



FUNDAÇÃO
renova

**RELATÓRIO DAS FICHAS DOS INDICADORES
INTRACALHA**

Setembro/2024

SUMÁRIO

1. Objetivo	3
2. Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão	3
2.1. Ficha do Indicador	7
3. Indicador de Turbidez	13
3.1. Ficha do Indicador	19
Referências bibliográficas	24

1. Objetivo

O presente documento tem por objetivo apresentar, de forma preliminar, a proposta para os **Indicadores de Concentração de Sedimentos em Suspensão e Turbidez**, do PG23, em atendimento à Nota Técnica 02/2024 e Deliberação CIF 805/24. As informações apresentadas neste documento deverão subsidiar as discussões na reunião gerencial a ser realizada em 13 de setembro de 2024 entre a Fundação, CT-GRSA e GTA-PMQQS.

2. Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão

O presente capítulo é referente à apresentação do **Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão**, o qual apresenta de maneira resumida as informações sobre a base de dados, procedimentos de cálculo e de avaliação dos resultados. A concentração de sedimentos de um rio pode ser analisada por meio da relação entre descarga sólida em suspensão e a descarga líquida (vazão), representando assim o transporte de sedimentos em suspensão nos pontos analisados. Esse indicador tem como objetivo verificar o retorno do transporte de sedimentos do rio às condições pretéritas ao rompimento da barragem de Fundão, por meio da comparação de dados do monitoramento de transporte de sedimentos realizados antes e após o rompimento.

A Descarga Sólida de Sedimentos em Suspensão (Q_{ss}) é obtida pela multiplicação da Concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) pela Vazão do rio (Q). A descarga sólida (e a concentração) se correlaciona com a vazão por uma relação matemática chamada de curva-chave de sedimentos. A curva-chave de sedimentos representa o comportamento esperado de uma dispersão de dados de descarga sólida e vazão, e, por definição, existirão sempre dados medidos com valores acima e abaixo do previsto pela curva-chave de sedimentos. É importante destacar que é intrínseco ao método avaliar a descarga sólida de acordo com sua faixa de vazão, que minimiza a influência de um eventual desbalanceamento da faixa de vazões em que as coletas de campo ocorrerão. A metodologia para se avaliar alteração no transporte de sedimentos desencadeada pelo rompimento é comparar dados de descarga sólida medidos em campo após o rompimento com dados que sejam representativos do transporte de sedimentos do momento anterior ao rompimento.

No caso de estações onde há dados históricos em quantidade suficiente para se traçar uma curva-chave, essas informações serão utilizadas para definição da condição de referência.

No caso de estações sem dados históricos, a referência será determinada por meio da regionalização de dados de transporte de sedimentos. Esse método utiliza dados de monitoramento em outras estações no mesmo rio ou em rios próximos, que tenham características e áreas de drenagem similares para desenvolver uma curva chave de referência. A Tabela 1 apresenta a relação das estações selecionadas, e se a referência foi baseada em dados históricos ou de regionalização.

Considerando que as incertezas do método de regionalização aumentam à medida que as áreas de drenagem diminuem, e sabendo que o transporte de sedimentos de um determinado local de um rio é resultado dos processos que ocorrem em todo o seu trecho de montante, considera-se que a regionalização da curva-chave de sedimentos será realizada para as estações RGN-08 que é representativa dos sedimentos produzidos e transportados pelos trechos T06 ao T09 no rio Gualaxo do Norte, na estação RCA-02 que é representativa do transporte de sedimentos no rio do Carmo (T10) e trechos a montante, e na estação RDO-01 que é representativa do transporte de sedimentos do rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T11).

Adicionalmente, considerando o racional de que o transporte de sedimentos é um processo cumulativo, avalia-se que nas estações de jusante de Candonga que não possuam dados históricos em quantidade suficiente, seus dados sejam regionalizados e avaliados de maneira conjunta com estações próximas. Essa medida busca construir uma base de dados mais ampla e robusta, que inclusive serve para endereçar situações em que foi necessário a descontinuidade da operação e/ou mudança do local de estações, o que já aconteceu em alguns momentos por parte da ANA e da Renova. A análise de maneira conjunta é aplicada no caso de estações próximas que apresentem pouca diferença em relação a área de drenagem, e não tenham nenhum fator que possa levar a um comportamento diferenciado em relação ao transporte de sedimentos (i.e., aporte de um afluente entre as estações, ou existência de uma barragem entre estações). Os grupos de estações foram nomeados com base na estação em que, no momento da elaboração desse documento, apresentavam maior número de coletas de dados de transporte de sedimentos planejados ou executados nos últimos anos pela Fundação Renova, sendo elas: Fazenda Cachoeira D'Antas, RDO-04, RDO-06, RDO-08, RDO-09 e RDO-15. A Tabela 1 a seguir apresentada as estações que foram avaliadas conforme os agrupamentos adotados.

Tabela 1 - Seleção de estações com dados de transporte de sedimentos ao longo do trecho afetados dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, e agrupamentos utilizados.

Rio	Nome adotado para o agrupamento	Estações	Area de Drenagem (km ²)	Disponibilidade de dados		Latitude	Longitude	Município
				Pré	Pós			
Gualaxo do Norte	RGN08 *	Faz. Ocidente (56337000)	530	-	Sim	-20.29	-43.10	Barra Longa - MG
		RGN-08	560	-	Sim	-20.29	-43.07	Barra Longa - MG
Carmo	RCA02 *	RCA-02	5143	-	Sim	-20.29	-43.10	Barra Longa - MG
Doce	RDO01 *	RDO-01	8961	-	Sim	-20.26	-42.90	Rio Doce - MG
		UHE Ris. Neves Mont. (56338000)	8911	-	Sim	-20.26	-42.91	Rio Doce - MG
	Faz. Cach D'Antas (56425000)	Fazenda Cach D'Antas (56425000)	10081	Sim	Sim	-19.99	-42.67	S. José Goiabal-MG
		RDO-03	10032	-	Sim	-20.16	-42.82	S. Domingos do Prata - MG
	RDO04	Cach. Óculos Montante (56539000)	15872	Sim	Sim	-19.78	-42.48	Córrego Novo - MG
		RDO-04	17542	-	Sim	-19.55	-42.52	Bom Jesus do Galho - MG
	RDO06	UHE Baguari Naque Balsa (56831000)	34851	Sim	Sim	-19.24	-42.31	Naque - MG
		RDO-06	35722	-	Sim	-19.15	-42.23	Periquito - MG
	RDO08	Gov. Valadares (56850000)	40560	Sim	Sim	-18.88	-41.95	Gov. Valadares - MG
		RDO-08	40560	-	Sim	-18.88	-41.95	Gov. Valadares - MG
		RDO-07	38490	-	Sim	-18.97	-42.09	Gov. Valadares - MG
		UHE Baguari Jusante (56846200)	38490	Sim	Sim	-18.97	-42.09	Gov. Valadares - MG
	RDO09	Tumiritinga (56920000)	55125	Sim	Sim	-18.97	-41.64	Tumiritinga - MG
		RDO-09	55125	-	Sim	-18.97	-41.64	Tumiritinga - MG
		Conselheiro Pena (56941200)	60019	Sim	Sim	-19.17	-41.46	Conselheiro Pena - MG
		RDO-10	61276	-	Sim	-19.34	-41.25	Resplendor - MG
	RDO15	Resplendor Jus. (56948005)	61276	Sim	Sim	-19.34	-41.25	Resplendor - MG
		RDO-12	74322	-	Sim	-19.50	-40.76	Colatina - ES
UHE Mascarenhas Jus. (56992480)		74079	Sim	Sim	-19.51	-40.86	Colatina - ES	
Colatina (56994500)		76537	Sim	Sim	-19.53	-40.63	Colatina - ES	
RDO-14		77810	-	Sim	-19.51	-40.55	Colatina - ES	
Linhares Cais do Porto (56998200)		82234	-	Sim	-19.42	-40.08	Linhares - ES	
RDO-15	82234	-	Sim	-19.42	-40.08	Linhares - ES		

* Nenhuma estação do agrupamento possui dados pré-rompimento. Referência definição com base em dados de rios próximos e com características similares por meio de técnicas de regionalização. As estações utilizadas foram: RGN-01 (95 km²); Acaiaca Jus. - 56335001 (1371 km²); RCA-01 (1384 km²); Senhora do Porto - 56800000 (1520 km²); PCH Zé Tunin Mont. - 58731300 (1810 km²); Ferros - 56775000 (4090 km²); Porto Firme - 56075000 (4260 km²); PCH Brecha Jus. 1 - 56094000 (4680 km²); PCH Brecha Jus. - 56097000 (4720 km²); Cataguases - 58770000 (5880 km²); Ponte Nova Jus. - 56110005 (6230 km²); e RPG-01 (6230 km²); e Faz. Cach. D'Antas - 56425000 (10081 km²)

Quando se analisa as curvas chaves de sedimentos, é comum de se observar um espalhamento da nuvem de pontos dos dados medidos no entorno da curva. Isso ocorre porque os leitos fluviais podem sofrer alterações naturais ao longo do tempo em função de fatores climatológicos, a exemplo de precipitações intensas e cheias extremas. Essa variação justifica a adoção de uma faixa que compreende e limita essa variação, permitindo assim a análise do que pode ser considerado como uma oscilação natural do rio. Considerando esse fato, para entender se o rio está retornando às condições naturais, o limite dessa faixa corresponde ao intervalo de previsão superior de 95%, sendo adotado que na meta do ICSS deve se obter 95% dos dados medidos em um ano hidrológico dentro desse intervalo, e nenhum dado acima o intervalo da faixa histórica (utiliza-se intervalo de previsão superior de 99.99% como representativo da faixa de abrangência de todos os dados históricos).

A coleta de transporte de sedimentos em suspensão pode carregar erros que são inerentes a esse tipo de procedimento e, conforme reporta a literatura, erros de medição podem chegar a 30% em cada campanha (Sequoia, 2023; Gitto et. al 2017; Snazelle, 2017). Adicionalmente, curvas-chave também possuem incertezas. Valores de coeficiente de correlação (R^2) de 0,6 são considerados como adequados para curvas chave de sedimentos, e de 0,8 para curvas-chave de vazão. A propagação conjunta desses erros denota grandes incertezas na estimativa da carga de sedimentos. Esses erros inerentes reforçam o racional utilizado para a definição da meta como uma faixa de valores, que serão considerados na interpretação dos dados do monitoramento e resultados do indicador, bem como em relação a outros fatores e informações disponíveis.

Considerando o exposto, segue no próximo item a ficha do Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão.

2.1. Ficha do Indicador

Tabela 2 - Ficha do Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão

INDICADOR DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO
Descrição
<p>Após o rompimento da barragem de Fundão, a quantidade de material em suspensão nos rios foi alterada. Para avaliar a tendência de retorno dos cursos d'água atingidos às condições de transporte de sedimentos anteriores ao rompimento, de forma a corroborar que as ações e os objetivos do Plano de Manejo de Rejeitos estão sendo atingidos, foi determinado o acompanhamento de um indicador intracalha para avaliar o transporte de sedimentos em suspensão, sendo nomeado como Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão (ICSS).</p> <p>A relação entre a descarga sólida em suspensão e a descarga líquida (vazão) de um rio é utilizada para representar o comportamento do transporte de sedimentos em suspensão de um curso d'água. Sabendo disso, esses parâmetros são utilizados para realizar o cálculo do indicador ICSS e de sua meta.</p>
Premissas
<ul style="list-style-type: none">■ Para cada local nos rios existe uma relação característica entre vazão sólida e descarga líquida (vazão);■ O rompimento da barragem e a inserção de material fino no sistema fluvial alterou a relação típica do transporte de sedimentos, produzindo concentrações mais elevadas de sedimentos em suspensão. O sistema fluvial busca retornar ao seu estado de equilíbrio (situação similar à do momento anterior ao rompimento), e as concentrações de sedimentos que eram elevadas imediatamente após o rompimento reduzirão até se tornarem equivalentes/similares às observadas antes do rompimento;■ Para representar a caracterização temporal do indicador é utilizado o ano hidrológico, que se inicia no começo do mês de maio e termina no final de abril do ano seguinte;■ Os resultados das campanhas de monitoramento da concentração de sedimentos serão consolidados, consistidos, e os dados serão analisados para a atualização do indicador que deve ser realizada em até 6 (seis) meses após o fim do ano hidrológico.■ A coleta de transporte de sedimentos em suspensão pode carregar erros que são inerentes a esse tipo de procedimento e, conforme reporta a literatura, esses erros de medição podem chegar a 30% em cada campanha (Sequoia, 2023; Gitto et. al 2017; Snazelle, 2017). Adicionalmente, curvas-chave também possuem incertezas e valores de coeficiente de correlação (R^2) de 0,6 são considerados como adequados para curvas-chave de sedimentos, e de 0,8 para curvas-chave de vazão. A propagação conjunta desses erros denota grandes incertezas na estimativa da carga de sedimentos.

-
- As variações naturais do sistema fluvial e os erros inerentes ao monitoramento de transporte de sedimentos reforçam o racional utilizado para a definição da meta como uma faixa de valores, e serão considerados na interpretação dos dados do monitoramento e resultados do indicador, bem como em relação a outros fatores e informações disponíveis.

Fonte de dados

Neste item é descrita a fonte de dados utilizada para definir a situação de referência do momento anterior ao rompimento.

Na Bacia do Rio Doce, são coletados dados de medição de descarga sólida em suspensão e líquida em diversos postos fluviométricos, sob responsabilidade do monitoramento da Agência Nacional das Águas (ANA) e concessionárias de energia. Os dados anteriores ao rompimento que estão disponíveis, são os disponibilizados pela ANA e as estações que podem ter os seus dados utilizados para os cálculos diretos das curvas chaves, são:

- 5642500 – Fazenda Cachoeira D'Antas (1998 a 2015);
- 5653900 – Cachoeira Óculos Montante (1999 a 2015);
- 56831000 – UHE Baguari Naque Balsa (2012 a 2015);
- 56850000 – Governador Valadares (1998 a 2015);
- 56920000 – Tumiritinga (1974 a 2015);
- 56994500 – Colatina (1976 a 2015).

Salienta-se que para os Trechos 6 a 11 (à montante do reservatório de Candonga) não existiam postos fluviométricos com informações de monitoramento de transporte de sedimentos em suspensão antes do rompimento. Dessa forma, para o estabelecimento da curva-chave de referência será utilizada a regionalização de vazão para as estações RGN-08 (representativa do rio Gualaxo do Norte), RCA-02 (representativa do rio do Carmo); RDO-01 (representativa do rio Doce a montante do reservatório de Candonga). Um fator de grande relevância quando se trata de regionalização de dados de transporte de sedimentos é a área de drenagem do local monitorado. Para a regionalização proposta foram selecionadas 13 estações com áreas de drenagem variando de 95 a 10081 km².

Para os dados após o rompimento, serão consideradas as estações onde é possível realizar análise de maneira conjunta conforme os agrupamentos realizados. As estações selecionadas inicialmente estão apresentadas abaixo, mas podem ser adicionadas ou retiradas, visto que as coletas nesses pontos são realizadas por diversos monitoramentos, incluindo PG 23, PMQQS, ANA e outros, que podem sofrer alterações.

- Faz. Ocidente (56337000);
 - RGN-08;
 - RCA-02;
 - RDO-01;
-

-
- UHE Ris. Neves Mont. (56338000);
 - Fazenda Cach D'Antas (56425000);
 - RDO-03;
 - Cach. Óculos Montante (56539000);
 - RDO-04;
 - UHE Baguari Naque Balsa (56831000);
 - RDO-06;
 - Gov. Valadares (56850000);
 - RDO-08;
 - RDO-07;
 - UHE Baguari Jusante (56846200);
 - Tumiritinga (56920000);
 - RDO-09;
 - Conselheiro Pena (56941200);
 - RDO-10;
 - Resplendor Jus. (56948005);
 - RDO-12;
 - UHE Mascarenhas Jus. (56992480);
 - Colatina (56994500);
 - RDO-14;
 - Linhares Cais do Porto (56998200);
 - RDO-15.

Trechos onde se aplica Trechos 6 a 11; Trechos 13 a 16 do Plano de Manejo de Rejeitos.

Tipo **Resultados esperados**

Eficácia

Apresentação da dispersão dos dados de sedimentos em suspensão em relação à curva chave de referência para avaliação do comportamento do transporte de sedimentos ao longo dos anos após o rompimento e verificação da existência de tendência de retorno das condições esperadas para equilíbrio dinâmico natural dos rios de acordo com a meta estabelecida.

Meta

Obter 95% dos dados medidos em cada estação em um ano hidrológico dentro do intervalo de previsão superior de 95%, e nenhum dado acima do intervalo de previsão superior de 99.99%.

Frequência de medição	Data início medição	Data fim medição
Variável em cada estação	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dados históricos: considerar a data de início do monitoramento de cada estação fluviométrica utilizada. ■ Dados atuais: dados coletados a partir de 2017, obtidos pelo PMQQS, monitoramento de transporte de sedimentos do PG-23 (Fundação Renova), além de dados das estações fluviométricas da ANA. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Até o final do período chuvoso de 2026/2027. Após essa data o encerramento do monitoramento será condicionado ao atendimento da meta do indicador, conforme exposto no critério de encerramento.

Fórmula de cálculo

Inicialmente, constrói-se a curva-chave de referência para o transporte de sedimentos dos rios de forma gráfica, através do ajuste de tendência da dispersão de pontos ($x, y = Q, Q_{ss}$). Nas estações que possuem dados pretéritos disponíveis esses são utilizados, e em locais sem dados anteriores ao rompimento a curva-chave de referência é construída por meio da regionalização dos dados de sedimentos disponíveis nas estações localizadas em trechos fluviais que tenham características e áreas de drenagem similares. Essas estações podem ser nos próprios rios e tributários em trechos não afetados ou em rios da região que tem características semelhantes. Para o cálculo da curva-chave regionalizada os dados de Vazão sólida e de Vazão líquida são “adimensionalizados” pela vazão média de longo período (Q_{mlp}) da referida estação (no formato $\frac{Q}{Q_{mlp}}$ e $\frac{Q_{ss}}{Q_{mlp}}$). Os dados “adimensionalizados” das diferentes estações fluviométricas consideradas na regionalização são então regionalizados para a estação em questão com a sua vazão média de longo período.

A curva chave de referência é então traçada de acordo com os dados de referência utilizando uma equação do tipo potência:

$$Q_{ss} = a \cdot Q^b$$

onde “a” e “b” são os coeficientes da equação obtidos graficamente.

Na sequência o limite superior é traçado e os resultados do monitoramento atual são inseridos no gráfico para que seja possível avaliar a dispersão dos dados de concentração de sedimentos em suspensão em relação a curva chave para o local. Tal limite é calculado a partir do intervalo de predição, que leva em consideração a probabilidade de um intervalo conter o valor da variável resposta de um novo dado da população. De uma maneira simplificada pode ser explicado como um intervalo de valores onde se encontra um determinado percentual dos dados utilizados para traçar a curva-chave. A fórmula utilizada para o cálculo do limite, respectiva ao intervalo de predição, possui a seguinte forma:

$$\text{Intervalo} = t \cdot \sigma \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{n}\right) + \left(\log Q - Q_{\mu}^{\frac{2}{\sum(Q-Q_{\mu})^2}}\right)^2}$$

onde “t” representa o valor crítico de predição para distribuição de Student (utiliza-se 95% para o intervalo de 95% e 99,99% como representativo da faixa de abrangência de todos os dados históricos), “ σ ” representa o desvio padrão estimado, “n” representa o espaço amostral, e “ $Q\mu$ ” representa a média das vazões amostradas.

O indicador será atualizado quando os resultados do monitoramento de transporte de sedimentos forem analisados, consolidados e disponibilizados, que deve ocorrer em até 6 (seis) meses a partir do final de cada ano hidrológico (inicia no mês de maio e termina no final de abril do ano seguinte).

Descrição das variáveis de cálculo

- Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)
- Descarga sólida (t/dia)
- Descarga líquida (m³/s)

Critérios de encerramento

Fica estabelecido que o monitoramento e acompanhamento do indicador deve ser mantido até o fim do período chuvoso de 2026/2027.

O critério para encerramento é atingir a meta por três anos hidrológicos consecutivos, e será aplicado de maneira individual para cada estação.

A partir de 2027, as estações que não atingirem a meta nos 3 anos hidrológicos anteriores (2024/2025, 2025/2026 e 2026/2027) continuarão sendo monitoradas e acompanhadas no âmbito do Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão, por mais um ano hidrológico, tendo seus resultados reavaliados para definição sobre o encerramento.

No caso das estações em que a meta for atingida nos 3 anos hidrológicos anteriores (2024/2025, 2025/2026 e 2026/2027) o acompanhamento do indicador será encerrado.

Relação com outros indicadores

O indicador Concentração de Sedimentos em Suspensão é uma resultante das diversas contribuições de sólidos oriundas dos compartimentos intra e extracalha e do transporte de sedimentos pelo rio. Portanto, no contexto extracalha, há indicadores específicos monitorando aspectos e variáveis potenciais contribuintes para a produção e aporte de sedimentos na bacia. Assim, os indicadores extracalha exercem influência sobre a concentração de sedimentos em suspensão.

Ações disparadas caso não atingida a meta

Se os resultados obtidos não atingirem a meta dentro do período proposto no critério de encerramento, as seguintes medidas serão tomadas:

-
- Avaliar o histórico da estação (dados de referência) e possíveis fontes de elevada produção de sedimentos na área de influência da estação.
 - Avaliação de outros indicadores e monitoramentos relacionados.
-

3. Indicador de Turbidez

O presente capítulo é referente à apresentação do **Indicador de Turbidez**, o qual apresenta de maneira resumida informações sobre a base de dados, procedimentos de cálculo e de avaliação dos resultados. A turbidez de um rio pode ser analisada por meio da resistência que a luz encontra ao passar pela água em NTU. Diferentes agentes podem causar a turbidez, como por exemplo matéria orgânica (como efluentes domésticos, de propriedades agrícolas ou industriais, decomposição de folhagens e material lenhoso, algas, microrganismos e entre outros), microbolhas de ar, cinzas de queimadas, e também partículas de sedimento (APHA, 2024; MATOS et. al, 2024; SEHGAL et. al, 2022).

Devido ao fato de ser afetada pelo transporte de material em suspensão, e sendo de amplo conhecimento que a quantidade de material em suspensão transportada é influenciada pelas condições de vazão (tendência padrão de quanto maior a vazão maior a quantidade de sedimentos em suspensão), deve ser considerada a influência da vazão na avaliação de alteração dos padrões de turbidez. Sabendo disso, o Indicador retrata a turbidez do rio por meio da relação com a descarga líquida (vazão).

Em condições específicas, onde se tem predominância de sedimentos em suspensão em relação aos demais agentes causadores de turbidez, esse parâmetro pode ser considerado como uma maneira indireta de medir sedimentos em suspensão. Em condições com baixa presença de sedimentos em suspensão, a turbidez passa a ser mais influenciada pelos demais agentes causadores (Sehgal et. al, 2022, Lenhart et. al, 2010). A implicação prática é que valores baixos de turbidez tendem a não ter boa correlação com a concentração de sedimentos.

No caso dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, devido aos rejeitos liberados no sistema fluvial serem predominantemente compostos por material de granulometria menor que o material natural do leito dos rios (o rejeito é predominantemente do tamanho de silte ou menor, e acredita-se que o leito dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo eram formados em sua maioria por cascalho e areia grossa, e do rio Doce em grande parte formado por areias), houve um grande aumento do transporte de material em suspensão, que implicou no aumento da turbidez. Conforme a quantidade de material fino oriundo do rompimento, que estava inicialmente disponível para erosão e transporte em suspensão, foi sendo reduzida, os níveis de turbidez também reduziram, dificultando a relação desse parâmetro apenas com partículas relacionadas ao rejeito.

A turbidez é medida por equipamentos ópticos chamados turbidímetros, os quais emitem luz através de um volume de controle líquido e detecta a quantidade da luz refletida ou absorvida pelo meio, sendo a medição realizada de maneira quase instantânea, o que se mostraria como uma vantagem frente às medições convencionais de transporte de sedimentos. No entanto, os procedimentos padrões de medição de descarga sólida são mais complexos justamente para considerar o fato de que o transporte de sedimentos não é uniforme ao longo da seção transversal de um rio, sendo encontradas maiores concentrações próximas ao leito e diminuindo as concentrações rumo à superfície, e maiores concentrações nas regiões em que há maior concentração de fluxo. Já a medição de turbidez é feita no exato local em que o sensor do turbidímetro está localizado. Considerando a influência da concentração de sedimentos na turbidez, na prática isso implica que para uma mesma condição, e num mesmo momento, as águas de um rio apresentam diferentes valores de turbidez se medidas na superfície, no fundo ou em diferentes profundidades, e também se for junto a margem direita, esquerda, no centro ou outra posição.

Deve-se ainda destacar o fato de que as informações de turbidez de antes do rompimento são no geral medições pontuais realizadas com frequência mensal ou trimestral (realizados CPRM, IGAM, AGERH-ES e concessionárias de energia), e que no momento após o rompimento existe monitoramento contínuo com múltiplas medições em um mesmo dia realizadas pelo PMQQS (Programa de Monitoramento de Qualidade de Água e Sedimentos) realizado pela Fundação Renova.

Deste modo, garantir a comparabilidade de dados coletados atualmente com dados históricos não é uma tarefa trivial, pois o posicionamento das coletas dos dados históricos não necessariamente é compatível com o posicionamento dos dados coletados após o rompimento, e a frequência da coleta de dados também não é diretamente comparável. Adicionalmente, é comum serem observados picos temporários anômalos no monitoramento contínuo da turbidez, os quais podem ser atribuídos a interferências diretas de detritos nos sensores. Apesar desses desafios, devido à maior praticidade de medição em relação às medições convencionais de descarga sólida e a possibilidade de se obter informações contínuas, o uso da turbidez como um parâmetro complementar, como indicador meio, se mostra interessante, e acredita-se que ele poderia fornecer informações complementares ao indicador de concentração de sedimentos. Ressalta-se que a avaliação de dados de medições pontuais pós-rompimento se mostra redundante frente às informações coletadas de transporte de sedimentos (locais e frequência de

coleta similares) e ao monitoramento contínuo. Deste modo, se optou por avaliar os dados do monitoramento contínuo.

A forma para se avaliar alteração na turbidez desencadeada pelo rompimento é comparar dados de turbidez medidos em campo após o rompimento com dados que sejam representativos do momento anterior ao rompimento, considerando a influência da vazão.

Diferente do monitoramento de transporte de sedimentos, existem dados de turbidez em quase todas as estações fluviométricas ao longo dos rios afetados, sendo a mais a montante com dados antes e após o rompimento a estação Fazenda Ocidente (56337000) localizada no rio Gualaxo do Norte próxima à confluência com o rio do Carmo, e a mais jusante a estação Linhares Cais do Porto (56998200) junto à cidade de Linhares. Uma característica comum observada entre os dados de transporte de sedimentos e turbidez, é que é/foi executado monitoramento em estações próximas de maneira simultânea e que se avalia que eles têm o mesmo comportamento quanto ao transporte de sedimentos e turbidez. Desta maneira, para se construir uma base de dados mais ampla e robusta, foram avaliadas de maneira conjunta estações próximas que possuem pouca diferença em relação a área de drenagem, e não tenham nenhum fator que possa levar a um comportamento diferenciado em relação ao transporte de sedimentos e qualidade de água (i.e., aporte de um afluente entre as estações, ou existência de uma barragem entre estações). A Tabela 3 apresenta a seleção de estações avaliadas e seus agrupamentos.

Para o pareamento das vazões com os dados de turbidez devem ser utilizadas séries de vazões levantadas junto às instituições públicas (base de dados Hidroweb da ANA), sendo previamente avaliadas e consistidas, e tendo suas falhas preenchidas.

Tabela 3 - Seleção de estações com dados de turbidez ao longo do trecho afetados dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, e agrupamentos utilizados.

Rio	Nome adotado para o agrupamento	Estações	Area de Drenagem (km ²)	Disponibilidade de dados		Latitude	Longitude	Município
				Pré	Pós			
Gualaxo do Norte	RGN08	Faz. Ocidente (56337000)	530	Sim	-	-20.29	-43.10	Barra Longa - MG
		RGN08	560	-	Sim	-20.29	-43.07	Barra Longa - MG
Carmo	RCA02	RCA-02M	5143	-	Sim	-20.29	-43.10	Barra Longa - MG
		RD071	5143	Sim	-	-20.29	-43.1	Barra Longa - MG
		Mariana (56335500)	5143	Sim	-	-20.28	-43.03	Mariana - MG
Doce	RDO01	RDO01J	8961	-	Sim	-20.26	-42.90	Rio Doce - MG
		RDO01M	8961	-	Sim	-20.25	-42.91	Sta. Cruz do Escalvado - MG
		RD072	8961	Sim	-	-20.25	-42.91	Santa Cruz do Escalvado - MG
		Urucânia (56338010)	-	Sim	-	-20.27	-42.91	Urucânia - MG
	RDO03	Fazenda Cach D'Antas (56425000)	10081	Sim	-	-19.99	-42.67	S. José Goiabal - MG
		RD019	10032	Sim	-	-20.02	-42.75	S. Domingos do Prata - MG
		RDO-03	10032	-	Sim	-20.02	-42.75	S. Domingos do Prata - MG
	RDO04	Cach. Óculos Montante (56539000)	15872	Sim	-	-19.78	-42.48	Córrego Novo - MG
		RD023	15872	Sim	-	-19.78	-42.48	Córrego Novo - MG
		RDO-04	17542	-	Sim	-19.55	-42.52	Bom Jesus do Galho - MG
	RDO05	Cachoeira Escura (56720000)	24200	Sim	-	-19.33	-42.37	Belo Oriente - MG
		RD023	15872	Sim	-	-19.78	-42.48	Córrego Novo - MG
		Belo Oriente (56719998)	24200	Sim	-	-19.32	-42.38	Belo Oriente - MG
Bugre (56719900)		24200	Sim	-	-19.32	-42.37	Bugre - MG	
RDO-05		-	-	Sim	-19.32	-42.36	Timóteo - MG	

Tabela 3 - Seleção de estações com dados de turbidez ao longo do trecho afetados dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, e agrupamentos utilizados.

Rio	Nome adotado para o agrupamento	Estações	Area de Drenagem (km ²)	Disponibilidade de dados		Latitude	Longitude	Município
				Pré	Pós			
	RDO08	Gov. Valadares (56850000)	40560	Sim	-	-18.88	-41.95	Gov. Valadares - MG
		Gov. Valadares (56850100)	40900	Sim	-	-18.86	-41.83	Gov. Valadares - MG
		Gov. Valadares (56849000)	40300	Sim	-	-18.88	-41.95	Gov. Valadares - MG
		RD044	40560	Sim	-	-18.88	-41.95	Gov. Valadares - MG
		RD045	40560	Sim	-	-18.86	-41.83	Gov. Valadares - MG
		RDO-08	40560	-	Sim	-18.88	-41.95	Gov. Valadares - MG
	RDO12	RDO-12	74322	-	Sim	-19.50	-40.76	Colatina - ES
		Colatina (56994500)	76537	Sim	-	-19.53	-40.63	Colatina - ES
		Colatina Jusante (56994502)	76400	Sim	-	-19.53	-40.63	Colatina - ES
		Colatina Corpo de Bombeiros (56994510)	76400	Sim	-	19.53	-40.62	Colatina - ES
		Colatina Captação Frisa (56994600)	76500	Sim	-	-19.53	-40.66	Colatina - ES
		Barbados (56994700)	77700	Sim	-	-19.51	-40.58	Colatina - ES
		Itapina – Balsa (56991400)	74200	Sim	-	-19.52	-40.81	Colatina - ES

Quando se analisa dados de turbidez em função da vazão é comum se observar um espalhamento da nuvem de pontos dos dados medidos no entorno de uma curva que represente o valor médio esperado (curva de correlação). Isso ocorre tanto devido à variabilidade natural esperada dos rios, alterações naturais ao longo do tempo, em função de fatores climatológicos, a exemplo de precipitações intensas e cheias extremas, e também devido aos procedimentos e local da medição/coleta. Tal fato justifica a adoção de uma faixa que compreenda e delimita essa variação, permitindo assim a análise do que pode ser considerado como uma faixa de valores dentro da oscilação natural do rio. Adicionalmente, deve ser considerado que os dados do monitoramento anteriores ao rompimento são de medições pontuais, tipicamente de amostras de superfície, enquanto o monitoramento do período pós-rompimento é realizado de maneira contínua por sensores a uma elevação fixa (profundidade da medição variável em função no nível do rio). Essa diferença no tipo de dados medidos possivelmente induz a um maior espalhamento dos dados, possivelmente com valores mais elevados por se medir a uma maior profundidade.

3.1. Ficha do Indicador

Tabela 4 - Ficha do Indicador de Turbidez

INDICADOR DE TURBIDEZ
Descrição
<p>Após o rompimento da barragem de Fundão, a quantidade de material em suspensão nos rios foi alterada, o que levou a uma alteração da turbidez das águas. Considerando que a turbidez é parcialmente composta por material em suspensão (a turbidez também é composta por matéria orgânica como algas, microrganismos e efluentes, além de fuligem, microbolhas, etc.), e que sua medição é relativamente fácil e pode ser realizada de maneira contínua, foi determinado que esse parâmetro seja utilizado como um indicador meio, de maneira complementar às avaliações de transporte de sedimentos realizadas no âmbito do indicador finalístico de concentração de sedimentos em suspensão.</p> <p>Considerando que a alteração da turbidez causada pelo rompimento é na verdade uma alteração na concentração de sedimentos em suspensão, e que o transporte de sedimentos é altamente influenciado pelo regime de vazões (tendência padrão de quanto maior a vazão maior a quantidade de sedimentos em suspensão), para o indicador, os dados de turbidez devem ser avaliados considerando a vazão correspondente, e sua tendência de variação em função da vazão.</p>
Premissas
<ul style="list-style-type: none">■ Para cada local nos rios existe uma relação característica entre vazão sólida e descarga líquida, implicando que também existe uma característica própria de relação entre turbidez e descarga líquida;■ O rompimento da barragem de Fundão e a inserção de material fino no sistema fluvial alterou a quantidade de material em suspensão (maior concentração), o que induziu a alteração da turbidez das águas, produzindo valores mais elevados. O sistema fluvial busca retornar ao seu estado de equilíbrio (situação similar à do momento anterior ao rompimento), e os valores de turbidez que eram elevados imediatamente após o rompimento reduzirão até se tornarem equivalentes/similares aos observados antes do rompimento;■ Para representar a caracterização temporal do indicador é utilizado o ano hidrológico, que se inicia no começo do mês de maio e termina no final de abril do ano seguinte;■ Ao final de cada ano hidrológico os resultados do monitoramento contínuo de turbidez serão consolidados, consistidos, calculados valores médios diários, e os dados analisados para a atualização do cálculo do indicador em até 6 (seis) meses após o fim do ano hidrológico;■ O monitoramento do período pós-rompimento é realizado de maneira contínua por sensor a uma elevação fixa (profundidade da medição variável em função no nível do rio),

enquanto os dados do monitoramento antes do rompimento são de medições pontuais, tipicamente de amostras de superfície. É esperado que essa diferença no procedimento de coleta de dados seja responsável por gerar resultados de turbidez mais elevados que os medidos antes do rompimento, seja pelo fato que a turbidez tipicamente aumenta conforme de aumenta a profundidade do local de medição, quanto pelo fato de que o monitoramento contínuo é capaz de medir, em teoria, toda a possível variação natural (espalhamento dos dados ao redor de um valor médio);

- Em situações de baixa turbidez, tipicamente fatores como presença de matéria orgânica, algas e outros agentes causadores de turbidez passam a ter uma maior influência percentual na composição do valor final da turbidez, de modo que a turbidez, usualmente, não é um bom indicador de concentração de sedimentos quando se tem situações de baixas turbidez.

Fonte de dados

Neste item é descrita a fonte de dados utilizada para definir a situação de referência do momento anterior ao rompimento.

Na Bacia do Rio Doce, são coletados dados de medição de turbidez em diversos postos fluviométricos, sob responsabilidade do monitoramento da Agência Nacional das Águas (ANA), IGAM, AGERH-ES e concessionárias de energia. Os dados anteriores ao rompimento que estão disponíveis, são os disponibilizados pela ANA. O IGAM também disponibilizou dados diretamente para Fundação Renova (base de dados disponibilizada no portal do PMQQS).

O critério adotado para seleção das estações com dados pretéritos foi a proximidade com as estações do PMQQS que atualmente monitoram o parâmetro turbidez de maneira contínua. Desta maneira, para se construir uma base de dados mais ampla e robusta, foram avaliadas de maneira conjunta estações próximas que possuem pouca diferença em relação a área de drenagem, e não tenham nenhum fator que possa levar a um comportamento diferenciado em relação ao transporte de sedimentos e qualidade de água (i.e., aporte de um afluente entre as estações, ou existência de uma barragem entre estações).

As estações selecionadas e estações atualmente monitoradas correspondentes são apresentadas na tabela a seguir:

Estação atualmente monitorada	Estações com dados pretéritos
RGN-08	Faz. Ocidente (56337000)
RCA-02M	RD071 (nomenclatura IGAM)
	Mariana (56335500)
RDO01J / RDO01M	RD072 (nomenclatura IGAM)
	Urucânia (56338010)
RDO-03	Fazenda Cach D'Antas (56425000)
	RD019 (nomenclatura IGAM)
RDO-04	Fazenda Cach. Óculos (56539000)
	RD023 (nomenclatura IGAM)
RDO-05	Cachoeira Escura (56720000)
	RD023 (nomenclatura IGAM)
	Belo Oriente (56719998)
	Bugre (56719900)

RDO-08	Gov. Valadares (56850000)
	Gov. Valadares (56850100)
	Gov. Valadares (56849000)
	RD044 (nomenclatura IGAM)
	RD045 (nomenclatura IGAM)
RDO-12	Colatina (56994500)
	Colatina Jusante (56994502)
	Colatina Corpo de Bombeiros (56994510)
	Colatina Captação da Frisa (56994600)
	Barbados (56994700)
	Itapina – Balsa (56991400)

Adicionalmente, considerando que a turbidez está sendo utilizada como método indireto para avaliação de concentração de sedimentos, e é conhecido que em baixas concentrações a correlação entre sedimentos e turbidez é tipicamente mais fraca (nessa situação a presença de matéria orgânica e outros fatores causadores de turbidez têm maior relevância), e considerando as classes de enquadramento dos rios afetados, considera-se que dados de turbidez menores que 100 NTU sejam considerados como dentro da referência histórica.

Trechos onde se aplica Trechos 6 a 11; Trechos 13 a 16 do Plano de Manejo de Rejeitos.

Tipo	Resultados esperados
Eficácia	Comparar a dispersão dos dados de turbidez em relação à faixa de dispersão dos valores de referência (anteriores ao rompimento) e avaliar em conjunto com os resultados do indicador de concentração de sedimentos em suspensão se há tendência de retorno das condições esperadas para equilíbrio dinâmico natural dos rios conforme as metas estipuladas.

Meta

Obter 90% dos dados medidos em cada estação em um ano hidrológico dentro da faixa de dispersão histórica ou menores que 100 NTU.

Frequência de medição	Data início medição	Data fim medição
<ul style="list-style-type: none"> ■ Diário <p>Valor médio diário calculado com base em dados coletados de maneira contínua.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dados históricos: considerar a data de início do monitoramento de cada estação fluviométrica utilizada; ■ Dados atuais: coletados a partir de 2017 nas estações automáticas operadas pelo 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Até o final do período chuvoso de 2026/2027. Após essa data, o final do acompanhamento ocorrerá conforme o exposto no critério de encerramento. ■ O monitoramento de turbidez é realizado pelo

PMQQS que possuem turbidímetros. PMQQS, e mesmo com o fim do indicador, o parâmetro continuará sendo acompanhado pelo PG38, conforme o prazo definido.

Fórmula de cálculo

Com os dados anteriores do rompimento se faz o pareamento com a vazão correspondente. Os dados devem ser plotados em um gráfico de dispersão ($x, y = \text{Vazão}, \text{Turbidez}$) e se define a curva de correlação dos dados (similar ao processo de construção de uma curva-chave). A curva de correlação de referência é então traçada utilizando uma equação do tipo potência:

$$Q_{ss} = a \cdot Q^b$$

onde “ a ” e “ b ” são os coeficientes da equação obtidos graficamente. E então a faixa de valores históricos é traçada.

O limite da faixa é calculado a partir do intervalo de predição, que leva em consideração a probabilidade de um intervalo conter o valor da variável resposta de um novo dado da população. A fórmula utilizada para o cálculo do limite, respectiva ao intervalo de predição, possui a seguinte forma:

$$\text{Intervalo} = t \cdot \sigma \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{n}\right) + \left(\log Q - Q_{\mu}^{\frac{2}{\sum(Q-Q_{\mu})^2}}\right)^2}$$

Onde “ t ” representa o valor crítico de predição para distribuição de *Student* (utiliza-se 99,99% como representativo da faixa de abrangência de todos os dados), “ σ ” representa o desvio padrão estimado, “ n ” representa o espaço amostral, e “ Q_{μ} ” representa a média das vazões amostradas.

Com base nos dados do monitoramento atual realizado de maneira contínua são calculados valores médios diários de turbidez e, na sequência, os resultados do monitoramento atual são inseridos no gráfico para que seja possível avaliar a dispersão dos dados de turbidez em relação a faixa de dispersão histórica para o local.

O indicador será atualizado em até 6 (seis) meses após o fim do ano hidrológico (inicia no mês de maio e termina no final de abril do ano seguinte).

Descrição das variáveis de cálculo

- Turbidez (NTU)
- Vazão ou Descarga líquida (m^3/s)

Critérios de encerramento

Considerando o caráter complementar do Indicador de Turbidez em relação ao Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão (ICSS), o encerramento do Indicador de Turbidez será atrelado ao encerramento do Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão

(ICSS). Em outras palavras, o Indicador de Turbidez será encerrado quando os critérios de encerramento do Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão (ICSS) forem atendidos.

Relação com outros indicadores

O este é um indicador-meio associado à diversas contribuições oriundas dos compartimentos intra e extracalha, como sedimentos e matéria orgânica. Embora não haja uma relação direta entre o transporte de sedimentos e a turbidez, os sedimentos em suspensão compõem parte dos resultados de turbidez e por isso existe uma relação do Indicador de Turbidez com o Indicador de Concentração de Sedimentos em Suspensão.

Ações disparadas caso não atingida a meta

Se os resultados obtidos não atingirem a meta dentro do período proposto no critério de encerramento, as seguintes ações serão analisadas:

- Avaliar o histórico da estação (dados de referência) e possíveis fontes antrópicas que possam estar elevando a turbidez na área de influência da estação.
 - Avaliação de outros indicadores e monitoramentos relacionados.
-

Referências bibliográficas

- APHA - American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (2023). 2130 Turbidity. *In: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 24th ed. Washington DC: APHA Press; 2023.
- GITTO, A. B.; VENDITTI, J. G.; KOSTASCHUK, R.; CHURCH, M. (2017). Representative point-integrated suspended sediment sampling in rivers, *Water Resour. Res.*, Vol 53, 2956–2971, doi:10.1002/2016WR019187.
- GOMES, P. R., PESTANA, I. A., VIANA, P. P., DE ALMEIDA, M. G., DE REZENDE, C. E., & DE SOUZA, C. M. M. (2022). Effects of dams on As and Hg concentrations in three southeastern Brazil fluvial systems: Ocean inputs, sources and seasonal dynamics among environmental compartments. *Science of The Total Environment*, 849, 157865.
- LENHART C. F.; BROOKS, K. N.; HENELEY, D.; MAGNER, J. A. (2010). Spatial and temporal variation in suspended sediment, organic matter, and turbidity in a Minnesota prairie river: implications for TMDLs. *Environ Monit Assess* (2010) 165:435–447 , 2010. DOI10.1007/s10661-009-0957-y
- MATOS, T.; MARTINS, M. S.; HENRIQUES, R.; GONÇALVES, L. M. (2024), A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment concentration. *Journal of Water Process Engineering*. Vol 64. 2024 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105624>
- SEHGAL, D.; MARTÍNEZ-CARRERAS, N.; HISSLER, C.; BENSE, V. F.; & HOITINK, A. J. F. (T) (2022). A generic relation between turbidity, suspended particulate matter concentration, and sediment characteristics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127, e2022JF006838. <https://doi.org/10.1029/2022JF006838>
- SEQUOIA (2023). LISST-ABS. Specifications. Disponível em <https://www.sequoiasci.com/product/lisst-abs/#:~:text=Suspended%20sediment%20concentration%20accuracy%3A%20%2B%2F%2D,75%20%E2%80%93%2090%20micron%20glass%20beads>. Acesso em Julho de 2023.
- SNAZELLE, T. T. (2017). Laboratory Evaluation of the Sequoia Scientific LISST-ABS Acoustic Backscatter Sediment Sensor. U.S. Geological Survey Open-File Report 2017–1154, 21 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20171154>.