasileiro de Barragens. "Main brazilian dams III: design, construction and performance". ICOLD Publications, Brasil. 437p.
- FAGUNDES, H. D. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. DE. "Automatic calibration of a large-scale sediment model using suspended sediment concentration, water quality, and remote sensing data". RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 24, p. 1–18, 25 abr. 2019.