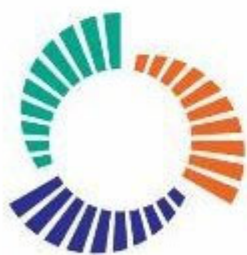




PG-023 – PROGRAMA DE MANEJO DE REJEITOS



FUNDAÇÃO
renova

**Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11
e definição da condição de referência**

PLANO DE TRABALHO

Contrato 4800000368 | OS-13 – Rev02
Janeiro/2021

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	3
3	CONTEXTUALIZAÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1	Habitats físicos.....	5
3.2	Mapeamento sistemático do canal fluvial.....	6
3.3	Parâmetros complementares	8
4	HIPÓTESES SOBRE O COMPORTAMENTO DA RECUPERAÇÃO DOS RIOS	8
5	ESCOPO E ABRANGÊNCIA DO ESTUDO.....	10
5.1	Atividade 1 – Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2019	10
5.2	Atividade 2 – Definição da condição de referência	10
5.3	Atividade 3 – Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2021	14
5.4	Atividade 4 – Análise integrada da evolução do processo de formação e recuperação de habitats físicos.....	14
6	PRODUTOS ENTREGÁVEIS	15
7	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....	15
8	PREMISSAS E CONDICIONANTES.....	17
9	PANDEMIA DEVIDO AO COVID-19	17
10	REFERÊNCIAS	19

1 INTRODUÇÃO

A NHC tem prestado serviços de consultoria técnica especializada para a Fundação Renova em obras de recuperação de rios, restauração de habitats e programas de manejo de rejeitos. Como parte do escopo do trabalho, a NHC propôs estudos para mapeamento de habitats físicos para auxiliar o Programa de Manejo de Rejeitos na avaliação da recuperação dos impactos nos habitats físicos causados pelo rompimento da barragem de Fundão de Fundão, Mariana (MG), nos trechos impactados do Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e do Rio Doce a montante do reservatório de Candonga.

A características do leito do rio e das suas margens determinam o fluxo de entrada de sedimentos na coluna d'água, bem como a estrutura física do rio criando espaço e condições hidráulicas (habitats físicos) para desenvolvimento dos organismos. Deste modo, a recuperação das características físicas do leito é um componente-chave na recuperação da qualidade da água e da ecologia de um rio.

Essas características foram alteradas pela grande inserção de sedimentos finos no curso d'água causadas pela onda de rejeitos oriunda do rompimento. Em geral, aportes de sedimentos com granulometria de frações finas e grossas, como a onda de rejeitos, podem ter impactos profundos nos corpos d'água por ela afetados. Entre os muitos possíveis impactos advindos do excesso do aporte de sedimentos em um rio, podemos citar, por exemplo, a reconfiguração da geometria do leito, o preenchimento das várzeas (Lisle & Hilton, 1992; Buffington & Montgomery, 1999a; Lisle & Hilton, 1999; Sable & Wohl, 2006; Zunka e colaboradores 2015), o desencadeamento de processos erosivos das margens e migração acelerada da lateral do canal (Knighton 1989, 1991; Bartley & Rutherford, 2005), alteração da textura (granulometria predominante) do material do leito (Paola & Seal, 1995; Buffington & Montgomery, 1999b; Church, 2006), e a influência na concentração de sedimentos em suspensão, turbidez e transmissão de luz através da coluna d'água.

Esses impactos primários têm potenciais efeitos secundários no ecossistema aquático. Alterações na estrutura do leito do canal impactam na disponibilidade de habitats, provocando mudanças na textura do leito¹ e, por consequência, alteram o fluxo hiporreico², promovem alterações no comportamento e no sucesso da desova de peixes, dentre outros. As alterações na concentração de sedimentos em suspensão podem afetar a capacidade dos organismos de se alimentarem e respirarem, e a mudança na

¹ O termo textura do leito se refere a granulometria do material existente na camada superior do leito em contato com o meio aquoso.

² Fluxo hiporreico em um rio corresponde ao fluxo que ocorre na zona de transição entre água e sedimentos, e a troca que ocorre entre o meio aquoso e o leito do rio.

transmissão da luz pode afetar a temperatura da água e a produtividade primária (Berry e colaboradores, 2003; Suttle e colaboradores, 2004; Cover e colaboradores, 2006; Kane, 2006; Lacey, 2010; Jones e colaboradores, 2012).

Nos trechos relativos à parte superior da bacia do rio Doce, rio Gualaxo do Norte (T06 à T09) e porção atingida do rio Carmo (T10) e do rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T11), nos quais a onda oriunda do rompimento da barragem gerou uma vazão muito superior a capacidade do leito menor do rio, houve deposição nas margens dos cursos d'água e erosões do leito e margens alterando o padrão da morfologia em alguns locais. Há uma mudança na magnitude dos impactos geomorfológicos nos rios impactados quando comparado os trechos a montante do reservatório de Candonga (UHE Risoleta Neves), o trecho de reservatório (T12) e os trechos fluviais a jusante da barragem de Candonga (T15 à T16), fornecendo um local conveniente para mudança das abordagens para estudos de impactos geomorfológicos potencialmente causado pelo evento.

A avaliação das condições físicas dos habitats físicos, e sua trajetória de recuperação, visa melhorar o entendimento do comportamento do rio Gualaxo do Norte, rio Carmo e do rio Doce a montante do reservatório de Candonga, da eficácia das ações de restauração e da sua recuperação (no que tange parâmetros relacionados a estrutura de habitats físicos). O estudo também visa responder a perguntas técnicas e àquelas relacionadas ao programa de manejo de rejeitos feitas pelo sistema de Governança que acompanha as ações de recuperação ambiental, em específico itens judicializados do Item 1 do Eixo Prioritário 1, expostos no item do documento CIF Nº 396/2020 e item 3.2 da NOTA TÉCNICA CT-GRSA Nº 05/2020, considerando as respostas e comentários da Fundação Renova e sua equipe de consultores sumarizados no documento SRK (2020)³.

Para tal, será realizado a caracterização e mapeamento dos habitats físicos, e mapeamento de outras características do rio como a granulometria predominante na camada ativa do leito e a condição das margens, tomando como base imagens aéreas de altíssima precisão existentes para o ano de 2019 e anteriores ao evento, e imagens a serem levantadas no ano de 2021. Será também realizada a definição da condição de referência para a presença de habitats físicos para os rios estudados. O presente documento trata-se do plano de trabalho. Ao longo deste documento são apresentados os objetivos do estudo, hipóteses testadas, abordagem proposta, dados e informações que serão utilizados, atividades já realizadas e atividades previstas.

³ Em específico do item "5.3.B) Diversidade de Habitats Físicos".

2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é caracterizar os processos físicos que estão ocorrendo ao longo do trecho impactado do rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e do rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T06 à T11), e identificar as respostas do sistema fluvial a perturbação causada pela onda de lama, por meio de avaliação e mapeamento dos habitats físicos para condição de referência⁴ (pretéritos ao evento e de rios não impactados da região) e em dois momentos após o rompimento (anos de 2019 e 2021). O mapeamento será baseado em imagens aéreas de alta resolução e inspeções de campo nos rios impactados (já realizadas no âmbito de outros trabalhos), caracterizando os habitats físicos e outros parâmetros de interesse⁵.

Em termos de objetivos específicos, tem-se:

- Realizar mapeamento sistemático das estruturas de habitats físicos (cascatas, corredeiras, rápidos e remansos) nos trechos T06 à T11 para os anos de 2019 e 2021;
 - Avaliar as imagens existentes da estação seca de 2019;
 - Avaliar as imagens a serem levantadas na estação seca de 2021 (inclui realizar levantamento de imagens de alta resolução);
- Definir condição de referência para a presença de estruturas de habitats físicos na área de estudo por meio de mapeamento sistemático para situação anterior ao evento (T10 e T11) e de rios não impactados da região (T06 ao T09):
 - Rio Gualaxo do Norte (T06 à T09): baseado em informações levantadas de rios da região com características similares (inclui realizar levantamento de imagens de alta resolução de trechos de rios da região);
 - Rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11): baseado em informações anteriores ao rompimento⁶;

⁴ Adotamos o termo “condição de referência” em detrimento ao termo “dados pretéritos” anteriormente utilizada, pois é proposto o uso de valores regionais para caracterizar o estado “não impactado” do rio Gualaxo do Norte, correspondente à sua condição anterior ao evento. As imagens existentes anteriores ao rompimento são caracterizadas por relativa baixa resolução e significativa presença de vegetação ciliar que impedem a visualização do leito do rio, necessária para a atividade de mapeamento. Maiores detalhes são apresentados ao longo do documento.

⁵ Os parâmetros de interesse a serem avaliados são listados ao longo do presente documento.

⁶ Maiores informações quanto as imagens que serão utilizadas são apresentadas ao longo do presente documento.

- Avaliar o processo de evolução das estruturas de habitats físicos, comparando informações históricas e de referência com o imageamento de alta resolução de 2019 e 2021, e informações de estudos e trabalhos pertinentes;
- Avaliar a viabilidade de construção de indicador ambiental relacionado à recuperação ambiental de habitats físicos e, caso viável, apresentar a proposição de indicador.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

No trecho em questão, o rio Gualaxo do Norte é um rio misto no qual vales encaixados íngremes e confinados de leito rochoso são intercalados com cursos aluviais moderadamente confinados. O canal do rio aumenta de uma largura típica de cerca de 10 m na área afetada mais a montante para 20 a 25 m no curso próximo à confluência do rio Carmo (valores aproximados). Devido à relativa pequena largura do canal, somente imagens aéreas (de satélites ou aerolevanteamento) de alta resolução são capazes de representar as características do leito do rio, adicionalmente, a vegetação ciliar de relativo grande porte⁷ se sobrepõe e obstrui (parcialmente) a visão do leito do rio. Devido a estes fatores, as imagens aéreas do rio Gualaxo do Norte de momentos anteriores ao evento fornecem informações muito limitadas sobre as características do leito do curso d'água, sendo necessário o uso de imagens de alta resolução de rios da região (com características similares e não impactados pela onda de lama) para se definir uma referência de como era sua condição antes do rompimento. O rio do Carmo possui uma largura típica variando de 30 a 60 m, e o rio Doce 65 m (valores aproximados referentes aos trechos a serem estudados). Por uma combinação entre o significativo maior porte dos rios e uma menor presença de mata ciliar, as imagens de satélites anteriores ao evento possuem boa representação das características do leito dos rios.

Acredita-se que os cursos aluviais dos rios em questão eram, predominantemente, arenosos e cobertos de cascalho antes da deposição da camada de rejeito (Golder, 2016a,b). Imediatamente após o evento, apresentavam características de leito plano e uniforme (*plane-bed*) com quase nenhuma variação hidráulica e de estruturas de habitats físicos, estando completamente coberto por sedimentos predominantemente finos (silte ou menores) depositados pela onda de rejeitos.

O trecho em estudo possui aproximadamente 109 km de extensão, com área

⁷ A passagem da onda de lama removeu a maior parte da vegetação ciliar no trecho em questão. Imagens anteriores ao rompimento apresentam vegetação sobrepondo o canal do rio em uma área não desprezível. Até o momento, nas imagens aéreas coletadas após o rompimento a área em que a vegetação limita a observação do leito pode ser considerada desprezível para a análise proposta.

de drenagem variando de 125 para 8920 km² (valores aproximados). O rompimento da barragem de Fundão mobilizou aproximadamente $43,7 \times 10^6$ m³ de rejeitos de minério de ferro (Golder, 2016a) cuja granulometria predominante variava entre silte e argila, que foram transportados ao longo da área de estudo com características variando de lama plástica (*mudflow*) para corrida de lama (*mud flood*) (Golder, 2016a). O fluxo promoveu o arraste de sedimentos naturais (granulometria variando entre material lamoso e pedras de mão) oriundos do fundo do vale e do leito do rio (Golder, 2020a). Durante seu recesso (período de diminuição da vazão após a ocorrência da vazão máxima) se formaram depósitos compostos de uma mistura de rejeitos e sedimentos naturais.

A deposição de material e a erosão causada pela onda de rejeitos alteraram a configuração da geometria do canal resultando em trechos longos de geometria e características uniformes, apresentando leito plano, com pouca complexidade e diversidade hidráulica. Com o passar do tempo e com a ocorrência de processos físicos de transporte de material pelas águas do rio, seu canal tem passado por transformações buscando recompor suas características, incluindo a formação e diversificação de habitats físicos. A avaliação do estágio de recuperação em relação ao parâmetro diversidade de habitats para o ano de 2019 e atual (levantamento de dados a ser realizado em 2021) é objeto do estudo proposto.

3.1 Habitats físicos

Habitats físicos podem ser definidos como áreas homogêneas que possuem características físicas de sua morfologia (material predominante na camada ativa, superficial, e forma do leito) e características hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento) distintas e que se estendem até várias larguras de canal em termos de comprimento, fornecendo habitats distintos para os organismos aquáticos (Montgomery & Buffington, 1997, 1998; Bisson e colaboradores, 2017). A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam os habitats físicos a serem mapeados.

Tabela 1: Tipos de habitats físicos incluídos nos esquemas de classificação de canais.

Classe	Forma Topográfica	Velocidade do fluxo em condições de baixa vazão	Profundidade Relativa	Material do Leito
Poço/remanso (pools)	Leito côncavo, ponto mais profundo substancialmente abaixo do leito, em algum ponto a jusante	Lenta	Profunda	Variável
Rápido(s) (runs/glides)	Leito plano com gradiente moderado abaixo. Superfície da água levemente inclinada.	Moderado a lento	Moderado	Variável
Corredeira (riffles)	Leito plano, frequentemente pontos altos locais ao longo do perfil talvegue	Rápido, turbulento	Raso	Variável
Cascata (cascades)	Leito com inclinação íngreme.	Muito rápido (supercrítico)	Raso	Muitas vezes, leito rochoso - matacão

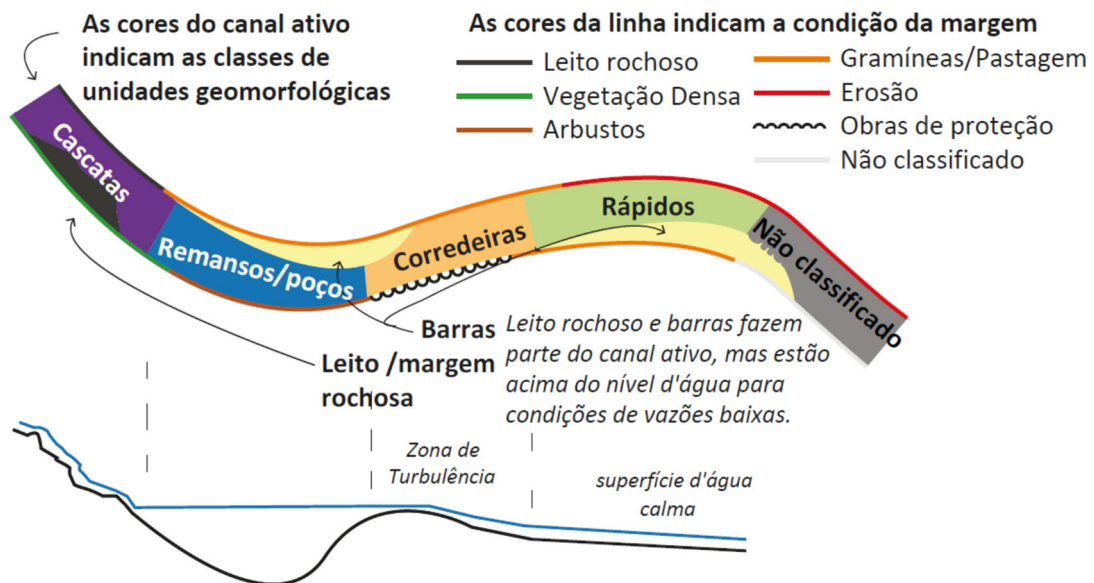


Figura 1: Estrutura conceitual dos habitats físicos incluídos no mapeamento sistemático do canal fluvial.

3.2 Mapeamento sistemático do canal fluvial

Considerando o difícil acesso por terra em parte do trecho a ser estudado, em especial ao longo do rio Gualaxo do Norte, é proposta uma abordagem para entender as condições das características de habitats físicos sem a coleta de observações detalhadas sistemáticas a partir do solo (que poderiam ser feitas seguindo uma abordagem padronizada, como o protocolo de nível II do USFS (2012), caso houvesse acesso a todo o rio). O método sugerido se baseia no mapeamento sistemático de habitats físicos do rio utilizando

imagens aéreas de alta resolução obtidas com drone em sobrevoo de baixa altitude.

Considerando a necessidade de se observar as características do leito, as imagens aéreas devem ser obtidas em condições de baixas vazões (profundidades) e baixa turbidez. Tais condições são tipicamente observadas durante a estação seca entre maio e agosto, podendo também ocorrer no período de transição. Para momento anterior à passagem da onda de lama a vegetação ciliar de maior porte obstrui a visão de uma parcela significativa do leito do rio Gualaxo do Norte, no caso do rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga, devido a maior largura dos rios, a obstrução da visão do canal é relativamente menor. Como a onda de lama removeu a vegetação ciliar, as imagens posteriores ao evento não apresentam obstrução significativa do leito, até o momento. Com o crescimento da vegetação ciliar este cenário pode mudar.

As imagens devem ser processadas por meio de ortorretificação diferencial, para corrigir as distorções óticas das fotos causadas devido ao ângulo de obtenção da imagem, inclinação do terreno, ou outros fatores, fornecendo informações de distância e de área mais precisas.

Após obtenção e processamento das imagens aéreas, as etapas do mapeamento compreendem o delineamento do canal ativo⁸, mapeamento delimitação da área de abrangência dos habitats físicos (incluindo quantificação da presença percentual), cálculo da granulometria predominante da camada ativa do leito⁹ diferenciando materiais como cascalho e pedra de mão de material mais fino¹⁰, e classificação da condição da margem (i.e., vegetação densa, arbustos, grama ou pastagem, proteção de talude, erosão e leito rochoso. A classificação apresentada deve ser considerada preliminar e poderá sofrer alterações).

⁸ Canal ativo, ou leito menor, é a área ao longo do leito do rio onde a combinação de velocidade do fluxo, intensidade do transporte de sedimentos e persistência da ocorrência de fluxo sobre o local impede o crescimento da vegetação.

⁹ Diferente de técnicas convencionais de amostragem, a técnica proposta é capaz de fornecer informações de granulometria ao longo de todo o canal fluvial, no entanto fornece somente informações da camada superior do leito. A análise proposta é complementar às informações de granulometria das amostras do leito realizada no âmbito de outros estudos.

¹⁰ A resolução da imagem (tamanho do pixel) deve ser menor que o menor grão a ser identificado, permitindo identificar individualmente de cada grão do material. No presente estudo buscamos identificar a fração granulométrica cascalho, que é tipicamente associado ao habitat de corredeiras.

3.3 Parâmetros complementares

Além do mapeamento propriamente dito, informações quanto a declividade e morfologia do canal, e quanto a morfologia das planícies de inundação serão coletadas, e análise hidráulica simplificada dos mecanismos de transporte preferencial de sedimentos para eventos de cheias selecionados será realizada. Informações topográficas serão utilizadas para o cálculo da declividade e para avaliações da morfologia do canal e planície de inundação. Informação de estudos e avaliações geomorfológicas anteriores (i.e., Golder, 2016b; RHAMA, 2020) também poderão ser utilizadas. Será medida a largura do leito do rio, utilizando as imagens e/ou dados topográficos, para suportar a análise hidráulica simplificada proposta (que pode incluir avaliação da potência do escoamento e cálculo do número de Rouse para avaliação dos mecanismos de transporte preferencial de sedimentos).

Também será mapeado locais de intervenções antrópicas de recuperação ambiental dos rios (i.e., obras de estabilização de margens, projeto de renaturalização, e etc.).

Esses parâmetros visam suportar as análises dos resultados, e eventuais correlações entre os resultados do mapeamento de habitats com parâmetros característicos dos trechos serão investigadas (i.e., relação da diversidade de habitats físicos com a declividade e com intervenções/ações de recuperação ambiental dos rios).

4 HIPÓTESES SOBRE O COMPORTAMENTO DA RECUPERAÇÃO DOS RIOS

Embora a evolução morfológica do aporte de sedimentos grosseiros tenha sido estudada de forma relativamente detalhada (Nicholas e colaboradores, 1995; James, 2006, 2013, 2018; Wohl, 2015), uma menor quantidade de estudos se concentraram nos impactos do aporte de granulometria fina e estes se concentraram principalmente no material com tamanho de areia (Knighton, 1989, 1991; Markham & Repp, 1992; Markham & Day, 1994; Gott, 1998; Keefer, 1999; Major e colaboradores, 2000; Major, 2004; Bartley & Rutherford, 2005; Yanites e colaboradores, 2010; Curran e colaboradores, 2013; East e colaboradores, 2015; Magirl e colaboradores, 2015; Warrick e colaboradores, 2015; Anderson e colaboradores, 2017). Portanto, pouco se sabe sobre a resposta de rios à sobrecarga de sedimentos finos.

O passar do tempo e a ocorrência de processos físicos de transporte de material pelas águas do rio, o canal do rio irá recompor suas características, o que inclui os habitats físicos, os quais são tipicamente usados para classificar e quantificar o habitat dos peixes, por exemplo. A quantidade e a qualidade desses habitats – junto com a qualidade da água, produtividade primária e secundária – são fatores considerados para avaliação da

capacidade produtiva aquática. Como tal, a recuperação e o reestabelecimento dessas características é um componente chave da recuperação ambiental do rio.

Com base no estado do conhecimento atual sobre a resposta de rios à uma grande inserção de sedimentos, e no entendimento preliminar do comportamento da evolução da recuperação da área de estudo em relação à diversificação de habitats físicos (baseado em análise preliminar de dados e estudos geomorfológicos e de transporte de sedimentos que não tiveram o objetivo específico de avaliar habitats físicos¹¹), foram definidas as seguintes hipóteses em relação as respostas esperadas no que tange o tema:

1. A configuração geométrica e de habitats físicos (incluindo corredeiras, rápidos e remansos) está sendo recuperada em relação às condições de leito uniforme e plano que prevaleceram imediatamente após o evento;
2. O rio está restabelecendo sua forma e características originais, incluindo corredeiras, rápidos, remansos e trechos encachoeirados, a um nível semelhante ao dos rios da região não afetados pelo rompimento;
3. Mecanismos de transporte de sedimentos estão mobilizando localmente o material oriundo da onda de rejeitos, resultando na seleção e separação do material mais fino (majoritariamente rejeitos) do material mais grosseiro (majoritariamente sedimentos naturais) por processos físicos típicos do transporte de sedimentos em rios, tamanho e peso específico das partículas (processo conhecido em inglês como *sorting*);
4. O grau de recuperação do habitat físico é relativo ao estoque de material (depósitos de rejeitos mais sedimentos naturais na área impactada e contribuição de sedimentos naturais dos trechos não impactados) e ao trabalho exercido cumulativamente pelo próprio rio e seu fluxo d'água na remoção do material do canal.

¹¹ Destacam-se os trabalhos de Golder (2020b,c) que apresentam avaliações do comportamento do lag layer, definido, de maneira simplificada, como camada de sedimento grosseiro que está se formando sobre os depósitos de material mais fino, Hydrobiology (2020) apresenta enfoque em pequenas áreas e que se concentra em pequenas mudanças geomórficas do leito do rio, e RHAMA (2020) que apresenta a tendência de redução do transporte de sedimento em suspensão que pode ser parcialmente atribuída à redução da presença de sedimentos mais finos (e mais facilmente transportados) na camada ativa do leito.

5 ESCOPO E ABRANGÊNCIA DO ESTUDO

5.1 Atividade 1 – Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2019

Os procedimentos e métodos descritos ao longo do item 3 serão utilizados para análise das imagens aéreas de alta resolução existentes, obtidas com sobrevoo de drone durante a estação seca de 2019.

Para os trechos T06 a T09, o aerolevanteamento foi realizado pela NHC para a finalidade de mapeamento de habitats físicos¹². Para os trechos T10 e T11 foi realizado pela Fundação Renova aerolevanteamento em data similar (imagens aéreas coletadas com drone durante a estação seca de 2019). Apesar das imagens dos trechos T10 e T11 não terem sido levantadas especificamente para o presente estudo, uma análise preliminar do banco de imagens da Fundação Renova indica que devem atender as características de baixa vazão e turbidez necessárias para a realização do mapeamento proposto. Se porventura as imagens pré-selecionadas não forem adequadas ou apresentarem limitações em um trecho específico, imagens de satélite de alta resolução se encontram disponíveis e podem ser utilizadas¹³. Devido as maiores profundidades dos trechos T10 e T11, e das características das imagens, é antecipado que a classificação da granulometria predominante do leito pode ser prejudicada. Isso não é julgado como crítico, pois se trata de uma informação complementar ao mapeamento de habitats.

As estruturas geomorfológicas tais como corredeiras, rápidos, poços/remansos e cascatas serão identificados e terão sua área delimitada, sendo calculado seu percentual de ocupação em relação à área total e dos trechos definidos com base na declividade e área de drenagem.

Uma análise quantitativa da presença percentual de habitats físicos no ano de 2019, bem como dos demais parâmetros a serem levantados será apresentada em um relatório técnico.

5.2 Atividade 2 – Definição da condição de referência

São propostas abordagens distintas para definição da condição de referência para o rio Gualaxo do Norte (T06 à T09) e para o rio do Carmo e Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11).

As áreas onde a vegetação ciliar impede a visualização do leito do rio, bem como o erro associado o uso de imagens aéreas de menor resolução, é proporcionalmente menor nos rios de maior largura. Por se tratar de rios de relativo grande porte, as imagens aéreas e de satélite antes do rompimento podem ser utilizadas para determinar e o percentual de ocupação dos habitats

¹² Realizado para a empresa BHP Billiton Brasil Ltda.

¹³ Banco de imagens ESRI e/ou Google.

físicos no rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11). Já no caso do rio Gualaxo do Norte as imagens de satélites anteriores ao rompimento não são consideradas adequadas, pois os erros associados ao uso de imagens de menor resolução são proporcionalmente maiores, e a vegetação ciliar obstrui parcialmente a visualização do leito do rio em uma parcela significativa do trecho¹⁴.

Para a definição da condição de referência do parâmetro de diversidade de habitats físicos para o rio Gualaxo do Norte (trechos 06 a 09) é proposto a realização de procedimento de mapeamento sistemático, utilizando imagens aéreas de alta resolução de trechos selecionados de rios da região, os quais possuam características similares a dos rios impactados. Imagens históricas poderão ser utilizadas para complementar a avaliação das condições de referência. Também será feita a definição da condição de referência para o parâmetro de granulometria predominante na camada ativa do leito, a qual será realizada por meio de fotointerpretação, com identificação e delimitação das áreas com predomínio de uma determinada classe de material (i.e., cascalho).

Considerando que um mesmo rio muda de característica ao longo de seu traçado, e que essas características se correlacionam com as características dos habitats físicos, propomos que além de se avaliar o rio como um todo, a avaliação da condição de referência seja feita por trechos homogêneos.

Resultados preliminares do mapeamento de habitats no rio Gualaxo do Norte apontam que locais com maior gradiente energético (trechos de alta declividade, como cascatas) tem uma recuperação mais rápida (do ponto de vista de habitats físicos) que locais de menor gradiente energético (baixas declividades). Se define a hipótese que se os trechos de menor gradiente energético forem considerados recuperados, os trechos de maior gradiente energético também estarão recuperados. Portanto, é razoável focar a análise da condição de referência para trechos de menor declividade.

Os resultados preliminares também foram utilizados para estimar preliminarmente o tamanho da amostra de referência (quantidade de trechos de rios da região a serem analisados) por uma análise estatística do tipo "*power analysis*" que, no caso, estima a confiança de detectar se os rios impactados estão dentro da faixa de valores da condição de referência. É proposto a adoção de um fator de 0,8 e um intervalo de confiança de 10%, o que significa que se terá uma probabilidade de 80% de definir corretamente que existe diferença de 10 % ou menos entre o trecho do rio impactado e os rios da região adotados como referência. Propomos um total de 33 trechos para se definir os valores da condição de referência para o Rio Gualaxo do

¹⁴ Estas observações são mais proeminentes no trecho mais alto do curso do rio Gualaxo do Norte.

Norte (T06 a T09), divididos pelas suas características de declividade e área de drenagem conforme a Tabela 2.

A Tabela 2 apresenta as características e respectiva quantidade de trechos a serem levantados, e a Figura 2 apresenta todos os trechos de rios da região que tem as características apresentadas na Tabela 2. Os trechos de referência deverão ter um comprimento superior a 20 vezes a largura típica do trecho. Propõe-se padronizar para trechos com área de drenagem menores que 400 km² o comprimento de 0,6 km e para trechos com área de drenagem entre 400 e 660 km² o comprimento de 0,8 km. A escolha dos trechos de referência levará em consideração as condições dos locais e das respectivas áreas de drenagem, condições de acesso, disponibilidade de informações pertinentes (locais que tenham sido estudados anteriormente e possuam informações quanto a composição do leito, transporte de sedimento, geomorfologia, e etc.). A definição de quais trechos serão levantados, eventual revisão da quantidade de trechos, bem como o levantamento das imagens, são atividades que serão realizados no âmbito do estudo proposto.

Conforme descrito anteriormente, o imageamento requer condições de baixa vazão e baixa turbidez. O levantamento das imagens será realizado durante a estação seca de 2021 utilizando sobrevoos de drone de baixa altitude, ou outra técnica, que proporcione resolução compatível (3~4 cm). Os procedimentos de processamento das imagens, mapeamento dos habitats e avaliação dos demais parâmetros apresentados ao longo do item 3 serão realizados.

Devido as incertezas associadas a estimativa da quantidade de amostras necessárias para definição da condição de referência regionais para os trechos T10 e T11 (ainda não são conhecidos parâmetros estatísticos da presença de habitats neste trecho), e a possibilidade de se utilizar imagens históricas, opta-se por serem utilizadas para os trechos 10 e 11 as imagens históricas para definição da condição de referência para presença de habitats físicos. Uma análise quantitativa da presença percentual de habitats físicos e a definição da condição de referência será apresentada em um relatório técnico.

Tabela 2: Características e quantidade de amostras a serem levantadas para definição da condição de referência para o rio Gualaxo do Norte (T06 à T09).

Declividade \ Área	Rio Gualaxo do Norte		
	80-200 km ²	200-400 km ²	400-660 km ²
> 0.004 m/m	4	4	2
0.002-0.004 m/m	1	4	4
<0.002 m/m	2	8	4
Total	7	16	10

Características dos trechos analisados

Rio Gualaxo do Norte			Rio Carmo	Rio Doce	Espessura da linha e a paleta de cores indicam a área de drenagem, e a saturação das cores a declividade.
80-200 km ²	200-400 km ²	400-660 km ²	1500-3000 km ²	>3000 km ²	
					0.004-0.01 m/m
					0.002-0.004 m/m
					<0.002 m/m

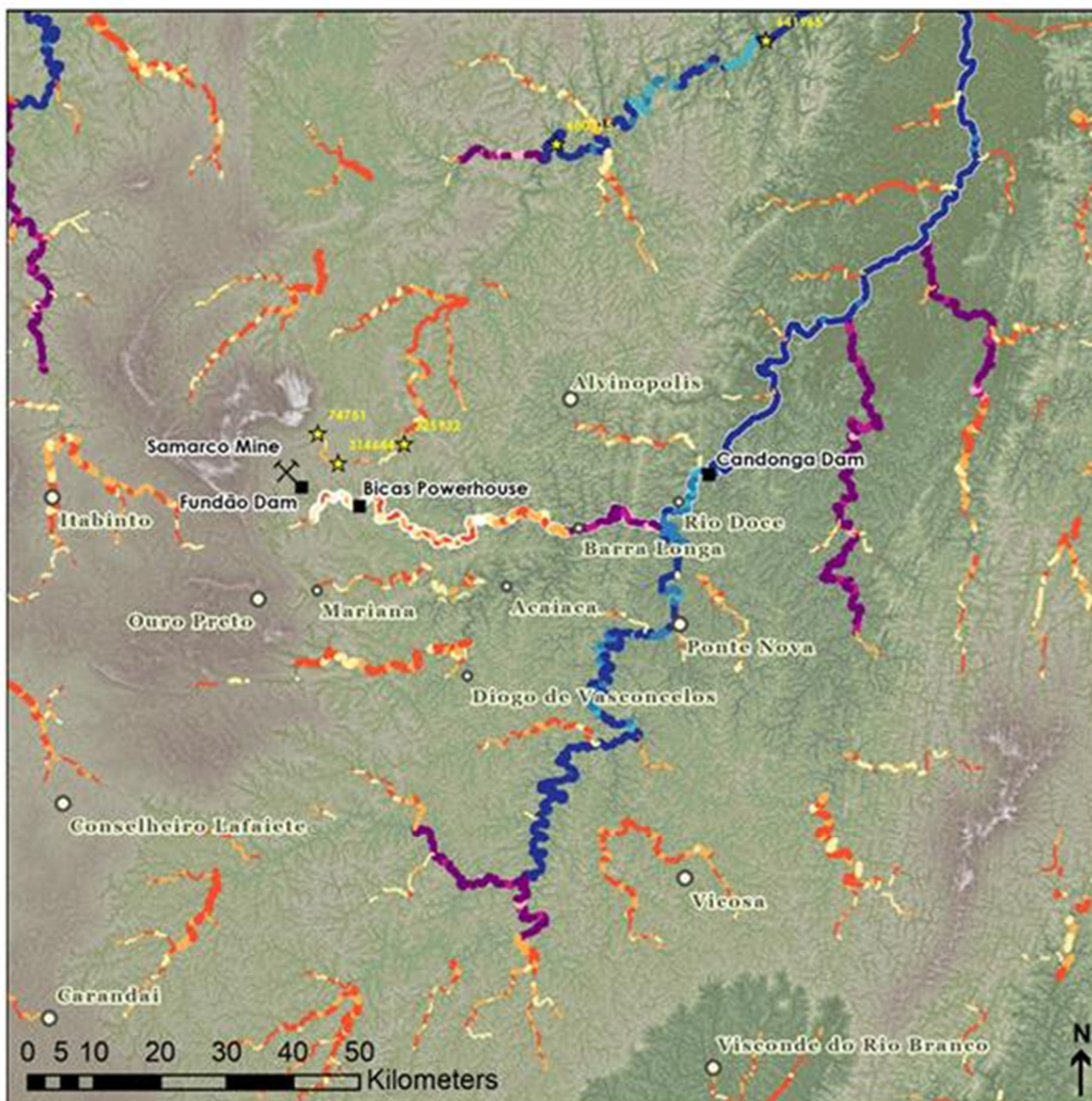


Figura 2: Mapeamento em escala regional de trechos de rios com características semelhantes aos rios impactados.

5.3 Atividade 3 – Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2021

Para permitir a avaliação da recuperação da área estudada é proposto a realização do mapeamento dos habitats físicos, e demais parâmetros propostos, para as condições apresentadas no ano de 2021. Isto permitirá avaliar a evolução temporal da resposta do sistema fluvial, e sua condição após estações chuvosas de maior expressão¹⁵.

Conforme descrito anteriormente, o imageamento requer condições de baixa vazão e baixa turbidez. O levantamento das imagens será realizado durante a estação seca de 2021 utilizando sobrevoos de drone de baixa altitude, ou outra técnica, que proporcione resolução compatível (3~4 cm).

Os procedimentos de processamento das imagens, mapeamento dos habitats e avaliação dos demais parâmetros apresentados ao longo do item 3 serão realizados.

Uma análise quantitativa da presença percentual de habitats físicos no ano de 2021, bem como dos demais parâmetros levantados será apresentada em um relatório técnico.

5.4 Atividade 4 – Análise integrada da evolução do processo de formação e recuperação de habitats físicos

Consiste na análise comparativa dos dados levantados e produzidos no presente trabalho quanto a presença de habitats físicos, e outros parâmetros levantados, buscando traçar uma correlação com o processo de recuperação em andamento.

Assumindo condição de completa homogeneidade de habitats após o rompimento será possível quantificar a diversificação de habitats para dois períodos, entre o rompimento e o ano de 2019, caracterizado por um período hidrológico de estiagem e o período entre 2019 e 2021, que se caracteriza por apresentar estações chuvosas de maior expressão.

Espera-se que a avaliação qualitativa da comparação com os parâmetros complementares que serão calculados (declividade, parâmetros hidráulicos, condições das margens, presença de intervenções antrópicas (i.e., abrangência do projeto de renaturalização), entre outros), e com resultados e informações de outros estudos que estejam disponíveis, forneça informações adicionais ao entendimento do processo de recuperação da área de estudo. Sendo destacado, mas não se limitando, os estudos do lag layer (Golder 2020b,c) e os estudos geomorfológicos (Golder 2016a; Hydrobiology (2018,2020) e RHAMA (2020).

¹⁵ Os anos subsequentes ao evento foram atipicamente secos.

Por fim, espera-se conseguir avaliar quantitativamente a evolução da recuperação da área de estudo no que tange à diversidade de habitats físicos, e quantificar como os rios avaliados (condição para o ano de 2021) se comparam com a condição de referência (baseado em rios da região para os trechos T06 à T09 e na condição anterior ao rompimento nos trechos T10 e T11), podendo se estimar seu grau de recuperação.

Estas análises serão compiladas no relatório técnico final do estudo.

6 PRODUTOS ENTREGÁVEIS

Estão previstos a entrega de seis produtos,

- id01. Plano de Trabalho
- id02. Relatório do mapeamento de habitats - Ano Base 2019
- id03. Relatório Condição de referência trechos T10 e T11
- id04. Relatório Condição de referência trechos T06 à T09
- id05. Relatório do mapeamento de habitats - Ano Base 2021
- id06. Relatório Final

É contemplada no escopo destas atividades a realização de reuniões para apresentação e discussão dos produtos, e uma revisão. Solicitações adicionais de atendimento de demandas devem ser discutidas.

7 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

O cronograma de atividades é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Cronograma de atividades previstas em meses.

Prod.	Descrição	Meses														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Plano de trabalho															
	Produção do Plano de Trabalho															
id01	Entrega do Plano de Trabalho															
	Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2019															
	Levantamento e processamento de imagens existentes para o trecho T06 a T11 - Sobrevoos drone															
	Mapeamento dos habitats - Ano Base 2019															
id02	Relatório do mapeamento de habitats - Ano Base 2019															
	Definição da condição de referência: Valores regionais para T06 à T09 e valores históricos para T10 e T11															
	Levantamento e processamento de imagens históricas existentes para o trecho T10 e T11															
	Mapeamento dos habitats nos trechos T10 e T11 pré-rompimento															
id03	Relatório Condição de referência trechos T10 e T11															
	Planejamento e levantamentos de campo (considera tempo de espera para condições ideais)															
	Processamento dos dados de campo															
	Mapeamento dos habitats locais de referência para T06 à T09															
id04	Relatório Condição de referência trechos T06 à T09															
	Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2021															
	Planejamento e levantamentos de campo (considera tempo de espera para condições ideais)															
	Processamento dos dados de campo															
	Mapeamento dos habitats - Ano Base 2021															
id05	Relatório do mapeamento de habitats - Ano Base 2021															
	Análise integrada da evolução do processo de formação e recuperação de habitats físicos: Condição de referência, ano de 2019 e ano de 2021															
	Revisão de literatura e trabalhos anteriores correlatos															
	Análise integrada															
id06	Relatório Final															

8 PREMISSAS E CONDICIONANTES

As premissas e condicionantes deste estudo são:

- A Fundação Renova se compromete a conceder acesso ao banco de imagens aéreas de seu domínio, especificamente, mas não se limitando, aos sobrevoos realizados no ano de 2019 e imagens de satélite anteriores ao evento;
- A Fundação Renova se compromete a conceder acesso ao banco de dados de informações topográficas, especificamente do levantamento LiDAR da região, disponibilizando-o em formato raster editável;
- Está previsto um acompanhamento mensal das atividades junto a Fundação Renova, com entrega de documentos apresentando a evolução dos trabalhos;
- Não são previstas amostras do sedimento do leito, nem outros levantamentos de campo ao longo dos rios impactados;
- Não estão previstos levantamentos adicionais de imagens nos rios impactados e rios selecionados para definição da condição de referência;
- Não estão previstas análises por modelos computacionais;
- Não está prevista a avaliação biológica de habitats.

9 PANDEMIA DEVIDO AO COVID-19

A NHC está monitorando de perto o desenvolvimento da pandemia COVID-19 desde janeiro de 2020 e toma as ações apropriadas para adaptar nossas rotinas de trabalho à medida que a situação evolui. A saúde e a segurança da equipe da NHC, de nossos clientes e das comunidades em que trabalhamos são nossa prioridade para guiar todas as nossas decisões, as quais levam em consideração as orientações de vários níveis do governo e das autoridades de saúde.

As ações da NHC para mitigar os riscos de transmissão e infecção incluem restrições a viagens não essenciais. Nossos colaboradores estão trabalhando remotamente para limitar o número de pessoas em nossos escritórios e laboratórios de hidráulica. Os procedimentos de limpeza e higienização foram intensificados, seguindo as melhores práticas de higiene e diretrizes das agências de saúde e dos diversos níveis do governo.

Como a Organização Mundial da Saúde declarou uma pandemia no início de março, a NHC foi rápida na ação. Todos os colaboradores foram

incentivados a limitar suas interações físicas e trabalhar remotamente sempre que possível, realizando atividades de trabalho com colegas e clientes por telefone, e-mail ou videoconferência. Os membros da equipe de campo também têm acesso aos EPIs necessários e mantêm as diretrizes de distanciamento social. Praticam uma boa higiene utilizando sabão e/ou álcool para higienização frequente das mãos.

Colocamo-nos à vossa disposição para prestar quaisquer esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Marcus Vinícius Estigoni | nhc Brasil Consultores
Engenheiro de Projetos | Preposto responsável pelo contrato
mestigoni@nhcweb.com | Tel: (11) 3089-6690 | Cel: (11) 94211-4141

Guilherme de Lima | nhc Brasil Consultores Diretor Técnico
glima@nhcweb.com | Tel: (11) 3089-6690 | Cel: (11) 94219-1704

10 REFERÊNCIAS

- Anderson, S. A., Keith, M. K., Magirl, C. S., Wallick, J. R., Mastin, M. C., and Foreman, J. R. (2017). Geomorphic response of the North Fork Stillaguamish River to the State Route 530 landslide near Oso, Washington. US Geological Survey.
- Bartley, R., and Rutherford, I. (2005). Re-evaluation of the wave model as a tool for quantifying the geomorphic recovery potential of streams disturbed by sediment slugs. *Geomorphology*, 64(3-4), 221-242. doi:10.1016/j.geomorph.2004.07.005.
- Berry, W., Rubinstein, N., Melzian, B., and Hill, B. (2003). The biological effects of suspended and bedded sediment (SABS) in aquatic systems: a review. United States Environmental Protection Agency, Duluth.
- Bisson, P. A., Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (2017). Valley segments, stream reaches, and channel units. *Methods in Stream Ecology*, Volume 1 (pp. 21-47). Elsevier.
- Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (1999a). Effects of Hydraulic Roughness on Surface Textures of Gravel-Bed Rivers. *Water Resources Research*, 35(11), 3507-3521.
- Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (1999b). Effects of sediment supply on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, 35(11), 3523-3530.
- Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 34, 325-254.
- Cover, M., May, C., Resh, V., and Dietrich, W. (2006). Technical report on quantitative linkages between sediment supply, streambed fine sediment, and benthic macroinvertebrates in streams of the Klamath National Forest. University of California, Berkeley. Agreement.
- Curran, C. A., Magirl, C. S., and Duda, J. J. (2013). Suspended-sediment concentrations during dam decommissioning in the Elwha River, Washington. US Geological Survey Data Set. <http://wa.water.usgs.gov/pubs/misc/elwha/ssc/>, doi, 10, F7M043DB.
- East, A. E., Pess, G. R., Bountry, J. A., Magirl, C. S., Ritchie, A. C., Logan, J. B., Randle, T. J., Mastin, M. C., Minear, J. T., Duda, J. J., and others (2015). Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA:

River channel and floodplain geomorphic change. *Geomorphology*, 228, 765–786.

Golder (2016a). Avaliação dos Impactos do Meio Físico resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão. Relatório RT-023_159-515-2282_00-J preparado para Samarco Mineração S.A.. Julho de 2016.

Golder (2016b). Fundão Tailings Dam Breach - Geomorphological and Hydrological Assessment. Relatório RT-021_159-515-2082_00-B preparado para Samarco Mineração S.A.. Agosto de 2016.

Golder (2020a). Avaliação de remobilização de solos e sedimentos contaminados resultante do rompimento da barragem de Fundão. Rev. 5. Relatório preparado para BHP Billiton Brasil Ltda.

Golder (2020b). Metodologia para avaliar a estabilidade do lag layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos extremos. Relatório Final. Revisão 02. Relatório preparado para Fundação Renova. Março de 2020.

Golder (2020c). Aplicação do método analítico para avaliação do lag layer. Relatório preparado para Fundação Renova. Junho de 2020.

Gott, J. (1998). The behavior of fine debris-torrent derived sediments in the North Fork Boise River, 1995–1997. Western Watersheds, 7th Biennial Watershed Management Council Conference.

Hydrobiology (2018). Rio Doce Tailings and Geomorphology Survey June 2018. Rev. 02. Relatório preparado para BHP Billiton Brasil Ltda. Dezembro de 2018.

Hydrobiology (2020). Estudos Geomorfológicos e de Rejeitos a bacia do rio Doce – 2019. Revisão 03 – Versão em Português. Relatório preparado para BHP Billiton Brasil Ltda. Agosto de 2020.

James, L. A. (2006). Bed waves at the basin scale: implications for river management and restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(13), 1692–1706. doi:10.1002/esp.1432.

James, L. A. (2013). Legacy sediment: Definitions and processes of episodically produced anthropogenic sediment. *Anthropocene*, 2, 16–26. doi:10.1016/j.ancene.2013.04.001.

James, L. A. (2018). Ten conceptual models of large-scale legacy sedimentation – A review. *Geomorphology*, 317, 199–217. doi:10.1016/j.geomorph.2018.05.021.

- Jones, J. I., Murphy, J. F., Collins, A. L., Sear, D. A., Naden, P. S., and Armitage, P. D. (2012). The Impact of Fine Sediment on Macro-Invertebrates. *River Research and Applications*, 28(8), 1055–1071. doi:10.1002/rra.1516.
- Kane, J. (2006). Response of Benthic Macroinvertebrates to Increased Sediment Supply in Streams.
- Keefer, D. K. (1999). Earthquake-induced landslides and their effects on alluvial fans. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 84–104. doi:10.2110/jsr.69.84.
- Knighton, A. D. (1989). River adjustment to changes in sediment load: the effects of tin mining on the Ringarooma River, Tasmania, 1875–1984. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14(4), 333–359.
- Knighton, A. D. (1991). Channel bed adjustment along mine affected rivers of north Tasmania. *Geomorphology*, 4, 205–219.
- Lacey, W. A. (2010). BIOLOGICAL EFFECTS OF SEDIMENT ON BULL TROUT AND THEIR HABITAT—GUIDANCE FOR EVALUATING EFFECTS.
- Lisle, T. E., & Hilton, S. (1992). The volume of fine sediment in pools: an index of sediment supply in gravel bed streams. *Water Resources Bulletin*, 28(2), 371–383.
- Lisle, T. E., & Hilton, S. (1999). Fine bed material in pools of natural gravel-bed channels. *Water Resources Research*, 25(4), 1291–1304.
- Magirl, C. S., Hilldale, R. C., Curran, C. A., Duda, J. J., Straub, T. D., Domanski, M., and Foreman, J. R. (2015). Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Fluvial sediment load. *Geomorphology*, 246, 669–686. doi:10.1016/j.geomorph.2014.12.032.
- Major, J. J. (2004). Posteruption suspended sediment transport at Mount St. Helens: Decadal-scale relationships with landscape adjustments and river discharges. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012), 109(F1). [online] Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JF000010/full> (Accessed 12 February 2014).
- Major, J. J., Pierson, T. C., Dinehart, R. L., and Costa, J. E. (2000). Sediment yield following severe volcanic disturbance - a two-decade perspective from Mount St. Helens. *Geology*, 28(9), 819–822.
- Markham, A., & Day, G. (1994). Sediment transport in the Fly River basin,

- Papua New Guinea. Variability In Stream Erosion and Sediment Transport, 7.
- Markham, A., & Repp, K. (1992). Erosion and sediment transport in Papua New Guinea. Network design and monitoring. Case Study: Ok Tedi Coppermine. Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins, 10.
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596–611.
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1998). Channel processes, classification, and response. *River ecology and management*, 112, 1250–1263.
- Nicholas, A. P., Ashworth, P. J., Kirkby, M. J., Macklin, M. G., and Murray, T. (1995). Sediment slugs: large scale fluctuations in fluvial sediment transport rates and storage volumes. *Progress in Physical Geography*, 19(4), 500–519.
- Paola, C., & Seal, R. (1995). Grain Size Patchiness as a Cause of Selective Deposition and Downstream Fining. *Water Resources Research*, 31(5), 1395–1407. doi:10.1029/94WR02975.
- RHAMA (2020). Estudos dos processos fluviais e de sedimentos a jusante da Barragem de Fundão, no Rio Doce. Produto 2, Relatório Técnico N° 01. Revisão 2. Relatório preparado para Fundação Renova. Setembro de 2020.
- Sable, K. A., & Wohl, E. (2006). The relationship of lithology and watershed characteristics to fine sediment deposition in streams of the Oregon Coast Range. *Environmental Management*, 37(5), 659–670.
- SRK (2020). Consolidação das argumentações técnicas da Fundação Renova em resposta à Deliberação CIF N° 396/2020 e Nota Técnica N° CT-GRSA 05/2020 sobre a avaliação dos estudos dos Indicadores e Metas das Ações Relativas ao Manejo de Rejeitos nos Trechos de 1 a 11. Memorando Técnico preparado para Fundação Renova. 03/11/2020.
- Suttle, K. B., Power, M. E., Levine, J. M., and McNeely, C. (2004). How Fine Sediment in Riverbeds Impairs Growth and Survival of Juvenile Salmonids. *Ecological Applications*, 14(4), 969–974. doi:10.1890/03-5190.

USFS (2012). Stream Inventory Handbook Level I & II. 2.12.

Warrick, J. A., Bountry, J. A., East, A. E., Magirl, C. S., Randle, T. J., Gelfenbaum, G., Ritchie, A. C., Pess, G. R., Leung, V., and Duda, J. J. (2015). Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Source-to-sink sediment budget and synthesis. *Geomorphology*, 246, 727–750. doi:10.1016/j.geomorph.2015.01.010.

Wohl, E. (2015). Legacy effects on sediments in river corridors. *Earth-Science Reviews*, 147, 30–53. doi:10.1016/j.earscirev.2015.05.001.

Yanites, B. J., Tucker, G. E., Mueller, K. J., and Chen, Y.-G. (2010). How rivers react to large earthquakes: Evidence from central Taiwan. *Geology*, 38(7), 639–642.

Zunka, J. P. P., Tullos, D. D., and Lancaster, S. T. (2015). Effects of sediment pulses on bed relief in bar-pool channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(8), 1017–1028. doi:10.1002/esp.3697.