

Desenvolvido por:



FUNDAÇÃO
renova

**PLANO DE TRABALHO PARA ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO
GEOMORFOLÓGICO DE TRECHOS DA BACIA DO RIO DOCE A
MONTANTE DA UHE RISOLETA NEVES**

Abril/2024



**PLANO DE TRABALHO PARA ATUALIZAÇÃO DO ESTUDO
GEOMORFOLÓGICO DE TRECHOS DA BACIA DO RIO DOCE A MONTANTE
DA UHE RISOLETA NEVES**

REVISÃO 03

Plano de Trabalho

PT-002_22535632_03

São Paulo / 2024

REVISÕES							
TE: A - PRELIMINAR C - PARA E - PARA CONSTRUÇÃO G - CONFORME CONSTRUÍDO CONHECIMENTO							
TIPO DE EMISSÃO: B - PARA APROVAÇÃO D - PARA COTAÇÃO COMPRADO F - CONFORME H - CANCELADO							
REV	TE	DESCRIÇÃO	POR	VER.	APR.	AUT.	DATA
00	B	Documento para a Fundação Renova	PHA MGR LFP	AF			31/08/2022
01	B	Documento para a Fundação Renova	PHA MGR LFP	AF			07/10/2022
02	B	Documento para a Fundação Renova	PHA LFP	MGR			01/02/2023
03	B	Documento para a Fundação Renova	PHA MVE	MGR			12/04/2024

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	10
	2.1 Objetivos Específicos	10
	2.2 Premissas, Exclusões e Limitações do Estudo	10
	2.2.1 Referentes às atividades de caracterização da geomorfologia	10
	2.2.2 Referentes às atividades de mapeamento de habitats	12
3	METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA GEOMORFOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
	3.1 Análise dos Dados Disponíveis em Outros Estudos (Pré e Pós Rompimento).....	16
	3.2 Caracterização Geomorfológica dos Segmentos do Rio Doce a Montante da UHE Risoleta Neves	17
	3.3 Mapeamento Geomorfológico das Principais Feições Fluviais	20
	3.4 Coleta de dados em campo.....	22
	3.5 Análise Integrada dos Cenários de Alterações Geomorfológica a Montante da UHE Risoleta Neves	26
	3.6 Resultados esperados.....	27
4	METODOLOGIA DA COMPLEMENTAÇÃO DO MAPEAMENTO DE HABITATS FÍSICOS	28
	4.1 Mapeamento sistemático de canais fluviais	29
	4.2 Classificação de habitats físicos	30
	4.3 Classificação de parâmetros complementares.....	35
	4.4 Cenários e procedimentos de análise	36
	4.5 Resultados esperados.....	36
5	CRONOGRAMA.....	38
6	EQUIPE TÉCNICA	39
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	ANEXO 1 – Relatório Técnico: Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão (RT-023_159-515-2282_01-J).....	43
	ANEXO 2 – Relatório Técnico: Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Relatório Final – Rev. 03.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Confluência dos Rios Gualaxo do Norte e Rio do Carmo na cidade de Barra Longa-MG.....	6
Figura 2 – Área do estudo geomorfológico a montante da UHE Risoleta Neves (Trechos 1 a 11). Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos contemplam as áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão	8
Figura 3 – Pontos de visita e coleta de dados em áreas afetadas e não afetadas. Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos contemplam as áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais bases de dados utilizadas no trabalho	16
Tabela 2 – Parâmetros geomorfométricos avaliados para caracterização do curso d'água	20
Tabela 3 – Classes geomorfológicas serão utilizadas para classificar o sistema fluvial do Rio Doce.	22
Tabela 4 – Coordenadas de pontos de visitas em Rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão que foram avaliados em 2016 e serão reavaliados (UTM, SIRGAS2000 23S)	23
Tabela 5 – Coordenadas de pontos de visitas em tributários não afetados pelo rompimento da barragem de Fundão que foram avaliados em 2016 ^(a) (UTM, SIRGAS2000 23S.....	24
Tabela 6 – Classificação das unidades geomorfológicas adotada no trabalho atual de complementação do mapeamento sistemático do canal fluvial ativo. Adaptado e traduzido de Rinaldi et. al (2015).....	34
Tabela 7 – Continuação da Tabela 6 . Classificação das unidades geomorfológicas adotada no trabalho atual de complementação do mapeamento sistemático do canal fluvial ativo. Adaptado e traduzido de Rinaldi et. al (2015).	35

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Relatório Técnico: Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão (RT-023_159-515-2282_01-J)

Anexo 2 – Relatório Técnico: Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Relatório Final – Rev. 03

1 INTRODUÇÃO

No dia 05 de novembro de 2015, a barragem de rejeitos de mineração de Fundão, operada pela mineradora Samarco no município de Mariana – MG, rompeu, liberando rejeitos para o sistema fluvial a jusante. A ruptura da barragem resultou na liberação de aproximadamente 43,7 Mm³ (milhões de metros cúbicos) de rejeitos, causando impactos expressivos nas áreas adjacentes aos cursos d'água afetados. O material liberado alcançou o córrego Santarém, atingindo posteriormente o rio Gualaxo do Norte até sua confluência com o rio do Carmo (**Figura 1**), que, junto com o rio Piranga, formam o rio Doce. Um grande volume de rejeitos ficou retido nos trechos a montante da Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves (Candonga) e no próprio reservatório da UHE, enquanto outra parte passou pelo reservatório, seguindo pelo rio Doce em direção ao mar como carga sólida.

Figura 1 – Confluência dos Rios Gualaxo do Norte e Rio do Carmo na cidade de Barra Longa-MG.



O impacto físico da onda de rejeitos e detritos resultante do rompimento da barragem de Fundão foi progressivamente atenuado à medida que o fluxo se movia para jusante e a largura da bacia e do canal fluvial aumentava. As barragens existentes na bacia do alto rio Doce, especialmente Candonga, desempenharam um papel importante na atenuação dos impactos causados pela passagem da onda de rejeitos e detritos.

Além de todo o impacto nas áreas adjacentes aos cursos d'água afetadas, o acúmulo de sedimentos, ou rejeitos no caso do rompimento da barragem de Fundão, pode ocasionar alterações

sem que haja extravasamento da calha regular do canal, especialmente nas margens ou em bancos de areia. Posteriormente à passagem da onda de rejeitos ocorreu remobilização de rejeitos depositados no sistema hídrico afetado, tanto em trechos a montante quanto a jusante da UHE Risoleta Neves, em função da dinâmica de sedimentos desse sistema.

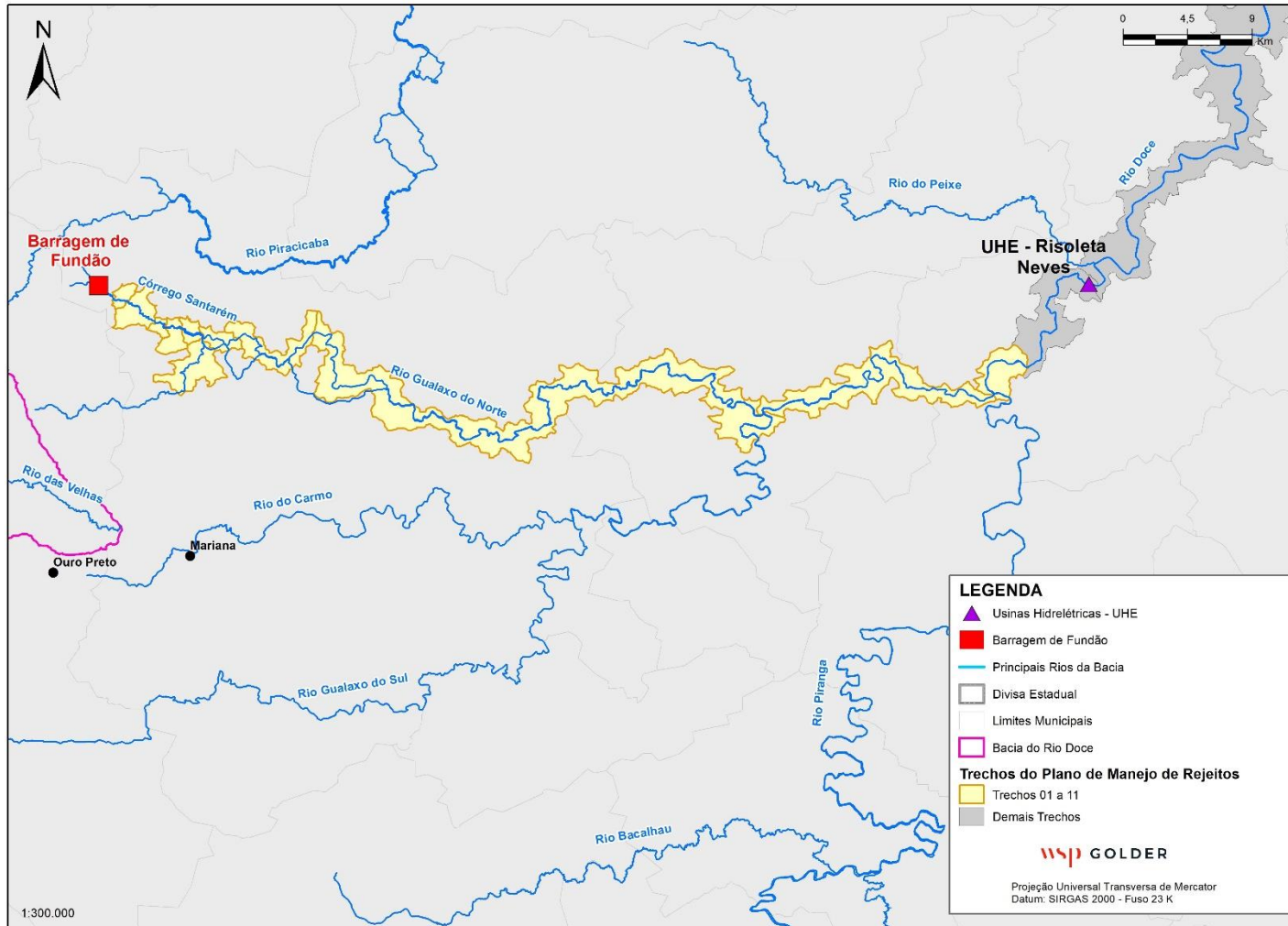
No contexto de diagnosticar e avaliar os cenários de recuperação física, é necessário conhecer de forma adequada a geomorfologia dos trechos afetados do sistema fluvial em questão, buscando identificar as alterações ocasionadas em decorrência do rompimento da barragem de Fundão, tais como os estudos de Golder (2016a) e NHC (2022).

Um primeiro estudo geomorfológico dos trechos fluviais afetados a montante da barragem de Candonga foi realizado em 2016 (Golder, 2016a), anteriormente às obras para reconformação de segmentos fluviais nesses trechos.

Em dezembro de 2021 foi publicada a Nota Técnica CT-GRSA nº17/2021, solicitando que *“a Fundação Renova realize a atualização do estudo geomorfológico entre os trechos 1 ao 11, nos moldes do estudo já realizado em 2016 pela Golder Associates para a Samarco Mineração S.A. (Relatório Técnico - Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão (RT-023_159-515-2282_01-J) e demonstrar a evolução geomorfológica dos rios estudados, comparando os dois estudos realizados e indicando as áreas de acúmulo ou depreciação de sedimentos, assim como as suas feições geomorfológicas”*. Neste sentido esse documento visa apresentar um plano de trabalho para atualização do estudo de caracterização geomorfológica fluvial dos trechos afetados a montante da barragem da UHE Risoleta Neves, dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, incluindo seus tributários (**Figura 2**).

O trabalho incluirá levantamentos e avaliações similares às realizadas no estudo geomorfológico realizado em 2016 (Golder, 2016a), inclusive com trabalhos de campo, com objetivo de atualização das informações e permitir uma comparação de aspectos geomorfológicos das áreas afetadas a montante da barragem de Candonga, em dois momentos distintos, logo após o rompimento da barragem de Fundão e atual. Neste plano de trabalho foi incluída também avaliações adicionais a partir do processamento de imagens orbitais, similares às descritas no plano de trabalho do estudo geomorfológico dos trechos do rio Doce a jusante da barragem de Candonga, com objetivo de manter consistência no trabalho entre os dois trechos (montante e jusante da barragem de Candonga), contemplando cenários de avaliações pré e pós rompimento da barragem de Fundão.

Figura 2 – Área do estudo geomorfológico a montante da UHE Risoleta Neves (Trechos 1 a 11). Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos contemplam as áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão



Em 2022 foi entregue o estudo de Mapeamento de Habitats Físicos (estudo entregue em agosto de 2022 por meio do ofício FR.2022.1297). O estudo foi elaborado pela consultoria NHC (NHC, 2022) e apresentou uma análise das características físicas dos rios do trecho de montante (T06 ao T11) em uma escala de *mesohabitats* (área de estudo apresentada na **Figura 2**). Foi feita a caracterização dos rios quanto a presença de quatro classes de mesohabitats e de composição predominante do leito fluvial para dois momentos pós rompimento e a definição da condição de referência, assumindo como tal a condição prévia ao rompimento para os rios do Carmo e Doce (T10 e T11), e como sendo a condição típica de rios da região similares para o rio Gualaxo do Norte, devido às inexistência de imagens aéreas históricas com resolução compatível à finalidade de mapeamento de habitats.

No dia 02 de outubro de 2023 a Nota Técnica 06/2023 sobre os documentos apresentados pela Fundação Renova referentes ao mapeamento dos habitats físicos dos Trechos 06 a 11 foi aprovada durante a 72ª Reunião Ordinária da CT-GRSA. A referida Nota Técnica aprova o estudo de mapeamento de habitats (NHC, 2022), e apresenta recomendações de complementação da avaliação realizada, com a inclusão de novas classes de habitats, e aprofundamento da análise integrada, incluindo informações de caracterização geomorfológica e das planícies de inundação. Foi acordado com a Fundação Renova que esses pontos seriam considerados no âmbito da execução dos estudos geomorfológicos à montante. Conforme apresentado, a atualização do Estudo Geomorfológico de Montante vai abarcar as recomendações feitas na Nota Técnica CT-GRSA nº 06/2023 e Deliberação CIF nº 729/2023, nos termos descritos na manifestação Ofício FR.2023.2704.

O plano de trabalho original apresentado para a atualização do Estudo Geomorfológico de Montante (Ofício FR.2023.0485) é anterior a Nota Técnica CT-GRSA nº 06/2023, e por isso foi atualizado considerando as recomendações. Para o atendimento a esses pontos, o cronograma precisou ser revisto, sendo o novo prazo de entrega do estudo previsto para junho de 2024 conforme apresentado no Capítulo 5 deste documento. O plano de trabalho atualizado das atividades é apresentado nos itens a seguir. De maneira geral, o conteúdo original do plano de trabalho já aprovado foi mantido. As revisões realizadas se limitam à inclusão de informações sobre a execução da atividade de complementação do mapeamento de habitats (item 4), contextualização sobre a inclusão no âmbito do estudo geomorfológico, cronograma e equipe técnica.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é verificar se há ocorrências de alterações da geomorfologia fluvial e aumento de feições deposicionais nos trechos afetados a montante da UHE Risoleta Neves, dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce e seus afluentes diretos (Trechos 01 a 11) que podem ser associadas ao rompimento da barragem de Fundão e/ou às atividades de reparação ambiental implementadas pela Fundação Renova.

2.1 Objetivos Específicos

- Atualizar a caracterização da Geomorfologia fluvial dos segmentos fluviais de cursos d'água afetados pelo rompimento da barragem de Fundão localizados nos trechos de manejo 01 a 11;
- Avaliar, a partir de imagens de satélite de alta resolução, alterações na geomorfologia fluvial dos cursos d'água afetados, considerando condições pré e pós o rompimento com base em um conjunto de imagens obtido na estação seca do ano, compreendendo um período de avaliação entre 2013 e 2022.
- Complementar a avaliação as alterações físicas do leito fluvial nos trechos de manejo 06 a 11 feita no âmbito do estudo de mapeamento de habitats, incluindo maior discretização das classes de habitats utilizadas, e avaliação em conjunto com informações da caracterização geomorfológica e das planícies de inundação.

2.2 Premissas, Exclusões e Limitações do Estudo

Entende-se como premissas, exclusões e limitações desse estudo os itens descritos abaixo.

2.2.1 Referentes às atividades de caracterização da geomorfologia

Premissas:

- Serão realizadas caracterizações geomorfológicas a partir de visitas em campo e avaliação de dados secundários. Essas descrições geomorfológicas serão semelhantes ao realizado por Golder (2016a);

- Serão utilizadas imagens orbitais de alta resolução para a avaliação temporal das feições geomorfológicas, sobretudo aquelas feições formadas a partir do depósito de sedimentos. Nesse estudo serão utilizadas imagens de maior resolução, se comparado o estudo de 2016 (Golder, 2016a), além de ser realizada a avaliação de um conjunto maior de imagens (2013 a 2022);
- O trabalho será realizado apenas na área afetada pela deposição de rejeitos a montante da UHE Risoleta Neves. Serão visitadas também áreas localizadas fora da área afetada, com o intuito de caracterizar cursos d'água para referência que apresentam semelhanças com os cursos d'água afetados. A metodologia de avaliação será semelhante àquela executada por Golder (2016a);
- Serão realizados trabalhos de campo conforme realizado por Golder (2016a). Haverá nesse estudo a inclusão da avaliação granulométrica em alguns pontos, sendo a coleta das amostras de sedimento realizadas na superfície (i.e., não é prevista sondagem para coleta de amostras);
- A metodologia empregada na presente avaliação geomorfológica será semelhante àquela utilizada por Golder (2016a). Ressalta-se que será utilizado um banco de dados mais extenso, contemplando também estudos realizados entre 2016 e 2022.
- Os cenários avaliados serão:
 - Cenário de avaliação Pré-rompimento e Pós-rompimento: Condição de referência da situação geomorfológica nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce e afluentes afetados à montante da UHE Risoleta Neves, considerando a situação pré rompimento e pós rompimento. Ao avaliar esse cenário serão utilizadas imagens de satélite do período entre 2013 e 2022.
 - Cenário de avaliação após o rompimento da barragem de Fundão: Condição de referência da situação geomorfológica de 2016 e 2022, avaliando as alterações provocadas pela dinâmica natural dos ambientes estudados, além do reflexo das ações de restauração implementadas pela Fundação Renova.

Exclusões:

- Execução de sondagens para identificação em campo de evidências visuais de rejeito. A avaliação será realizada apenas na camada superior;

- Execução de novo estudo hidrossedimentológico;
- Medição da vazão de curso d'água em campo;
- Caracterização geoquímica de solos e sedimentos.

Limitações:

- As avaliações apresentadas nesse estudo estarão limitadas pela disponibilidade de imagens de alta resolução nos bancos de dados de fornecedores desse tipo de produto. Será considerado nesse estudo o período de consulta entre 2013 e 2022, sendo 2 anos pré rompimento e 7 anos pós rompimento da barragem de Fundão;
- A escala de trabalho e nível de detalhamento serão limitados à precisão posicional das imagens disponibilizadas;
- A identificação de feições geomorfológicas na calha dos rios afetados por meio de imagens é influenciada pela cota dos cursos d'água investigados, que pode variar mesmo na comparação entre períodos secos. Será feita uma verificação da cota desses rios nos períodos em que as imagens estiverem disponíveis utilizando dados de monitoramento eventualmente disponíveis. Entretanto, a variação de cota pode gerar um componente adicional de incerteza na avaliação;
- No estudo geomorfológico proposto não é previsto cálculo de taxas de assoreamento ou erosão. Serão avaliadas alterações em feições geomorfológicas (e.g., tendência de aumento de bancos de areia em uma determinada região) antes e após o rompimento da barragem de Fundão e a eventual relação dessas alterações com o rompimento.

2.2.2 Referentes às atividades de mapeamento de habitats**Premissas:**

- Serão reavaliadas as imagens utilizadas no estudo original de mapeamento de habitats para caracterização do ano base 2021, dos rios da região para a definição da condição de referência para os trechos T06 à T09 e das imagens históricas utilizadas para definição da condição de referência para os trechos T10 e T11;
- Entende-se que a complementação do estudo tem por objetivo fornecer informações adicionais quanto as características físicas dos rios afetados que poderão ser

utilizadas para fins de planejamento de outras atividades de recuperação ambiental. Deste modo, a avaliação da informação mais recente disponível é suficiente e adequada, não sendo necessária avaliação de momentos intermediários;

- A avaliação em conjunto com os resultados do estudo geomorfológico será limitada aos rios afetados devido à área de estudo do estudo geomorfológico não englobar todos os rios de referência;
- A apresentação de croquis tipo de cada habitat será baseada na literatura e em dados de campo existentes, caso aplicável;
- A metodologia empregada na presente complementação será semelhante àquela utilizada por NHC (2022), delimitação de habitats, e de outras características físicas dos rios, baseada em imagens aéreas de altíssima resolução, porém será utilizado outro padrão de classificação, o qual é baseado em Rinaldi et. al (2015). Maiores detalhes no item 4;
- Os cenários avaliados serão equivalentes às condições Pré-rompimento (referência) e Pós-rompimento (ano 2021), previamente definidos e avaliados no estudo original (NHC, 2022):
 - Cenário de referência para o Rio Gualaxo do Norte (T06 à T09) será baseado em informações levantadas em trechos de rios da região, não afetados pelo rompimento e com características similares ao rio Gualaxo do Norte, e em seleção de imagens do rio Gualaxo do Norte anteriores ao rompimento;
 - Cenário de referência para o Rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11) será baseado em imagens anteriores ao rompimento;
 - Cenário Pós-rompimento para o ano de 2021 será baseado em imagens de altíssima resolução levantadas por sobrevoo de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado, popularmente conhecido como DRONE) no âmbito do estudo original (NHC, 2022).
- Serão avaliados habitats físicos (geoformas) emersas, submersas e de vegetação incluindo toda a área do canal de margens plenas, conforme solicitado pela Nota Técnica CT-GRSA 06/2023 (conceito apresentado de “canal ativo”);

- A avaliação integrada dos habitats físicos ao longo do “continuum fluvial” será realizada, identificando os trechos de maior diversidade/complexidade conforme requerido pela Nota Técnica CT-GRSA 06/2023;
- Análises estatísticas similares às realizadas no estudo original (NHC, 2022) serão realizadas incluindo as novas classes de habitats físicos, ou agrupamento delas, conforme requerido pela Nota Técnica CT-GRSA 06/2023;

Exclusões:

- Não está previsto levantamento de novas imagens ou análise de imagens adicionais àquelas utilizadas no estudo original (NHC, 2022);
- Não está previsto análise de cenários diferentes daqueles previamente analisados no estudo original (NHC, 2022);
- Não está previsto reavaliação das imagens do ano base 2019;
- Assim como no estudo original (NHC, 2022), não são previstas realização de amostragem do sedimento do leito ao longo dos rios impactados, nem levantamentos de campo adicionais;
- Não estão previstas análises por modelos computacionais;
- Não está prevista a avaliação biológica de habitats.

Limitações:

- As avaliações apresentadas nesse estudo estarão limitadas aos cenários de avaliação previamente definidos no estudo original (NHC, 2022), exceto cenário 2019;
- Trata-se de uma complementação do estudo de mapeamento de habitats, com uma reavaliação em maior grau de detalhamento das condições observadas em 2021 e para a referência de momento pré-rompimento, de modo que as análises são limitadas às informações levantadas no âmbito do estudo original. Levantamentos de campo adicionais não seriam representativos da situação em 2021 (mas sim do cenário referente ao momento atual), portanto não foram realizados. Adicionalmente, considerando a necessidade de se realizar o levantamento de imagens no período seco, e a data de publicação da Nota Técnica CT-GRSA nº

07/2023, um eventual levantamento de campo seria realizado somente na estação seca de 2024, o que culminaria na conclusão do estudo no início do ano de 2025;

- A impossibilidade de se avaliar diretamente a condição do rio Gualaxo do Norte antes do rompimento é uma fonte de incerteza inerente. A abordagem originalmente utilizada para minimização da incerteza foi por meio da seleção de um número de trechos de rios da região que garantisse robustez estatística na comparação dos resultados. No entanto essa avaliação considerava o padrão de classificação de habitats originalmente utilizado. O aumento do número de classes requerido implicará em redução da robustez estatística das análises.

3 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA GEOMORFOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Análise dos Dados Disponíveis em Outros Estudos (Pré e Pós Rompimento)

O estudo intitulado “Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão”, elaborado por Golder (2016a) (Anexo 1), será a principal referência utilizada nesse trabalho. Este relatório teve como objetivo principal levantar informações geomorfológicas de áreas impactadas e não impactadas, para fins de caracterização e determinação de áreas prioritárias, a fim de subsidiar as ações restauração ambiental nas áreas atingidas pela deposição de rejeito às margens do Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce.

Além desse relatório, serão consultados também estudos que incluem mapeamentos dos depósitos de rejeito identificados na área de estudo, notadamente os Planos de Manejo de Rejeitos (PMRs) dos Trechos 6 a 11. A lista de estudos e de bases de dados indicada na **Tabela 1** é uma referência inicial e poderá ser complementada com base da revisão bibliográfica a ser realizada para este trabalho.

Tabela 1 – Principais bases de dados utilizadas no trabalho

BASE DE DADOS	FONTE	DESCRIÇÃO
Base de dados da Fundação Renova	Dados secundários	Arquivos vetoriais contendo a informações a respeito da área de estudo. Localização dos trechos utilizados para o manejo de rejeitos pela Fundação Renova
Postos fluviométricos da ANA (e.g., Hidroweb da ANA)	Dados secundários	Base de dados de acesso público, disponibilizada em formato de tabela. Total de 6 seções disponíveis para a região de trabalho
Imagens orbitais adquiridas e disponibilizadas pela Fundação Renova	Dados secundários	Imagens orbitais obtidas por sensores com resolução variada de 0,5 m a 5 m, nas bandas R,G,B e infravermelho próximo (adquiridas preferencialmente no período seco do ano)
Arquivos vetoriais e matriciais produzidos por Instituições Públicas e Privadas	Dados secundários	Arquivos vetoriais e matriciais produzidos por instituições de pesquisa e disponibilizados em plataformas livres. Ex: Limites estaduais e municipais, Mapeamentos Geomorfológicos.
Relatório Técnico – Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da	Dados secundários	Primeira versão do estudo geomorfológico. Inclui também arquivos vetoriais e

BASE DE DADOS	FONTE	DESCRIÇÃO
Barragem de Fundão (RT-023_159-515-2282_01-J) (Golder, 2016a)		matriciais produzidos para a elaboração do trabalho
Levantamento topográfico LiDAR (2015 e 2019)	Dados secundários	Dados topográficos ao longo do Rio Doce, obtidos por imageamento aéreo com equipamentos a laser (LiDAR)
Plano de Manejo de Rejeitos dos Trechos 6 a 11 (JACOBS CH2M, 2018)	Dados secundários	Inclui informações de sondagens realizadas intracalha e extracalha, além da informação da espessura de rejeito depositado
Monitoramento Intracalha (WSP Golder, 2022)	Dados secundários	Inclui informações de sondagens no contexto intracalha, apresentando profundidade e cota do curso d'água
Monitoramento do Transporte de Sedimentos (WSP Golder, 2022)	Dados secundários	Este monitoramento inclui medições de vazão, velocidade d'água, concentração de sólidos em suspensão totais (SST), turbidez e cálculo de descarga de leito e suspensão.
Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência (NHC, 2022)	Dados secundários	Serão consultadas as bases cartográficas confeccionadas, sendo imagens aéreas atualizadas e Modelo Digital de Superfície
Levantamento topográfico em campo	Dados primários	Levantamento topográfico de seção transversal utilizando equipamento de topografia convencional (GPS de precisão, Estação total)
Levantamento batimétrico de seções transversais	Dados primários	Levantamento batimétrico para compor perfil transversal de seções fluviais

3.2 Caracterização Geomorfológica dos Segmentos do Rio Doce a Montante da UHE Risoleta Neves

Nesta etapa do projeto, será realizada a caracterização física geral dos trechos da área de estudo local (AEL) e área de estudo regional (AER) (Trechos 01 a 11) para identificação dos seguintes parâmetros:

- ✓ Delimitação dos segmentos de trabalho, de acordo com o estabelecido por Golder (2016a). Obtenção em escritório das coordenadas (latitude e longitude) referentes aos pontos iniciais e finais de cada trecho;
- ✓ Comprimentos longitudinais de cada trecho, caracterização das larguras médias e mínimas por trecho, obtidas a partir de imagens de satélite;
- ✓ Declividade média do trecho obtida a partir dos dados do LiDAR;

- ✓ Áreas de drenagem acumuladas no final do trecho e área de drenagem incremental de cada trecho, obtidas por meio de processamento de MDE ou da base de ortofotogrametrias;
- ✓ Vazões médias e vazões máximas das máximas anuais, obtidas a partir de regionalizações;
- ✓ Profundidade média do trecho a partir de dados topográficos obtidos em campo (Descritos na Seção 3.4.) além da utilização de dados secundários de outros estudos já executados pela Fundação Renova, tais como o Plano de Manejo de Rejeitos, através da informação da lâmina d'água durante a execução das sondagens, além do projeto de monitoramento de sedimentos intracalha e de transporte de sedimentos, em execução pela WSP.

A AEL compreende os trechos de rios diretamente afetados pelo rompimento da barragem de rejeitos e consiste na parte a jusante que se estende aproximadamente da confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Córrego Santarém seguindo a jusante até a entrada do Reservatório de Candonga no Rio Doce. Os cursos d'água incluídos na AEL são o Rio Gualaxo do Norte, o Rio do Carmo e o Rio Doce, além dos tributários desses rios afetados pela deposição de rejeito.

O trecho do rio Gualaxo do Norte avaliado neste estudo se estende da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte, incluindo a área de refluxo à montante no Rio Gualaxo do Norte seguindo a jusante até a confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo, no município de Barra Longa. O comprimento é de aproximadamente 72 km e a área total da bacia é de aproximadamente 562 km². Com a introdução das águas do Rio Carmo, a área da bacia drenada pelo rio aumenta significativamente a jusante da confluência do Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo;

O trecho do Rio do Carmo avaliado neste estudo se estende da confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo, incluindo a área de refluxo à montante no Rio do Carmo (no Município de Barra Longa) até a confluência do Rio do Carmo com o Rio Doce. O comprimento é de aproximadamente 25 km e a área total da bacia é de aproximadamente 2.282 km². Com a introdução das águas do Rio Doce, a área da bacia drenada pelo rio aumenta significativamente a jusante da confluência do Rio do Carmo e Rio Doce;

O trecho do Rio Doce avaliado neste estudo se estende da confluência do Rio do Carmo com o Rio Doce seguindo a jusante até a entrada do Rio Doce no Reservatório de Candonga (limite mais a jusante da AEL). O comprimento é de aproximadamente 7 km, sendo a área total da bacia

de aproximadamente 8.917 km². Este segmento termina no limite a montante do Reservatório de Candonga (próximo ao cruzamento com a BR-120, aproximadamente 10 km do Reservatório de Candonga).

A AER compreende a AEL, assim como os afluentes, riachos e rios da bacia do Rio Doce que não foram diretamente afetados pelos rejeitos do rompimento. Dados coletados na AER ajudarão a entender as condições naturais dos rios na bacia do Rio Doce. Estes pontos estão localizados em i) tributários menores nas bacias que drenam para a AEL, e ii) cursos d'água de tamanho similar adjacentes à AEL e inseridos na bacia do Rio Doce. Exemplos de cursos d'água analisados neste estudo incluem os rios do Carmo (a montante da confluência com Rio Gualaxo do Norte), Rio Gualaxo do Sul, Rio Piranga, Rio Bacalhau, Rio Pirapetinga, Rio Piracicaba e Rio do Peixe.

Em seguida, será realizada uma divisão dos trechos da área de estudo em extensões menores, denominadas “segmentos” para uma classificação geomorfológica mais detalhada. Esta segmentação será realizada agrupando os trechos contínuos do Rio Gualaxo do Norte, Rio Carmo e Rio Doce com variáveis geomorfológicas similares, atribuindo a cada segmento a classe geomorfológica correspondente (e.g., cânions, confinado, estreito, largo de planície de inundação pequeno, largo de planície de inundação grande).

As variáveis geomorfológicas a serem utilizadas para essa classificação serão obtidas em ambiente GIS, contando com o uso de 2 Modelos Digitais de Elevação (MDE), obtidos pela tecnologia LiDAR, sendo um do ano de 2015 (utilizado por Golder, 2016a) com data posterior ao rompimento da barragem de Fundão, e outro MDE do ano de 2019, fruto da atualização da base cartográfica elaborada pela Fundação Renova. Ambos levantamentos topográficos encontram-se disponibilizados no portal de repositório GIS da Fundação Renova. As principais características ao longo dos cursos d'água serão observadas com uma escala de visualização de 1:10.000. Características-chave observadas ao longo do rio principal serão usadas para identificar e delinear as diferentes tipologias de segmentos geomorfológicos. Serão utilizados alguns parâmetros para avaliar os cenários de 2016 e 2022 (**Tabela 2**), não sendo prevista nesta etapa a identificação de mudanças em relação a cenários pré e pós-rompimento da barragem de Fundão.

Tabela 2 – Parâmetros geomorfométricos avaliados para caracterização do curso d’água

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
Largura do leito maior	Determinada a partir dos dados topográficos LiDAR e
Profundidade máxima na seção transversal	Determinada a partir de levantamento batimétrico
Profundidade média	Profundidade média do trecho a partir de dados topobatimétricos obtidos em campo (Descritos na Seção 3.4), além da utilização de dados secundários de outros estudos já executados pela Fundação Renova, tais como o Plano de Manejo de Rejeitos, através da informação da lâmina d’água durante a execução das sondagens, além do projeto de Monitoramento de Transporte de Sedimentos, em execução pela WSP.
Largura sujeita a inundação	Determinada como a largura média da planície de inundação. Essa variável será determinada apenas no ponto de visita de campo. Será utilizada a metodologia de determinação do nível W_m (Rosgen, 1994). Esse nível é determinado duplicando o valor da profundidade do canal em nível de margem plena (P), sendo estabelecida a cota de inundação do rio para aquele setor específico
Declividade de segmento fluvial	Determinada a partir dos dados topográficos LiDAR.
Materiais do leito do canal	Determinada a partir de coleta de sedimentos e análise granulométrica em laboratório.
Configuração em planta do canal	Classificação do curso d’água. Classe: Meandro, reto, traçado, fluxo simples, fluxos múltiplos, etc.
Sinuosidade	Medição em escritório, usando o software GIS.
Largura do cinturão dos meandros	Medição em escritório, usando o software GIS.
Comprimento do meandro	Medição em escritório, usando o software GIS.
Amplitude dos meandros	Medição em escritório, usando o software GIS.

3.3 Mapeamento Geomorfológico das Principais Feições Fluviais

Similar ao proposto no estudo Geomorfológico para os trechos a jusante da UHE Risoleta Neves, avaliado pela Nota Técnica CT-GRSA nº 17/2022, será realizada a avaliação de possíveis impactos geomorfológicos associados ao rompimento da barragem de Fundão, a partir da análise de imagens pré e pós-rompimento. Para tal, a equipe de trabalho utilizará ferramentas de geoprocessamento voltadas para a classificação supervisionada de imagens. De acordo com Grizio & De Souza Filho (2011) a avaliação da mobilidade de canais fluviais pode ser feita de forma direta, com monitoramento de campo, ou de forma indireta, por meio de análise temporal a partir do uso de produtos cartográficos e/ou de sensoriamento remoto de diferentes datas. Ao usar o sensoriamento remoto, os dados obtidos são reflexo de uma medida direta pela superposição de

imagens de resolução métrica a submétrica. Para isso é necessário que os produtos estejam adequadamente corrigidos em termos de sua geometria. Sendo assim, todo o conjunto de imagens passará por um processo prévio de validação posicional, o que promoverá uma garantia da qualidade cartográfica. Todo o processo será aplicado para o conjunto de imagens disponibilizado (Período de 2013 a 2022, nos períodos de seca).

Na classificação supervisionada serão utilizadas técnicas de aprendizagem de máquina para a extração de informações a partir de conhecimento a priori do usuário. Serão selecionados alvos na imagem que servirão para treinar o algoritmo a procurar objetos semelhantes (Shiba et al., 2005). Para essa tarefa será elaborado um banco de dados com amostras coletadas em todo o conjunto de imagens. A coleta de dados será realizada a partir de polígonos georreferenciados, em quantidade equilibrada entre as classes geomorfológicas identificadas. Posteriormente, será realizada a conversão dos polígonos em pontos e extraída a informação espectral de cada imagem para cada ponto. Ao final o banco de dados será composto de uma matriz contendo: coordenadas de cada ponto, informações espectrais de cada banda da imagem e a classe geomorfológica relacionada. Parte do conjunto de dados será submetido a testes de algoritmos de classificação (MaxVer, Random Forest e outros), e aquele que apresentar o melhor desempenho, será utilizado para classificação de todo o conjunto de dados. Ao final da classificação serão gerados índices de acurácia do modelo, utilizados para indicar a assertividade da classificação. Para as classes que apresentarem maiores índices de erro, serão geradas amostras extras e uma nova classificação será realizada. O produto final da classificação será um arquivo em formato *raster* de classes geomorfológicas. Cada *raster* gerado será convertido para formato vetorial para fins de cálculo de área e identificação das feições alteradas. Além da validação da classificação por dados externos, cada limite de polígono identificado será revisado pelos especialistas de forma detalhada, com a escala de trabalho de no máximo 1:5000.

Na **Tabela 3** são apresentadas as principais classes geomorfológicas identificadas em estudos prévios e que serão utilizadas para classificar o sistema fluvial do Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce.

Tabela 3 – Classes geomorfológicas serão utilizadas para classificar o sistema fluvial do Rio Doce.

CLASSE GEOMORFOLÓGICA	DESCRIÇÃO
Barras arenosas	As barras arenosas constituem formas deposicionais de material de fundo que emergem à superfície da água ou que se encontram parcialmente submersas
Água	Superfície ocupada pela água no canal de drenagem do Rio Doce
Ilhas Fluviais	Ilhas Fluviais são aquelas que são circundadas pelas águas de um rio. A origem das ilhas fluviais pode ser desde a elevação natural de uma porção do terreno que foi preservada das águas, até mesmo a sedimentação feita pelo rio que acumulou material naquele lugar, dando origem a uma ilha.
Afloramentos rochosos	Surgimentos de rocha à superfície da água
Cachoeiras e quedas d'água	Formações geomorfológicas na qual um curso de água corre por cima de uma rocha de composição resistente à erosão, formando degraus com desnível acentuado

Os resultados obtidos na etapa de classificação das imagens serão submetidos a uma comparação direta entre pares de imagens (pré evento x pós evento), além de uma evolução temporal (pré evento x conjunto de imagens pós evento). Ao final será gerado um arquivo vetorial com as mudanças identificadas (remobilização e deposição de sedimento), possibilitando calcular a área alterada para cada feição dentro de cada segmento.

3.4 Coleta de dados em campo

Conforme realizado por Golder (2016a), serão realizadas visitas de campo para a coleta de informações ambientais atualizadas, tais como a descrição da condição da margem, presença de vegetação, presença de atividades antrópicas. Durante essas visitas serão avaliados os principais aspectos geomorfológicos locais, a fim de subsidiar a atualização da caracterização geomorfológica já realizada em 2016. Adicionalmente serão coletadas informações como abundância de cada feição na área, indícios de processos erosivos, além de informações a respeito da granulometria dos sedimentos depositados no fundo do leito fluvial. Para essa caracterização serão coletadas até 3 amostras da camada superficial do sedimento depositado intracalha, limitada a uma profundidade de 20 cm. Os pontos de coleta serão dispostos transversalmente ao curso d'água. As amostras serão coletadas de acordo com as normas descritas no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011).

Além dessas informações a respeito do material de fundo, será realizada a mensuração *in loco* da seção transversal fluvial com o auxílio de equipamentos de topografia e batimetria. Esse trabalho será realizado apenas nos pontos determinados na **Tabela 4** e na **Tabela 5** e servirão como referência das características ambientais do segmento avaliado. Todo o trabalho será documentado através de fotos georreferenciadas (uma central e as demais a jusante e montante do ponto) e fichas de campo. Em ambiente SIG, essas informações serão relacionadas com as feições identificadas nas imagens orbitais.

Considera-se realizar os trabalhos de campo nos mesmos pontos que foram avaliados em Golder (2016a), cuja localização é mostrada na **Figura 3** e suas coordenadas são apresentadas na **Tabela 4** e **Tabela 5**. Em relação aos pontos em tributários não afetados, será feita uma reavaliação da sua localização, visando verificar se há outros pontos que eventualmente possam fornecer uma melhor base de comparação com os segmentos em cursos d'água afetados. A localização dos pontos de avaliação em tributários não afetados poderá ser alterada para contemplar os mesmos locais de estudo utilizados no estudo de Mapeamento de Habitats Físicos nos Trechos T06 à T11, elaborado por NHC em 2022. Os tributários afetados serão avaliados a partir do uso de sensoriamento remoto, descrito na seção 3.3.

Tabela 4 – Coordenadas de pontos de visitas em Rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão que foram avaliados em 2016 e serão reavaliados (UTM, SIRGAS2000 23S)

AVALIAÇÃO DE CAMPO DE RIO PRINCIPAL AFETADO	LESTE	NORTE	NOME DO RIO
SG01	677218	7758119	Gualaxo do Norte
SG02	677695	7757941	Gualaxo do Norte
SG03	680349	7755287	Gualaxo do Norte
SG04	680791	7755428	Gualaxo do Norte
SG05	682921	7753899	Gualaxo do Norte
SG06	685223	7753599	Gualaxo do Norte
SG07	686244	7753852	Gualaxo do Norte
SG08	687682	7754325	Gualaxo do Norte
SG09	687908	7756534	Gualaxo do Norte
SG10	688157	7757307	Gualaxo do Norte
SG11	690545	7757511	Gualaxo do Norte
SG12	691886	7757185	Gualaxo do Norte
SG13	693773	7757595	Gualaxo do Norte
SG14	696306	7758904	Gualaxo do Norte
SG15	698921	7758023	Gualaxo do Norte

AVALIAÇÃO DE CAMPO DE RIO	LESTE	NORTE	NOME DO RIO
PRINCIPAL AFETADO			
SG16	699606	7756476	Gualaxo do Norte
SG17	700794	7756141	Gualaxo do Norte
SG18	701797	7755935	Gualaxo do Norte
SG19	702544	7755603	Rio do Carmo
SG20	705705	7755898	Rio do Carmo
SG21	708973	7757208	Rio do Carmo
SG22	711014	7758793	Rio do Carmo
SG23	714226	7756888	Rio do Carmo
SG24	717309	7758265	Rio Doce

Tabela 5 – Coordenadas de pontos de visitas em tributários não afetados pelo rompimento da barragem de Fundão que foram avaliados em 2016^(a) (UTM, SIRGAS2000 23S)

AVALIAÇÃO DE CAMPO DE	LESTE	NORTE	NOME DO RIO
TRIBUTÁRIO NÃO AFETADOS			
ST01	663897	7757194	Gualaxo do Norte
ST02	666985	7757751	Camargo
ST03	678026	7770379	Piracicaba
ST04	686718	7758149	Águas Claras
ST05	704905	7757622	Água Fria
ST06	710021	7757088	Quebra Canoa
ST07	716332	7768880	Peixe
ST08	669412	7746833	Rio do Carmo
ST09	676916	7749140	Rio do Carmo
ST10	697084	7748993	Rio do Carmo
ST11	701237	7753816	Rio do Carmo
ST12	672410	7735224	Gualaxo do Sul
ST13	687785	7745134	Gualaxo do Sul
ST14	688161	7745576	Cachoeira do Brumado
ST15	676510	7711258	Piranga
ST16	680341	7712839	Pirapetinga
ST17	705761	7722892	Piranga
ST18	706140	7725656	Bacalhau

(a): Parte desses pontos poderão ser relocados. O restante será reavaliado.

Estes pontos de avaliação de campo estão situados principalmente ao longo do rio principal e acompanham o trajeto do fluxo de detritos, água e rejeitos do rompimento desde a confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte, até o Rio do Carmo, estendendo-se até a entrada do Rio Doce no Reservatório da UHE Risoleta Neves.

Figura 3 – Pontos de visita e coleta de dados em áreas afetadas e não afetadas. Trechos do Plano de Manejo de Rejeitos contemplam as áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão



3.5 Análise Integrada dos Cenários de Alterações Geomorfológica a Montante da UHE Risoleta Neves

Será feita uma avaliação da evolução das feições geomorfológicas identificadas, incluindo períodos antes e após o rompimento da barragem de Fundão, buscando identificar as principais alterações ocasionadas pelo fluxo de detritos e deposição de rejeito, avaliando se essas alterações cessaram a partir das ações de recuperação implementadas de pela Fundação Renova, ou se foram intensificadas ao longo dos anos. Adicionalmente, serão utilizados resultados do estudo hidrossedimentológico em elaboração pela Fundação Renova, além dos dados do projeto de monitoramento de transporte de sedimentos que se encontra em execução também pela Fundação Renova.

Com base no mapeamento das feições geomorfológicas será realizada uma avaliação geral das mudanças ocorridas no período avaliado, especificando as alterações (i.e., alteração de área total das feições) para cada segmento geomorfológico definido para este trabalho e alterações nas seções que foram avaliadas em Golder (2016a) e que serão reavaliadas neste estudo. Será dada ênfase a identificação de alterações em barras arenosas para avaliação da sedimentação, além das características fluviais do curso d'água avaliado, tais como a alteração do trajeto do canal principal.

Nessa avaliação serão comparados mapeamentos de períodos com condições hidrológicas similares, visto que o nível de água dos cursos d'água avaliados pode influenciar o reconhecimento de feições geomorfológicas por meio de imagens aéreas (e.g., um banco de areia ser identificado no período de seca e não no período de chuva, devido a alteração da cota do rio). Dessa forma, mesmo em períodos sazonais similares (i.e., seca ou chuva), serão observadas as condições de cota do rio Doce, para verificar se os dados obtidos a partir do processamento de imagens podem ser comparados diretamente ou se variações de cota podem influenciar os resultados.

A seguir, é apresentado um resumo da metodologia de análise e validação das alterações geomorfológicas:

1. Compilação de dados secundários;
2. Visitas de campo para a coleta de informações;
3. Identificação de alteração do trajeto do canal principal, bancos de areia e ilhas a partir da análise de imagens de alta resolução;
4. Conversão dos arquivos em de polígonos individualizados e cálculo de áreas das feições geomorfológicas;

5. Avaliação de alterações nas feições fluviais dos cursos d'água afetados, contemplando períodos de avaliação pré e pós rompimento (2013 a 2022).

3.6 Resultados esperados

Conforme descrito anteriormente, além da avaliação dos parâmetros geomorfométricos, será apresentada a atualização da descrição geomorfológica considerando as condições atuais e atualizada a discussão sobre o regime de sedimentos, apresentando informações a respeito da carga em suspensão e de fundo, carga natural regional e carga de sedimentos a partir das planícies de inundação com rejeitos.

Serão avaliados também dois cenários, sendo um com uma avaliação considerando o que foi descrito por Golder (2016a) comparativamente às condições atuais, e um cenário de avaliação, a partir de um conjunto de imagens orbitais, das condições pré e pós rompimento. As alterações do sistema fluvial podem estar relacionadas tanto às características naturais do ambiente avaliado, como a formação natural de feições geomorfológicas deposicionais (barras arenosas e ilhas), quanto aos efeitos do rompimento da barragem de Fundão e das ações de reparação executadas pela Fundação Renova. Assim, espera-se avaliar nesse trabalho a dinâmica dessas feições deposicionais, suas relações com o evento de ruptura da barragem de Fundão e como essas mudanças podem ser ou não prejudiciais para as condições hidráulicas/hidrológicas/ambientais do rio. Para isso, serão considerados alguns critérios de referência, como:

- Condições geomorfológicas prévias ao evento, quando disponíveis;
- Condições de sistemas fluviais fora da área afetada pelo evento e que possuam semelhanças geomorfológicas e hidráulicas com os rios avaliados;
- Características ambientais que possam estar contribuindo para a alteração dessas feições.

Os resultados obtidos serão apresentados em forma de relatório técnico, acompanhado por mapas, arquivos vetoriais e matriciais.

4 METODOLOGIA DA COMPLEMENTAÇÃO DO MAPEAMENTO DE HABITATS FÍSICOS¹

As características físicas de um rio (sumarizadas pelo parâmetro habitat físico) possuem forte relação com o funcionamento do sistema fluvial, sendo um fator de grande importância para a recuperação ambiental de rios que sofreram impactos de natureza física (como o caso da área de estudo).

Habitats físicos podem ser definidos como uma composição de áreas que possuem características físicas morfológicas (material predominante na camada ativa, superficial, e forma do leito) e características hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento) distintas. Esses trechos de diferentes naturezas fornecem também habitats distintos para os organismos aquáticos (Montgomery & Buffington, 1997, 1998; Bisson e colaboradores, 2017).

Diferentes escalas de trabalho podem ser utilizadas para a avaliação de habitats, ainda que a literatura apresente variações, há um certo consenso na separação em três escalas: macrounidades; unidades e microunidades. Rinaldi et. al (2015) apresenta uma extensa revisão de literatura sobre o tema, definindo que para macroescala (mesohabitats) a escala de trabalho é da ordem de grandeza de 1 metro a 1 km, em outras palavras, estruturas menores que 1 m não são discretizadas nesta escala e maiores que 1 km passam a ser demasiadamente grandes para serem representadas nesta escala, e se caracteriza por apresentar uniformidade em nível de trecho ou subtrecho geomorfológico, sendo seu tamanho mínimo equivalente a uma unidade de habitat. A unidade de habitat, conforme definida no parágrafo anterior, é caracterizada como área de significativo porte dentro de uma macrounidade que apresenta característica hidráulica e de substrato uniforme. De maneira análoga, os microhabitats são definidos como pequenas áreas dentro de uma unidade com característica hidráulica e de substrato uniformes, variando de 1 até 50 cm.

O trabalho original (NHC, 2022) foi realizado considerando macroescala, sendo delimitados mesohabitats para o canal molhado (cascatas, corredeiras, rápidos e remansos). No presente trabalho a complementação do mapeamento considera unidades e algumas subunidades, conforme definido em Rinaldi et. al (2015), para o canal de margens plenas, que inclui o canal molhado e

¹ As informações apresentadas ao longo do item 4 são de autoria dos técnicos da empresa NHC Brasil Consultores, Ltda, empresa que executará as atividades previstas neste item.

áreas secas. Nos itens a seguir são apresentadas mais informações quanto ao procedimento de mapeamento de habitats e da classificação utilizada no estudo original e no presente trabalho de complementação.

4.1 Mapeamento sistemático de canais fluviais

A identificação de habitats físicos e seu mapeamento é realizado, via de regra, com base em avaliação visual. Considerando o prazo necessário para percorrer e avaliar em detalhes todo o trecho do estudo in loco, além do difícil acesso por terra em parte do trecho a ser estudado, em especial ao longo do rio Gualaxo do Norte, foi adotada 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 empregado no estudo original (NHC, 2022) e nesta presente complementação, se baseia no mapeamento sistemático de habitats físicos do rio utilizando imagens aéreas de alta resolução obtidas com drone em sobrevoo de baixa altitude.

Esta abordagem também tem sido empregada em trabalhos como o monitoramento da recuperação ambiental do rio Trinity na Califórnia, nos Estados Unidos (Curtis e Guerrero, 2015), avaliação dos habitats físicos no rio Dosewallips no estado de Washington, nos Estados Unidos (Labbe e colaboradores, 2005), o trabalho de definição de referências de unidades geomorfológicas e habitats físicos dos rios da planície costeira da região do Golfo no estado Texas, nos Estados Unidos (Coffman e colaboradores, 2011), avaliação das alterações nos habitats causadas por construções de barragens no rio Peace no estado de British Columbia, no Canadá (NHC, 2012), entre outros estudos. É também amplamente documentada na literatura científica/acadêmica especializada (i.e., Legleiter, 2003; Marcus, 2002; Marcus e colaboradores, 2003; Gilvear e colaboradores, 2004; Woodget e colaboradores, 2017; entre outros) recomendada por instituições/agências de meio ambiente, como a iniciativa da União Europeia REFORM (Rinaldi e colaboradores, 2015) e o Departamento de Ecologia do estado de Washington, nos Estados Unidos (Janisch, J, 2013). Destaca-se ainda que o processo de avaliação do trabalho original inclui validação do mapeamento com observações em campo, sendo destacado no parecer técnico da avaliação (Terra Trópico, 2023) a “boa correlação com a verdade de campo e racionalidade quanto à sua utilização como indicadores espaço- temporais na interpretação da recuperação do sistema, sendo, em nosso entendimento, válidas e conceitualmente sustentáveis”. Destaca-se ainda que devido a adoção

desta abordagem que é possível a complementação do mapeamento, mesmo tendo sido decorrido quase 3 estações chuvosas.

Para o mapeamento de habitats, as escalas características para avaliação por ortofotos variam conforme a natureza do rio, podendo variar entre 1:100 e 1:2000. A escala de análise deve considerar a dimensão do rio e em especialidade a capacidade de visualização de elementos imersos, como troncos e rochas, e eventual necessidade de visualização de material do leito (i.e., identificar material de granulometria equivalente a cascalho).

A interpretação é feita visualmente e são distinguidas com base nas características físicas de sua morfologia (material e forma do leito) e hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento). As imagens previamente georreferenciadas e processadas são inseridas em programas de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) e, com o auxílio de suas ferramentas o mapeamento é usualmente iniciado com o delineamento manual das margens do rio (delimitação de um primeiro polígono), e das áreas secas do canal, correspondentes à bancos de sedimentos aparentes, rochas, troncos, etc. (delimitação de um segundo polígono). A partir desses delineamentos, é possível determinar o canal ativo do rio e sequencialmente são delimitadas as áreas de abrangências das unidades de habitats físicos ao longo do rio.

4.2 Classificação de habitats físicos

Vários métodos e protocolos foram desenvolvidos para o levantamento, caracterização e classificação de habitats físicos em rios (por exemplo: Platts e colaboradores, 1983; Raven e colaboradores, 1997). Eles fornecem uma estrutura dentro da qual unidades de habitat podem ser delineadas e amostradas. No entanto, os métodos mais antigos de avaliação de habitat físico apresentam algumas limitações (Belletti et al., 2015).

Anteriormente a terminologia usada para descrever habitats físicos na maioria dos levantamentos de habitats era simplista quando comparada ao atual. A maioria dos trabalhos das décadas de 80 e 90 descrevem a configuração do leito do rio apenas como corredeiras ou poços. Nos trabalhos mais atuais outras unidades geomórficas são consideradas, incluindo áreas molhadas (cascatas, corredeiras, rápidos, remansos/poços, estruturas alternadas de quedas e poços – *step and pool*, etc.), áreas secas (barras, ilhas, margens, etc.), vegetação (vegetação aquática, material

lenhoso, etc.) e unidades artificiais (proteção de margens, barragem, ponte, etc.), incluindo também subclassificações.

O trabalho proposto se trata da complementação do mapeamento de habitats originalmente realizado (NHC, 2022), o qual considerava as unidades de habitats somente no canal molhado e uma macroescala. Conforme recomendações de complementação, o presente trabalho avaliará o canal de margem plena, que inclui o canal molhado e o canal seco, além de utilizar um maior número de classes, maior detalhamento dos habitats. Ressalta-se que as unidades de habitats da planície de inundação não serão incorporadas no mapeamento, mas serão consideradas na análise dos resultados, conforme recomendação. Ao final do estudo é prevista uma análise conjunta com os dados levantados descritos no item 3.

Deve ser lembrado que por se tratar de uma complementação, é necessário que a classificação a ser utilizada seja adequada para a base de dados existente (imagens aéreas de altíssima resolução e limitadas informação de inspeção de campo). Ainda que seja possível argumentar que o uso de imagens de altíssima resolução é adequado para ser utilizado em diferentes padrões de classificação (i.e., os propostos por Wheaton et al (2015) e Bisson et al (2017)), dentre a literatura avaliada, destaca-se que o trabalho de Rinaldi et al. (2015) apresenta de maneira explícita e taxativa que um mapeamento detalhado de habitats pode ser feito com base em imagens aéreas de alta resolução complementadas com inspeção de campo, os demais trabalhos consultados, ainda que possa ser inferida a adequação do uso de imagens de alta resolução, não apresentam essa informação explicitamente. A classificação apresentada em Rinaldi et al. (2015) foi adaptada considerando as características da base de dados existente.

Deste modo, o padrão de classificação adotado se baseou no método de avaliação hidromorfológica do tipo detalhada proposto por Rinaldi et al. (2015), documento elaborado no âmbito do projeto REFORM da União Europeia, acrônimo de Recuperação de Rios para Gerenciamento Eficaz de Bacias Hidrográficas (do termo inglês *REstoring rivers FOR effective catchment Management*).

Destaca-se que a classificação proposta pelo projeto REFORM (Rinaldi et. al, 2015) é baseada em uma ampla revisão de literatura, e é similar as classes propostas de outros trabalhos como o de Wheaton et al (2015) para mapeamento tipo “Tier 3”, as quais são mais difundidas na América do Norte e utilizadas em trabalhos do Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS

(Curtis e Guerrero, 2015; Coffman et al, 2011), e como o de Bisson et al (2017) para habitats do canal molhado (apresentado como “*channel units classification*”), entre outros.

A classificação apresentada por REFORM descreve unidades de habitats, ou unidades geomorfológicas como feições resultantes de processos fluviais erosivos ou deposicionais, compreendendo unidades na escala de mesohabitats (10^{-1} a 10^3 metros). Ela inclui áreas submersas, emersas (i.e., barras de sedimentos, afloramentos rochosos, entre outros), vegetadas (i.e., vegetação aquática, ilhas, entre outros)², e também artificiais (i.e., proteção de margem por enrocamento, trechos canalizados, barragens, galerias, entre outros), que conjuntamente compõem o que se denomina nesse estudo como “macrounidades”. Também considera questões de posicionamento dos habitats quando a pertencer ao canal principal ou canais secundários, e localização junto a margem ou no meio do canal.

Em síntese, o sistema de classificação geomorfológica do canal fluvial ativo proposto segue uma hierarquia e tem como base as seguintes categorias de análise:

- Macrounidades geomorfológicas e elementos modificadores (citados conjuntamente nesse estudo como “Macrounidades”)

Categorizam as unidades geomorfológicas em três grupos, sendo: (1) unidades submersas ou unidades do “canal molhado” (*baseflow channel*), localizadas na porção do canal ativo que se encontra submersa no momento de obtenção das imagens aéreas; (2) unidades emersas, localizadas na porção do canal ativo que se encontra emersa (canal seco) sob condições de fluxo de base, são formadas por sedimentos resultantes de processos erosivos ou deposicionais; e (3) unidades vegetadas, unidades formadas por vegetação no canal ativo. Seguindo o proposto em REFORM, as feições artificiais não compõem uma macrounidade geomorfológica, mas são de grande relevância por serem elementos que podem modificar significativamente os processos fluviais e a morfologia das unidades geomorfológicas.

² Recomendação apresentada na página 10 da Nota Técnica CT-GRSA nº 06/2023 de 02/10/2023.

- Tipos de canal fluvial ativo (citados nesse estudo como “Canal”)

A nível básico, tipificam as unidades geomorfológicas em relação a sua localização no canal ativo: (1) canal principal, que, em trechos fluviais perenes contínuos, corresponde ao canal único que contém água corrente, enquanto em trechos multissegmentados corresponde ao fragmento que transporta maior volume de água; e (2) canal secundário, cujo fluxo correspondente de água é significativamente menor em relação ao canal principal.

- Unidades geomorfológicas do canal ativo (citadas nesse estudo como “Unidades Geomorfológicas”)

Áreas que contém geoformas (i.e., barras, corredeiras, ilhas) resultantes de processos erosivos e/ou deposicionais restritas ao canal ativo do rio, com uma área mínima definida em função da escala de delimitação (usualmente 5,0 m²)³.

- Subunidades geomorfológicas do canal ativo (citadas nesse estudo como “Subunidades”)

Além da revisão do conceito de “canal ativo” e inclusão da classificação de demais contextos espaciais dos componentes geomorfológicos (macrounidades e elementos artificiais), a complementação do mapeamento de habitats proposta no presente estudo utilizará um maior número de unidades de habitats e quando possível e pertinente, incluindo a classificação de subunidades de habitats, aumentando o grau de detalhamento e complexidade. Antecipa-se que a diferenciação entre algumas unidades e subunidades como proposto pelo REFORM é dificultada no trabalho proposto por ser baseado exclusivamente em imagens aéreas de altíssima resolução, sem informações complementares de inspeção de campo (i.e., de acordo com a REFORM existem subunidades para ilhas vegetadas que são diferenciadas exclusivamente pela altura da vegetação, parâmetro que não é facilmente distinguível em imagens aéreas). Adicionalmente, a classificação proposta no presente estudo considerou o contexto local dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão e rios da região, além da extensão da área de mapeamento (aproximadamente

³ Considerando o relativo pequeno porte do rio Gualaxo do Norte, especialmente no trecho de montante, e características típicas da mata ciliar da região, e porte do material lenhoso apresentado nos rios, antecipa-se que pode ser necessário utilizar uma área mínima menor. A definição da área mínima poderá ser revisada durante a elaboração do estudo.

110 km de rios impactados e 60 km de rios de referência). Inicialmente é proposto um total de 12 classes para o canal molhado (soma de unidades e subunidades), comparado as 4 classes utilizadas no estudo original, 9 classes (unidades) para porção emersas, 7 classes (soma de unidades e subunidades), e 7 classes (unidades) para feições artificiais, totalizando 35 classes⁴. Ressalta-se que durante o desenvolvimento do estudo as classes utilizadas poderão ser revisadas.

A **Tabela 6** apresenta as classes utilizadas, agrupadas de maneira hierárquica suas respectivas macrounidades, unidades e subunidades.

Tabela 6 – Classificação das unidades geomorfológicas adotada no trabalho atual de complementação do mapeamento sistemático do canal fluvial ativo. Adaptado e traduzido de Rinaldi et. al (2015).

MACROUNIDADE GEOMORF.	UNIDADE GEOMORFOLÓGICA	SUBUNIDADE GEOMORFOLÓGICA	
Unidades Submersas (S)	Cascatas (CC) - Cascade	-	
	Rápido ⁵ (CR) - Rapid	-	
	Degrau (CT) - Step	-	
	Corredeira (CF) - Riffle	-	
	Corrida ⁶ (CG) - Glide	-	
	Poços/remansos (CP)	Poços/remansos forçados (<i>Forced</i>)	
		Poços/remansos de erosão (<i>scour</i>)	
		Poços/remansos de queda d'água (<i>plunge</i>)	
		Poços/remansos represados (<i>dammed</i>)	
		Poços/remansos em meandros (<i>meander</i>)	
		Braço (<i>one-way connected branch</i>)	
Lagoas marginais (<i>Pond</i>)			
Unidades Emersas (E)	Barra Lateral (EA) – <i>Bank-attached bar</i>	-	
	Barra central (EC) – <i>Mid-channel bar</i>	-	
	Barra Lateral elevada (EAh) – <i>Bank attached high-bar</i>	-	
	Barra central elevada (ECh) – <i>Mid-channel high-bar</i>	-	
	Berma lateral de matacão (EB) – <i>Bank-attached boulder berm</i>	-	
	Berma central de matacão (EM) – <i>Mid-channel boulder berm</i>	-	
	Canal seco (ED) – <i>Dry channel</i>	-	
	Afloramento rochoso (EO) – <i>Bedrock outcrop</i>	-	
	Margem sem vegetação (EK) – <i>Unvegetated bank</i>	-	

⁴ Maior grau de detalhamento é uma recomendação apresentada na página 10 da Nota Técnica CT-GRSA nº 06/2023 de 02/10/2023.

⁵ Conforme sugestão dos revisores do trabalho (TerraTrópico, 2023), o termo “rápido” deixou de ser utilizado como tradução do habitat tipo “run” ou “glide”. Conforme apresentado em Pelech (2021), o termo “rápido” passou a ser utilizado como tradução do habitat tipo “rapid”.

⁶ Conforme sugestão dos revisores do trabalho (TerraTrópico, 2023), o nome adotado para habitat tipo “run” ou “glide” foi alterado. Foi adotada a nomenclatura apresentada em Pelech (2021).

Tabela 6 (continuação) – Classificação das unidades geomorfológicas adotada no trabalho atual de complementação do mapeamento sistemático do canal fluvial ativo. Adaptado e traduzido de Rinaldi et. al (2015).

MACROUNIDADE GEOMORF.	UNIDADE GEOMORFOLÓGICA	SUBUNIDADE GEOMORFOLÓGICA
Vegetação Intracalha (V)	Ilha (VI)	Ilha com pastagem (<i>grassy island</i>)
		Ilha com vegetação jovem (<i>young woody island</i>)
		Ilha com Floresta (<i>established/Adult woody island</i> e <i>Mature woody island</i>)
		Ilha com vegetação complexa (<i>Complex woody island</i>)
	Emaranhado de troncos (VJ) – <i>Large wood jam</i>	-
	Vegetação aquática (VA) – <i>Aquatic vegetation</i>	-
	Margem com vegetação (VK) – <i>Vegetated bank</i>	-
Feições Artificiais (A)	Barragem (AA) – <i>Dam</i>	-
	Travessia por Galeria (AF) – <i>Culvert</i>	-
	Passagem molhada (AG) – <i>Ford</i>	-
	Ponte (AH) – <i>Bridge</i>	-
	Canal artificial (AI) – <i>Bed revetment</i>	-
	Obras de controle de erosão de margens (AL) – <i>Bank Protection</i>	-
	Área de mineração (AN) – <i>Mining sites/sediment removal</i>	-

4.3 Classificação de parâmetros complementares

Além da classificação dos habitats físicos, no trabalho original (NHC, 2022) também foram avaliadas a condição da margem (i.e., vegetação densa, arbustos, gramíneas/pastagem, obras de proteção, erosão e leito rochoso⁷), informações topográficas, características de largura do rio e caracterização do material predominante no leito. O mapeamento e as análises realizadas foram avaliados e aprovados, conforme a Nota Técnica nº 06/2023 de 02/10/2023 e Deliberação CIF nº 729 de 2023. Considerando a relevância dessas informações, as mesmas serão utilizadas no âmbito do estudo de complementação proposto na fase de análise integrada, mas não é previsto revisão da classificação/mapeamento destes parâmetros.

⁷ A classificação apresentada poderá sofrer alterações até a fase final do estudo.

4.4 Cenários e procedimentos de análise

Os cenários avaliados serão equivalentes às condições Pré-rompimento (referência) e Pós-rompimento (ano 2021), previamente definidos e avaliados no estudo original (NHC, 2022).

- **Cenário de referência:** condição representativa da situação de presença de habitats nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce à montante;
 - Rio Gualaxo do Norte (T06 à T09): baseado em informações levantadas de rios da região com características similares ao Gualaxo do Norte durante a estação seca de 2021 e seleção de imagens anteriores ao rompimento, ano de 2014, para o trecho T09;
 - Rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11): baseado em informações anteriores ao rompimento, ano de 2014;
- **Cenário Pós-rompimento, ano de 2021:** situação da presença de habitats durante a estação seca de 2021.

Maiores detalhes sobre a definição dos cenários, seleção de imagens procedimento de levantamentos das imagens em campo são apresentados no estudo original (NHC, 2022), apresentado no ANEXO 2.

A análise integrada com demais informações relevantes, será realizada de maneira análoga ao executado no estudo original. Destaca-se que serão consideradas as informações relevantes produzidas no âmbito das atividades de caracterização da geomorfologia descritas no item 3 deste plano de trabalho. Em especial, as informações da geomorfologia da planície de inundação⁸.

4.5 Resultados esperados

De maneira análoga ao estudo original (NHC, 2022), os resultados e conclusões da análise a ser realizada serão apresentados em formato de relatório técnico, mapas e tabelas, e serão um apêndice do relatório principal.

⁸ A ausência de uma análise conjunta com informações das planícies de inundação é apontada como limitação do estudo original na página 10 da Nota Técnica CT-GRSA nº 06/2023 de 02/10/2023.

As análises se basearão na hipótese apresentada no estudo original (validada pela Nota Técnica CT-GRSA nº 06/2023) de condição de completa homogeneidade de habitats após o rompimento, possibilitando quantificar a diversificação de habitats ocorrida até 2021.

Os resultados do mapeamento de habitats para a condição de referência e pós-rompimento serão avaliados de maneira comparativa. Adicionalmente, análises com outras informações pertinentes, como características físicas (i.e., declividade) e geomorfológicas (i.e., grau de confinamento, e outros parâmetros levantados no âmbito das atividades descritas no item 3) serão analisados em conjunto, buscando identificar tendências quanto ao processo de recuperação e formação de habitats físicos, fornecendo informações adicionais ao entendimento do processo de recuperação da área de estudo.

Por fim, espera-se que a base de dados gerada seja uma fonte de informações complementares que podem ser utilizadas no âmbito dos programas da Fundação Renova para nortear eventuais ações a serem realizadas ou fornecer dados para outros estudos.

5 CRONOGRAMA

O cronograma previsto para execução das atividades propostas é apresentado a seguir:

ATIVIDADE	MESES																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Aquisição de imagens ¹	█	█	█	█	█	█												
Análise de dados disponíveis						█	█	█										
Visitas de Campo									█	█								
Caracterização Geomorfológica							█	█	█									
Mapeamento Geomorfológico de Feições									█	█	█							
Complementação do Mapeamento de Habitats Físicos												█	█	█	█	█		
Análise Integrada															█	█		
Relatório												█	█	█	█	█	█	█
Revisões/Devolutivas																		█
Entrega Final																		█

1 – Devido à grande extensão territorial da área de estudo, será necessária a aquisição de um grande conjunto de imagens para compor os mosaicos das diferentes épocas de análise (2013-2022), demandando assim um tempo longo para tratamento dos dados.

6 EQUIPE TÉCNICA

A equipe técnica responsável pela elaboração do estudo geomorfológico de montante é apresentada na tabela a seguir.

PROFISSIONAL	FORMAÇÃO	FUNÇÃO
Andreia Garcia	Ecóloga	Diretora do Projeto
Matheus Ramin	Engenheiro Ambiental e Urbano, M.Sc	Gerente do Projeto
Antônio Freitas	Engenheiro Químico, PhD	Revisor Sênior
Rowland Atkins	Geomorfólogo Fluvial	Especialista Sênior em Geomorfologia
Carlos Schaefer	Engenheiro Agrônomo, PhD	Especialista Sênior
Marcio Francelino	Agrônomo, PhD	Especialista Sênior
Eric Cao	Geomorfólogo Fluvial, MSc	Geomorfólogo
Pedro Almeida	Engenheiro Agrônomo, M.Sc	Elaboração dos Trabalhos de Campo e Relatório
Leticia Priolli	Engenheira Ambiental e Urbana em formação	Produtos Cartográficos
Rodrigo Utima	Pós-graduação em geoprocessamento	Geoprocessamento
Rodrigo Silva	Gestor Ambiental	Trabalhos de Campo

A equipe técnica responsável pela elaboração do estudo de complementação do mapeamento de habitats é apresentada na tabela a seguir.

PROFISSIONAL	FORMAÇÃO	FUNÇÃO
Marcus Vinícius Estigoni	Engenheiro Ambiental, PhD	Líder Técnico
Barry Chilibeck	Engenheiro Civil, M.Sc.	Revisor Sênior
Mariza Cabral	Engenheira Civil	Revisor Sênior (Estatística)
Guilherme de Lima	Engenheiro Civil, PhD	Revisor Sênior
Andrew Nelson	Geólogo, M.Sc.	Esp. Sênior em Geomorfologia
Shane McConachie	Geólogo	Esp. Sênior em Geomorfologia
Thaís N. Rezende	Engenheira Civil, M.Sc.	Esp. em Hidrologia
Ashley Dudill	Engenheira Civil, PhD	Esp. em Transp. Sedimentos
Annie Dufficy	Geóloga, M.Sc.	Geoprocessamento
Isabela B. Freire	Engenheira Ambiental	Geoprocessamento
Rafael B. Rossi	Engenheiro Ambiental	Geoprocessamento

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELLETTI, B.; RINALDI, M.; BUIJSE, A.D. et al. (2015). A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environ Earth Sci* 73, 2079–2100 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3558-1>
- 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.
- COFFMAN, D.K.; MALSTAFF, G.; & HEITMULLER, F.T. (2011). **Characterization of geomorphic units in the alluvial valleys and channels of Gulf Coastal Plain rivers in Texas, with examples from the Brazos, Sabine, and Trinity Rivers, 2010**. Relatório preparado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. Geological Survey) Scientific Investigations Report 2011–5067, 31 p.
- CURTIS, J. A. & GUERRERO, T. M. (2015). **Geomorphic Mapping to Support River Restoration on the Trinity River Downstream from Lewiston Dam, California, 1980–2011**. Relatório Nº 2015–1047, preparado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em cooperação com Trinity River Restoration Project.
- GILVEAR, D.; DAVIDS, C.; & TYLER, A. (2004). The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology; River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, 20 (7), pp. 795-811. <https://doi.org/10.1002/rra.792>
- GRIZIO, E. V; DE SOUZA FILHO, E. E. . Avaliação da dinâmica fluvial do Alto Rio Paraguai no período 2004-2006 por meio do uso de imagens Cbers2b/CCD. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, p.2576, 2011.
- GRIZIO, E. V.; SOUZA FILHO, E. E. . As modificações do regime de descarga do rio Paraguai Superior. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 11, p. 25-33, 2010.
- GOLDER. Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão. RT-023_159-515-2282_01J. Seção 3 – Geomorfologia. 2016^a.
- GOLDER. Atendimento à Clausula 168 do Termo de Ajustamento de Conduta TTAC. Avaliação de impacto sobre as espécies terrestres ameaçadas de extinção. RT-031_159-515-2282_02J. 2016b.
- GOLDER. Atualização do Volume 10: Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 13 e 14. São Paulo/SP. Novembro/2021
- GOLDER. Volume 11 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 15 – Revisão 02. São Paulo/SP. Fevereiro/2022^a.

- GOLDER. Volume 12 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 16 – Revisão 02. São Paulo/SP. Fevereiro/2022b.
- GRUPO EPA. Relatório de Avaliação da Qualidade do Rejeito Presente na Barragem do Fundão, em Mariana – MG, e na Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Aterro de Candonga), em Rio Doce – MG. Fundação Renova. Maio/2019.
- JANISCH, J (2013). **Dictionary of Metrics for Physical Habitat: Definitions and Calculations Used for Watershed Health Monitoring and Related Studies**. Relatório N° 13-03-033 do Washington State Department of Ecology, Environmental Assessment Program, disponível em <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1303033.pdf> (acesso 09/12/2021).
- LABBE, T.; GROTEFENDT, R.; CARTER-MORTIMER, A. & JONES, J. Ç. (2005). **Dosewallips River Habitat Assessment: Coupling High-Resolution Remote Sensing and Ground Surveys to Prioritize Aquatic Conservation, Olympic Mountains, Washington State**. Relatório preparado para o Departamento Americano de Assuntos Indígenas (USDI – Bureau of Indian Affairs). Dezembro de 2005.
- LACTEC. Área de Passagem e deposição da Lama de rejeitos no vale do rio Doce. 2020.
- LEGLEITER, C. (2003). Spectrally Driven Classification of High Spatial Resolution, Hyperspectral Imagery: A Tool for Mapping In-Stream Habitat. **Environmental Management** 32, 399–411 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0034-1>
- MARCUS, W.A. (2002). Mapping of instream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. **Journal of Geographical Systems** 4.
- MARCUS, W. A.; LEGLEITER, C. J.; ASPINALL, R. J.; BOARDMAN, J. W.; & CRABTREE, R. L. (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams, **Geomorphology**, vol. 55, pp. 363–380, 2003. doi:10.1016/S0169-555X(03)00150-8.
- 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.
- NHC (2012). Peace Project Water Use Plan: Peace River Hydraulic Habitat Study. Relatório preparado para BC Hydro, novembro de 2012.
- NHC (2022). Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Relatório Final – Revisão 03. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo, agosto de 2022.

- PEKEL, J. F. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**. 2016. Doi:10.1038/nature20584
- PELECH, A. S. (2021). Classificações Geomorfológicas de rios: Uma breve discussão teórica. **Revista de Geomorfologia**. v. 2, n. 2, 15 de dezembro de 2021, p. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v2n2.2021.170>
- PLATTS, W. S.; MEGAHAN, W. F.; WSHALL, G. W. (1983). **Methods for e evaluating stream, riparian, and biotic conditions**. GeTL. Tech. Rep. INT-138. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Semice, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1983. 70 p3
- RAVEN, P. J.; FOX, P.; EVERAR, M., et. al (1997). River Habitat Survey: a new system to classify rivers according to their habitat quality. n book: **Freshwater Quality: Defining the indefinable**. Editora Stationery Office, Edinburgh, UK.
- RHAMA. Análise Integrada sobre o Transporte de Sedimentos e Alterações Geomorfológicas a Jusante da UHE Risoleta Neves. Revisão nº 02. Setembro 2020.
- RINALDI, M.; BELLETTI, B.; BERGA CANO, M. I. et. al (2015). **Final report on methods, models, tools to assess the hydromorphology of rivers. Deliverable 6.2**, Relatório preparado em cinco partes para REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), um projeto de colaboração de grande escala financiado pela European Commission pelo 7th Framework Programme, acordo de financiamento 282656.
- SHIBA, M. H. et al. Classificação de imagens de sensoriamento remoto pela aprendizagem por árvore de decisão: uma avaliação de desempenho. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 12, p. 4319-4326, 2005.
- TERRATRÓPICO (2023). Parecer técnico Final: Análise dos documentos entregues pela Fundação Renova no contexto do contrato celebrado entre a Faculdade Latino Americana de Ciências Socias (FLACSO e a Terra Trópico. Relatório preparado para Flacso. 2023.
- USFS (2012). Stream Inventory Handbook Level I & II. 2.12.
- WHEATON, J. M.; FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G.; et. al (2015). Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms. **Geomorphology**, v. 248, p. 273-295, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.010>
- WOODGET, A.S., AUSTRUMS, R., MADDOCK, I.P. & HABIT, E. (2017), Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. **WIRES Water**, 4: e1222. <https://doi.org/10.1002/wat2.1222>



**ANEXO 1 – Relatório Técnico: Avaliação dos Impactos no Meio Físico
Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão (RT-023_159-
515-2282_01-J)**



Outubro, 2016

RELATÓRIO TÉCNICO

Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão

Preparado para:

Samarco Mineração S.A.

RELATÓRIO

Número do Relatório: RT-023_159-515-2282_01-J

Distribuição:

1 cópia - Samarco Mineração S.A.

1 cópia - Golder Associates Brasil Consultoria e Projetos Ltda.





3.0 GEOMORFOLOGIA, HIDRODINÂMICA E HIDROSEDIMENTOLOGIA

3.1 Introdução

Em 5 de novembro de 2015, a Barragem de Rejeitos de Fundão da unidade industrial de Germano (localizado no município de Mariana no estado de Minas Gerais) rompeu-se e um grande volume de rejeitos e água foram liberados. A estimativa da Samarco é que o evento inicial de rompimento lançou aproximadamente 32 milhões de m³ e liberações adicionais após o rompimento inicial equivalem a um volume total liberado de aproximadamente 43,7 milhões de m³ até junho de 2016¹. A mistura de rejeitos e água (isto é, lama de rejeitos) fluiu descendo os maiores rios e córregos locais para o Rio Doce, e ultimamente para o Oceano Atlântico.

O rompimento da barragem de Fundão envolveu erosão significativa e/ou a subsequente deposição em trechos da bacia do alto Rio Doce, resultando em mudanças na morfologia de alguns trechos de rio. Estão sendo feitos esforços para estabilizar as margens dos rios, minimizar a erosão e remobilizar os sedimentos depositados, bem como para compreender o potencial de inundações nestas novas condições.

3.1.1 Escopo do trabalho

Esse relatório resume as avaliações geomorfológicas e hidrológicas que foram realizadas até a data para identificar e documentar os impactos físicos nos rios jusantes ao rompimento. O escopo do trabalho, identificado no plano de trabalho da Golder datado em 16 de março de 2016 (arquivo 1695152282, plano de trabalho E-15), foi inicialmente limitado para aproximadamente 100 km de rio a partir da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte até o reservatório de Candonga. A seção do Córrego Santarém entre o dique S3 construído e o dique S4 proposto foi excluída uma vez que esta área seria inundada pelo dique S4 proposto. A pedido da Samarco, a seção do Córrego Santarém entre o dique S3 construído e o dique S4 proposto foi incluída no escopo de trabalho após o trabalho de campo ter sido completado. Um resumo mais detalhado das limitações do estudo está incluso no final desse relatório.

3.1.2 Objetivos

Os objetivos deste estudo de Avaliação Geomorfológica, Hidrodinâmica e Hidrosedimentológica consistiram em:

- Usar os dados disponíveis em estudos existentes e dados coletados em campo para descrever os parâmetros e entender a morfologia do sistema fluvial (Seção 3.4.1 a 3.4.3);
- Descrever o regime de transporte de sedimentos do sistema fluvial e identificar as principais fontes de sedimentos fluviais (Seção 3.5.6.1 e 3.5.6.2);
- Descrever como se deu o transporte dos rejeitos e sua deposição ao longo do sistema fluvial (Seção 3.5.6.3);
- Avaliar a carga de transporte de sedimentos no sistema fluvial para as condições pré e pós-rompimento, incluindo rejeitos (Seção 3.5.7);
- Melhorar as estimativas de cheias dos rios principais como suporte para projetos detalhados de engenharia fluvial (Seção 3.5.2); e,
- Identificar áreas prioritárias para remediação após o rompimento da barragem de rejeitos (Seção 3.6.2).

Os resultados desta avaliação são necessários para levar em consideração tanto os impactos mensuráveis do rompimento da barragem sobre o ambiente fluvial como a implementação de tópicos de reabilitação identificados no Plano de Reabilitação Ambiental (Golder, 2016a) relativos ao controle de erosão tanto no

¹ Reunião de apresentação da Samarco ao IBAMA em 17/08/2016.



canal como nas planícies de inundação e áreas expostas. Estas questões foram identificadas para os rios principais na bacia do alto Rio Doce, incluindo o Córrego Santarém, Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo.

3.1.3 Definições

Para efeitos desta avaliação, foram adotadas as seguintes definições visando maior clareza:

- **Remanso** – uma parte do rio onde a água está estagnada, e onde a água é mantida ou empurrada de volta a montante como por uma inundação;
- **Profundidade no leito menor** – profundidade média do canal de drenagem quando o fluxo está contido dentro das margens do rio;
- **Largura no leito menor** – largura média do canal de drenagem quando o fluxo está contido dentro das margens do rio;
- **Carga do leito** – sedimento de granulação maior do que as cargas de suspensão ou saltação, transportado pela água corrente por mecanismos de arrastamento e de rolamento. São exemplos deste processo: empurramento, rolamento, deslizamento ou saltação. Estes materiais tendem a ser os maiores materiais presentes no canal do rio, tais como pedras e pedregulhos;
- **Configuração em planta do canal** – forma bidimensional de um rio em um mapa contendo a amplitude das curvas (meandros) e a sinuosidade do rio, bem como mostrando a presença de ilhas, canais múltiplos e bancos de sedimentos;
- **Sinuosidade do canal** – a medida do desvio do canal de um rio em relação a uma linha reta, como resultado do tamanho e extensão dos meandros;
- **Fluxo de detritos** – um evento de despejo contendo uma porção significativa de materiais sólidos em suspensão fluida, em que os materiais sólidos são transportados principalmente como carga do leito;
- **Meandro** – curvas de um rio que se desenvolvem em uma planície de inundação (várzea), sendo formadas pelo equilíbrio hidrodinâmico entre o fluxo do rio e os sedimentos, diferentemente de curvas em um rio resultantes de rochas resistentes no leito ou outro fator topográfico;
- **Crista de Corredeira** – o ponto mais alto em uma Seção de Corredeira;
- **Seção de Corredeira** – porção do canal do rio entre duas curvas ou dois poços;
- **Sulcos** – um pequeno canal, geralmente com alguns poucos centímetros de largura e de profundidade resultante de erosão devido ao escoamento superficial. Caso cresçam muito, os sulcos podem formar ravinas;
- **Trecho do Rio** – a menor unidade do canal do rio que pode ser caracterizada por um conjunto representativo de características físicas (p.ex., largura, profundidade, declividade, largura de várzea, amplitude dos meandros, sinuosidade do canal, tipologia de canal);
- **R²** – R-quadrado é uma medida estatística de quão perto os dados estão para a linha de regressão ajustada;
- **Sedimento** – materiais sólidos que são transportados pela água, tendo como fonte a erosão das margens naturais de rios, leitos de rio e rochas e solos do terreno circundante;
- **Carga Suspensa** – materiais sólidos que são transportados por turbulência em condições de vazão moderada a alta. Estes materiais tendem a ser de tamanho moderado no canal do rio; por exemplo, areia e cascalho;
- **Rejeitos** – materiais sólidos que são transportados pela água e que têm como fonte os sólidos descarregados no sistema fluvial pelo rompimento da barragem de rejeitos;



- Talvegue – uma linha conectando os pontos mais baixos ao longo do canal do rio;
- **Carga de lavagem** – materiais sólidos que são transportados por turbulência em condições de vazão baixa. Estes materiais tendem a ser os de menor tamanho no canal fluvial; por exemplo, siltes e argilas;
- **Bacia** – a área drenada por um curso de água a um local de interesse

3.2 Cenário

O rompimento ocorreu no estado de Minas Gerais no Sudeste do Brasil, cerca de 300 km ao norte do Rio de Janeiro. O terreno na região do rompimento é parte do Quadrilátero Ferrífero e é tipicamente montanhoso com vales profundamente incisos. Elevações variam de 2.100 m para 600 m na área (Dorr, 1969). As áreas mais montanhosas ao redor do Córrego Santarém dão lugar a colinas de baixo relevo em direção ao reservatório de Candonga. Os vales incisos na área são dominados pela geologia subjacente, comumente seguindo falhas, sistemas de acamamentos em rochas uniformes e formações rochosas menos resistentes e mais leves (Dorr, 1969). O terreno montanhoso parece ser tipicamente florestado com plantios de Eucalipto enquanto o relevo mais baixo parece ser comumente adequado para agricultura.

O clima da área é subtropical com uma temperatura média anual de 20° C. Temperaturas máximas da ordem de 30° C foram observadas e geadas tem sido observadas nos vales mais isolados de alta altitude (Dorr, 1969). A precipitação média anual está para ordem de 1.500 mm a 2.000 mm mas pode variar muito de um ano para outro. A precipitação é sazonal com uma estação chuvosa tipicamente ocorrendo no verão e uma estação seca no inverno (Dorr, 1969).

3.3 Área de Estudo

A mistura de rejeitos e água resultante do rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão escoou pelos cursos d'água locais e alcançou o oceano Atlântico, percorrendo o Córrego Santarém, o Rio Gualaxo do Norte, o Rio do Carmo e o Rio Doce. Estes cursos d'água estão situados na bacia do Rio Doce. O percurso feito pelos rejeitos inclui várias grandes barragens e reservatórios localizados a jusante do Rio do Carmo e Rio Doce. Visando concentrar os esforços da avaliação geomorfológica, a área de estudo foi limitada aos trechos do rio a montante do primeiro reservatório e barragem (Reservatório de Candonga), uma vez que o reservatório age como uma área de armazenagem de sedimentos e elemento atenuador da vazão. Foi observado que os impactos decorrentes do fluxo e da deposição de rejeitos a jusante do Reservatório de Candonga foram de menor magnitude do que os impactos a montante do citado reservatório, devido ao efeito de retenção de sedimentos e atenuação da vazão desempenhado pela barragem e pelo lago da UHE Risoleta Neves (UHE Candonga).

Também foram definidas uma área de estudo local e uma área de estudo regional visando a avaliação da geomorfologia:

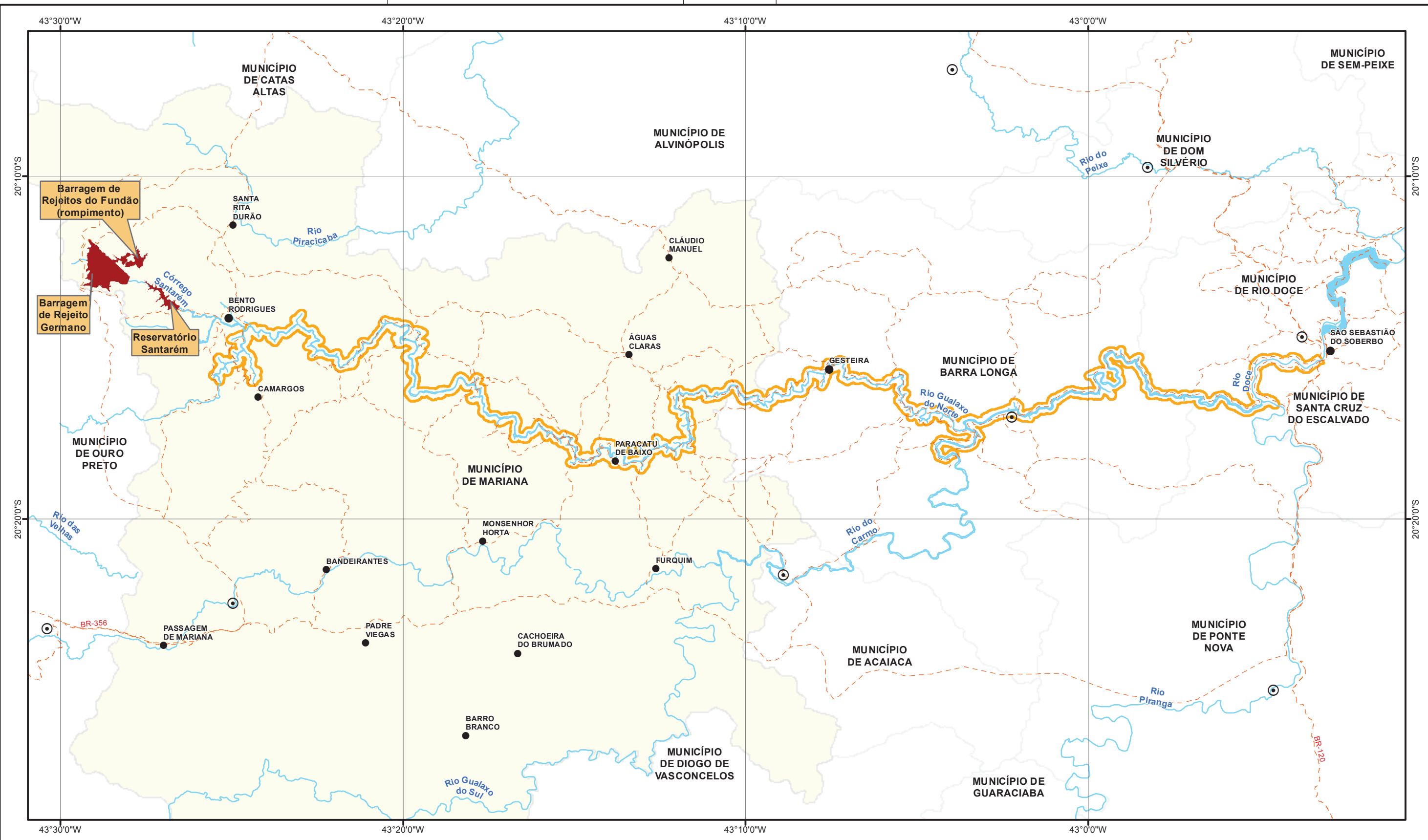
- **Área de Estudo Local (AEL)** – A AEL compreende os trechos de rios diretamente afetados pelo rompimento da barragem de rejeitos e consiste de duas partes: i) uma parte a montante inclui o Córrego Santarém, desde o dique S3 até a confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte e trechos do Rio Gualaxo do Norte a montante da confluência com o Córrego Santarém afetados pelo rompimento da barragem e ii) uma parte a jusante que se estende aproximadamente da confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Córrego Santarém seguindo a jusante até a entrada do Reservatório de Candonga no Rio Doce. A parte de jusante foi avaliada por revisão de dados em escritório somente porque esta parte da AEL foi inicialmente excluída do estudo dada a intenção de construir um dique no local S4. A parte a jusante foi avaliada em campo (**Figura 3.3.1**). Os cursos d'água incluídos na AEL são o Rio Gualaxo do Norte, o Rio do Carmo e o Rio Doce;
- **Área de Estudo Regional (AER)** – A AER compreende a AEL assim como os riachos e rios da bacia do Rio Doce que não foram diretamente afetados pelos rejeitos do rompimento. Dados coletados na AER ajudam a entender as condições naturais dos rios na bacia do Rio Doce. Estes pontos estão localizados



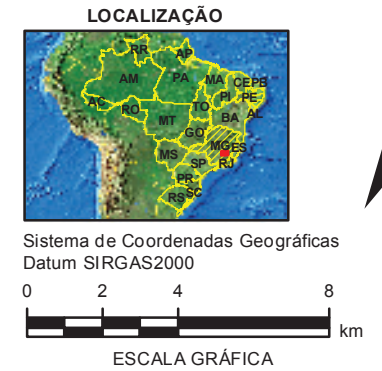
em i) tributários menores nas bacias que drenam para a AEL, e ii) cursos d'água de tamanho similar adjacentes à AEL e inseridos na bacia do Rio Doce. Exemplos de riachos e rios analisados neste estudo incluem os rios do Carmo (a montante da confluência com Rio Gualaxo do Norte), Rio Gualaxo do Sul, Rio Barroca, Rio Piranga, Rio Bacalhau, Rio Pirapetinga, Rio Piracicaba e Rio do Peixe (**Figura 3.3.2**).

Três principais segmentos de rio foram definidos na AEL:

- Segmento Gualaxo do Norte – este segmento se estende da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte, incluindo a área de refluxo à montante no Rio Gualaxo do Norte (limite mais a montante da AEL) seguindo a jusante até a confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo, no município de Barra Longa. O comprimento é de aproximadamente 72 km e a área total da bacia é de aproximadamente 562 km². Com a introdução das águas do Rio Carmo, a área da bacia drenada pelo rio aumenta significativamente a jusante da confluência do Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo;
- Segmento Rio do Carmo – este segmento se estende da confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo, incluindo a área de refluxo à montante no Rio do Carmo (no Município de Barra Longa) até a confluência do Rio do Carmo com o Rio Doce. O comprimento é de aproximadamente 25 km e a área total da bacia é de aproximadamente 2.282 km². Com a introdução das águas do Rio Doce, a área da bacia drenada pelo rio aumenta significativamente a jusante da confluência do Rio do Carmo e Rio Doce;
- Segmento Rio Doce – este segmento se estende da confluência do Rio do Carmo com o Rio Doce seguindo a jusante até a entrada do Rio Doce no Reservatório de Candonga (limite mais a jusante da AEL). O comprimento deste segmento é de aproximadamente 7 km, sendo a área total da bacia de aproximadamente 8.917 km². Este segmento termina no limite a montante do Reservatório de Candonga (próximo ao cruzamento com a BR-120, aproximadamente 10 km do Reservatório de Candonga).



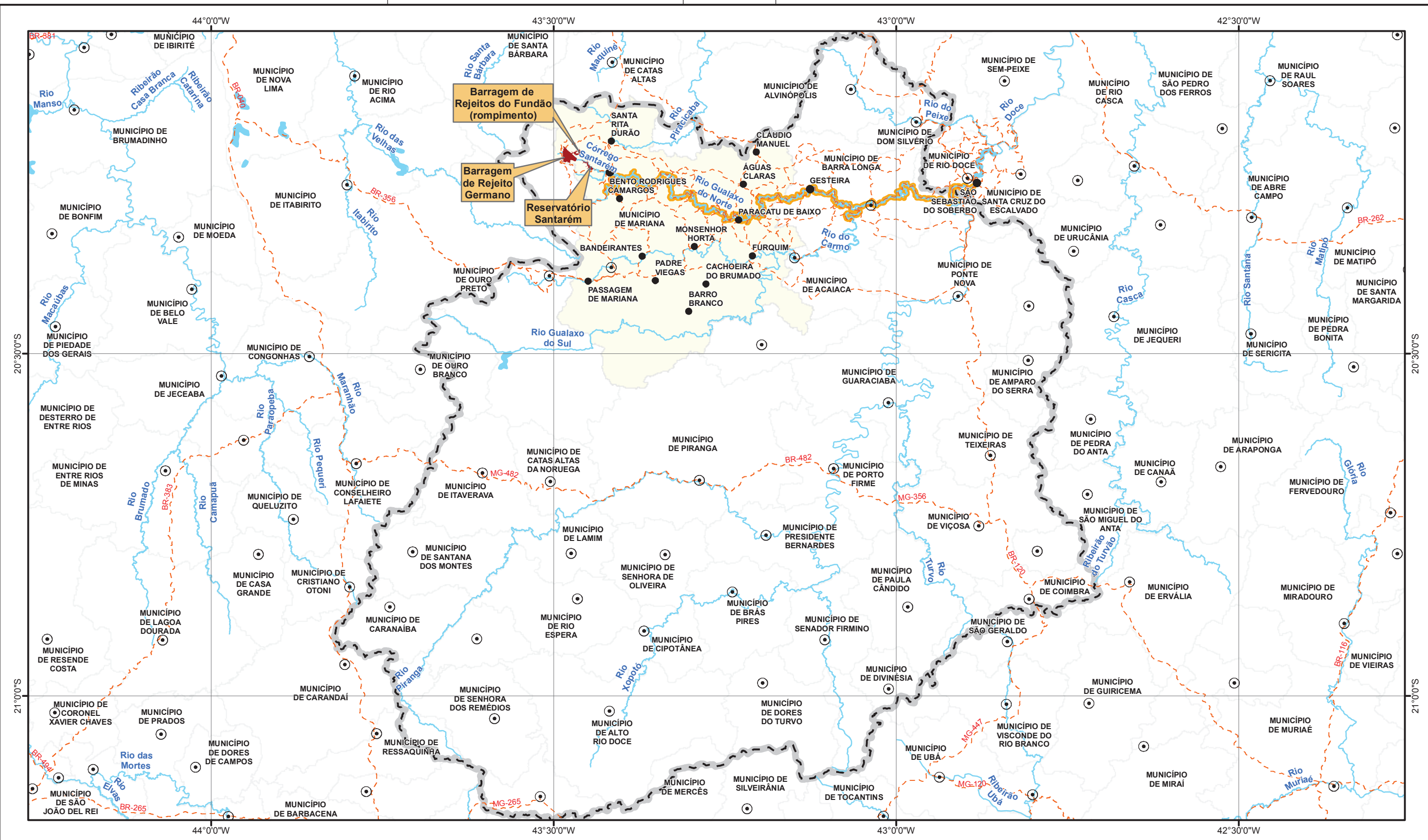
- LEGENDA**
- ⊙ Sede Municipal
 - Distritos
 - Curso D'Água
 - - - Estradas de Acesso
 - Corpo D'Água
 - ▭ Área de Estudo Local
 - Barragens de Rejeito
 - ▭ Município de Mariana
 - ▭ Limite Municipal



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ÁREA DE ESTUDO LOCAL**

	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:200.000
	GIS:	NTFE	julho/2016	Figura 3.3.1
	REV:	DC	00	



- LEGENDA**
- Sede Municipal
 - Distritos
 - ▭ Área de Estudo Regional
 - - - Estradas principais
 - Barragens de Rejeito
 - Município de Mariana
 - Limite Municipal

LOCALIZAÇÃO

Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000

0 5 10 20 km

ESCALA GRÁFICA

PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ÁREA DE ESTUDO REGIONAL**

PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:600.000
GIS:	NTFE	julho/2016	Figura 3.3.2
REV:	DC	00	



3.4 Métodos

A avaliação geomorfológica, hidrodinâmica e hidrosedimentológica do rio incluiu uma análise documental dos dados pré-rompimento disponíveis e um levantamento de campo. Os dados disponíveis para a análise documental da geomorfologia consistiram basicamente de imagens anteriores ao rompimento, sendo complementados por uma análise de relatórios disponíveis sobre as características hidrológicas dos cursos d'água e mudanças no uso do solo. Os dados disponíveis para a análise hidrológica consistiram de relatórios existentes sobre a hidrologia dos cursos d'água.

O levantamento de campo possibilitou a coleta de dados de geomorfologia "in loco" e a checagem de dados identificados durante a análise documental, ampliando o universo de informações acerca dos temas analisados. O levantamento de campo consistiu também da coleta de dados sobre os parâmetros físicos dos canais, os quais foram usados para desenvolver e caracterizar a morfologia geral dos cursos d'água na AEL e na AER.

3.4.1 Análise documental

3.4.1.1 Análise das imagens disponíveis

Interpretações da morfologia dos rios na AEL antes do rompimento foram feitas com base em imagens de satélite adquiridas e em imagens de satélite livremente disponíveis como as da plataforma Google Earth™.

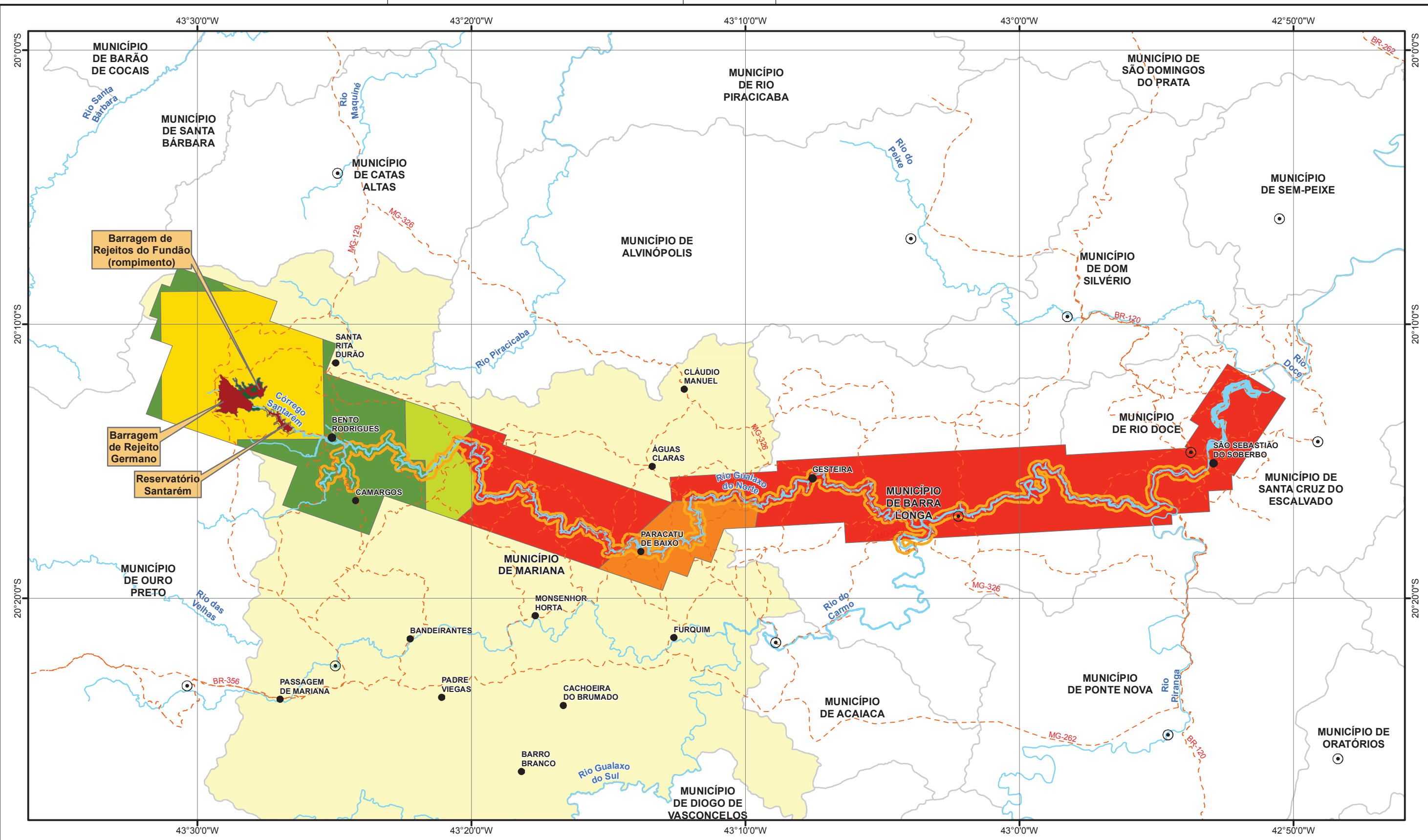
As principais características ao longo dos cursos d'água foram observadas em tela, em uma escala de detalhamento visual que variou de 1:3.000 a 1:10.000. As principais características observadas e mapeadas ao longo dos cursos d'água foram:

- Margens de canal. Foram delimitadas as margens direita e esquerda do rio principal que puderam ser observadas. Nos casos em que o canal era muito pequeno ou estreito para identificar ambas as margens separadamente, o canal foi identificado como uma única linha;
- Bancos no canal. Os bancos no canal principal (barra de pontal, bancos mediais, bancos transversais) observáveis nas imagens disponíveis foram devidamente delimitados, em particular para os cursos de maiores larguras;
- Depósitos de sedimentos associados com a confluência de tributário aos cursos d'água principais;
- Fontes de sedimentos, quando observadas, foram registradas, como os deslizamentos de terra e áreas de sedimentos expostas nas margens fluviais. Tributários e córregos íngremes sem toponímia definida em mapa foram considerados como possíveis fontes de sedimentos;
- Ilhas e áreas com vegetação dentro do canal principal;
- Limites de trecho de curso d'água, sendo que os trechos fluviais foram interpretados com base em diferentes características (tais como amplitude dos meandros, sinuosidade do canal, extensão da planície de inundação, declividade do canal), e seus limites a montante e a jusante delineados.

As imagens de satélite anteriores ao rompimento consistiam de um mosaico de imagens de diversas fontes e com diferentes resoluções (**Tabela 3.4.1**). Sua distribuição espacial e cobertura são mostradas na **Figura 3.4.1**.

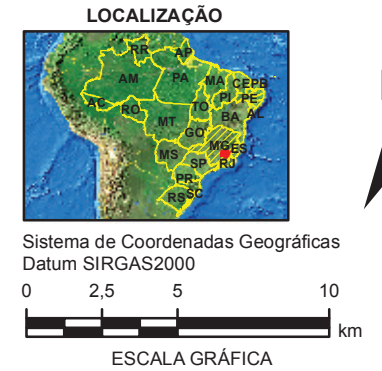
Tabela 3.4.1: Fontes de imagens de satélite anteriores ao rompimento.

Fonte	Ano	Resolução (m)
HGT atualização da área	2015	1
Aeroimagem Aerofotogrametria S.A.	2012	5
Mosaico Geral Samarco	2012	2,5
Topocart Topografia Engenharia e Aerolevantamento S/S Ltda.	2012	1
Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A.	2008	5
NASA SRTM V3 (Shuttle Radar Topograph Mission Versão 3)	2000	20



- LEGENDA**
- Sede Municipal
 - Distritos
 - - - Estradas de Acesso
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local
 - Município de Mariana
 - Limite Municipal

- Fonte do Imageamento por Satélite - Bases Utilizadas**
- HGT Atualização da área - 27/10/2015 - Resolução 1 m
 - Aeromagem Aerofotogrametria S.A - 2012 -Resolução 5 m
 - MOSAICO GERAL SAMARCO - 2012 - Resolução 2.5 m
 - Topocart Topografia Engenharia e Aerolevantamento S/S LTDA - 2012 - Resolução 1 m
 - Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A. - 2008 - Resolução 5
 - NASA - SRTM V3 1' SEC~30m pixel - 2000 - Resolução20 m



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **FONTES DO IMAGEAMENTO POR SATÉLITE**

PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:250.000
GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.4.1
REV:	DC	00	

Golder Associates



Estavam também disponíveis para análise imagens de satélite pós-rompimento datadas de 10 de novembro de 2015. As imagens pós-rompimento foram usadas para avaliar potenciais locais-alvo para a coleta de dados de campo sobre as alterações das condições das planícies de inundação após o evento de rompimento. Observaram-se limitações no uso deste conjunto de dados, que foram atribuídas ao georreferenciamento de baixa precisão das imagens pós-rompimento, sendo que pontos fixos, tais como edificações ou rodovias, apresentam deslocamentos de posição às vezes maiores do que 3 metros.

3.4.1.2 Revisão dos dados hidrológicos

Os dados hidrológicos para os maiores rios na AEL – Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce – foram fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) através de seu portal on-line HidroWeb (ANA, 2016) e pelo resumo apresentado na **Tabela 3.4.2**.

Tabela 3.4.2: Estações hidrométricas revisadas para análise.

Estação	Código da estação	Rio	Área da bacia (km ²)	Dados e período disponíveis
Fazenda Ocidente	56337000	Rio Gualaxo do Norte	529	Descarga: Jun 1938 – Jun 2015 TSS: Maio 1993 – Ago 2015
Acaiaca	56335000	Rio do Carmo	1330	Descarga: Nov 1940 – Dez 1975
Acaiaca Jusante	56335001	Rio do Carmo	1370	Descarga: Jul 1975 - Jul 2015 TSS: Jan 1985 – Dez 2015
Ponte Nova Jusante	56110005	Rio Piranga	6230	Descarga: Maio 1974 – Out 2015

Fonte: ANA 2016.

3.4.2 Levantamento de campo

Tendo como base os trechos de cursos d'água identificados durante a análise das imagens disponíveis, pontos-alvo foram selecionados para a coleta de dados de campo como suporte para a avaliação geomorfológica. Estes pontos foram identificados com base na interpretação de: adequabilidade para acesso ao local, características do canal analisado (p.ex., canal reto, sinuoso, fluxo simples ou difuso), características geomórficas (p.ex., planícies de inundação, cones aluviais, ilhas, bancos de sedimento), distribuição entre diferentes morfologias de vale fluvial na AEL e na AER, e representatividade do trecho de rio contendo o ponto-alvo.

3.4.2.1 Levantamento de campo de março e abril de 2016

O levantamento de campo foi realizado entre 29 de março e 8 de abril de 2016, consistindo de caminhamentos e observações feitas a partir das redes viárias existentes em um total de 24 pontos dentro da AEL e 18 pontos dentro da AER. O número de locais em campo visitados para cada trecho do rio foi limitado principalmente pelas condições de acesso ao local (e.g. a presença de acessos nas estradas vicinais, a estabilidade dos terrenos próximo às margens dos rios, acessibilidade através de depósitos de rejeitos parcialmente secos, etc.).

Parâmetros geomorfológicos básicos (**Tabela 3.4.3**) foram medidos em campo para caracterizar cada trecho. Esses parâmetros forneceram as medições físicas básicas de geometria do canal com qual se avaliam os rios. Os parâmetros básicos a serem coletados foram derivados a partir dos sistemas de classificação disponíveis para canais de rio. Um resumo compreensivo dos parâmetros de classificação é fornecido por Buffington (2013).



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tabela 3.4.3: Parâmetros geomorfológicos medidos no campo para caracterização do curso d'água.

Parâmetro	Descrição
Largura do leito maior	Definida por avaliação visual em campo da geometria hidráulica do canal, usando as mudanças na vegetação, mudanças na declividade das margens e a geometria do canal como características orientadoras (Church, 1992)
Profundidade média do rio com cheia plena no leito menor	Profundidade média na seção de corredeira
Profundidade máxima	Profundidade máxima medida na seção de corredeira
Largura sujeita a inundação	Determinada como a largura média da planície de inundação
Declividade de segmento fluvial	Determinada entre cristas de corredeira
Materiais do leito do canal	O tamanho mediano (D50 mm) dos materiais do canal foi estimado visualmente com base em avaliação e experiência profissional, uma vez que não era possível acessar o rio. Para alguns tributários, com materiais de leito constituídos de cascalho ou pedregulhos, foi usado um procedimento de medida de seixos para determinar a distribuição de tamanho.
Configuração em planta do canal	Meandro, reto, trançado, fluxo simples, fluxos múltiplos, etc.
Sinuosidade	Medição em escritório, usando o software GIS.
Largura do cinturão dos meandros	Medição em escritório, usando o software GIS.
Comprimento do meandro	Medição em escritório, usando o software GIS.
Amplitude dos meandros	Medição em escritório, usando o software GIS.

Medições a distância e comprimento foram feitas com trena, régua topográfica ou telêmetro, dependendo do acesso e das linhas de visão. Os pontos foram georreferenciados por meio de GPS de modo a possibilitar futuras medições no mesmo local. Os parâmetros do canal foram coletados uma vez, utilizando o canal do rio entre duas a três seções de corredeira em um ponto representativo do trecho analisado.

Fotografias georreferenciadas (geo-tagged) foram tiradas de cada ponto representativo para documentar as condições existentes na época da avaliação geomorfológica de campo.

A locação dos pontos de avaliação geomorfológica de campo e suas coordenadas são apresentadas na (Tabela 3.4.4).

Tabela 3.4.4: Pontos de Avaliação de Campo da Geomorfologia (SIRGAS 2000, UTM 23K).

Avaliação de Campo de Rio Principal	Nome do Rio	Leste	Norte	Avaliação de Campo de Tributário	Leste	Norte	Nome do Rio
SG01	Gualaxo do Norte	677218	7758119	ST01	663897	7757194	Gualaxo do Norte
SG02	Gualaxo do Norte	677695	7757941	ST02	666985	7757751	Camargo
SG03	Gualaxo do Norte	680349	7755287	ST03	678026	7770379	Piracicaba
SG04	Gualaxo do Norte	680791	7755428	ST04	686718	7758149	Águas Claras
SG05	Gualaxo do Norte	682921	7753899	ST05	704905	7757622	Água Fria
SG06	Gualaxo do Norte	685223	7753599	ST06	710021	7757088	Quebra Canoa
SG07	Gualaxo do Norte	686244	7753852	ST07	716332	7768880	Peixe

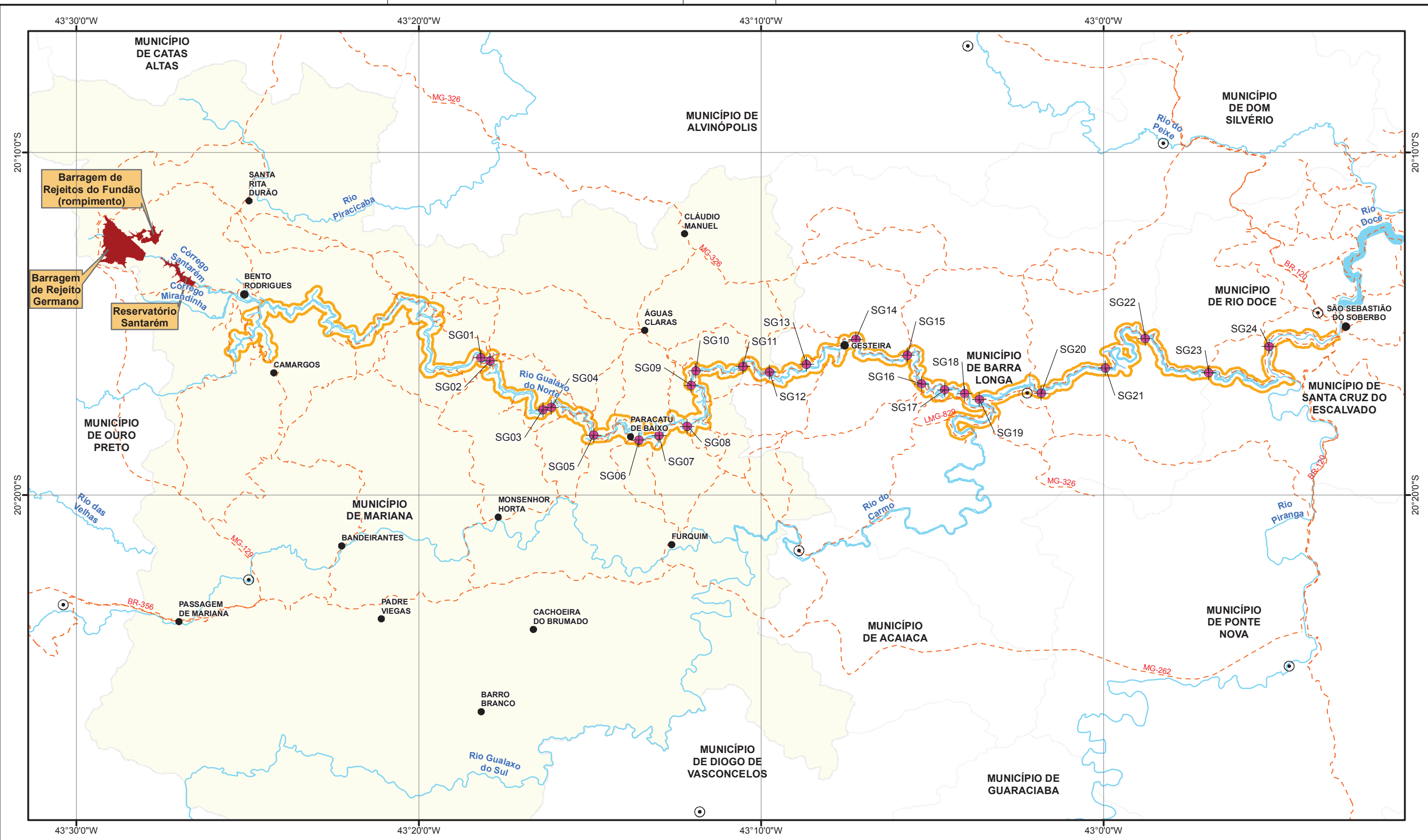


AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Avaliação de Campo de Rio Principal	Nome do Rio	Leste	Norte	Avaliação de Campo de Tributário	Leste	Norte	Nome do Rio
SG08	Gualaxo do Norte	687682	7754325	ST08	669412	7746833	Rio do Carmo
SG09	Gualaxo do Norte	687908	7756534	ST09	676916	7749140	Rio do Carmo
SG10	Gualaxo do Norte	688157	7757307	ST10	697084	7748993	Rio do Carmo
SG11	Gualaxo do Norte	690545	7757511	ST11	701237	7753816	Rio do Carmo
SG12	Gualaxo do Norte	691886	7757185	ST12	672410	7735224	Gualaxo do Sul
SG13	Gualaxo do Norte	693773	7757595	ST13	687785	7745134	Gualaxo do Sul
SG14	Gualaxo do Norte	696306	7758904	ST14	688161	7745576	Cachoeira do Brumado
SG15	Gualaxo do Norte	698921	7758023	ST15	676510	7711258	Piranga
SG16	Gualaxo do Norte	699606	7756476	ST16	680341	7712839	Pirapetinga
SG17	Gualaxo do Norte	700794	7756141	ST17	705761	7722892	Piranga
SG18	Gualaxo do Norte	701797	7755935	ST18	706140	7725656	Bacalhau
SG19	Rio do Carmo	702544	7755603				
SG20	Rio do Carmo	705705	7755898				
SG21	Rio do Carmo	708973	7757208				
SG22	Rio do Carmo	711014	7758793				
SG23	Rio do Carmo	714226	7756888				
SG24	Rio Doce	717309	7758265				

Os pontos de avaliação de campo identificados de SG01 a SG24 estão localizados dentro da AEL (**Figura 3.4.2**). Estes pontos de avaliação de campo estão situados principalmente ao longo do rio principal a acompanham o trajeto do fluxo de detritos, água e rejeitos do rompimento desde a confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte, até o Rio do Carmo, estendendo-se até a entrada do Rio Doce no Reservatório de Candonga. Nestes pontos de avaliação geomorfológica de campo, foram coletados dados para análise dos canais afetados pelo rompimento.

Os pontos de avaliação de campo identificados de ST01 a ST14 estão localizados nos tributários menores e em cursos d'água de tamanho similar ao do Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo ambos localizados dentro da AER (**Figura 3.4.3**). As medições geomorfológicas de campo feitas nestes cursos d'água foram realizadas em cursos d'água não afetados pelos rejeitos e em bacias hidrográficas que não foram diretamente afetadas pelo rompimento da barragem de rejeitos. A distribuição dos pontos de avaliação de campo foi selecionada de modo a fornecer dados geomorfológicos de campo para diversas tipologias de canal, tamanhos de canal e áreas de drenagem, de forma a possibilitar o desenvolvimento de uma caracterização da morfologia fluvial regional. A coleta de dados de campo em áreas não afetadas permitiu a formação de um conjunto de dados de referência para comparação com as áreas afetadas. Os dados de referência foram então considerados como representativos das condições naturais pré-rompimento para os rios na AEL.



LEGENDA

- Locais de Pesquisa de Campo na Área de Estudo Local
- Sede Municipal
- Distritos
- Estradas de Acesso
- Curso D'Água
- Corpo D'Água
- Barragens de Rejeito
- Área de Estudo Local
- Município de Mariana
- Limite Municipal

LOCALIZAÇÃO

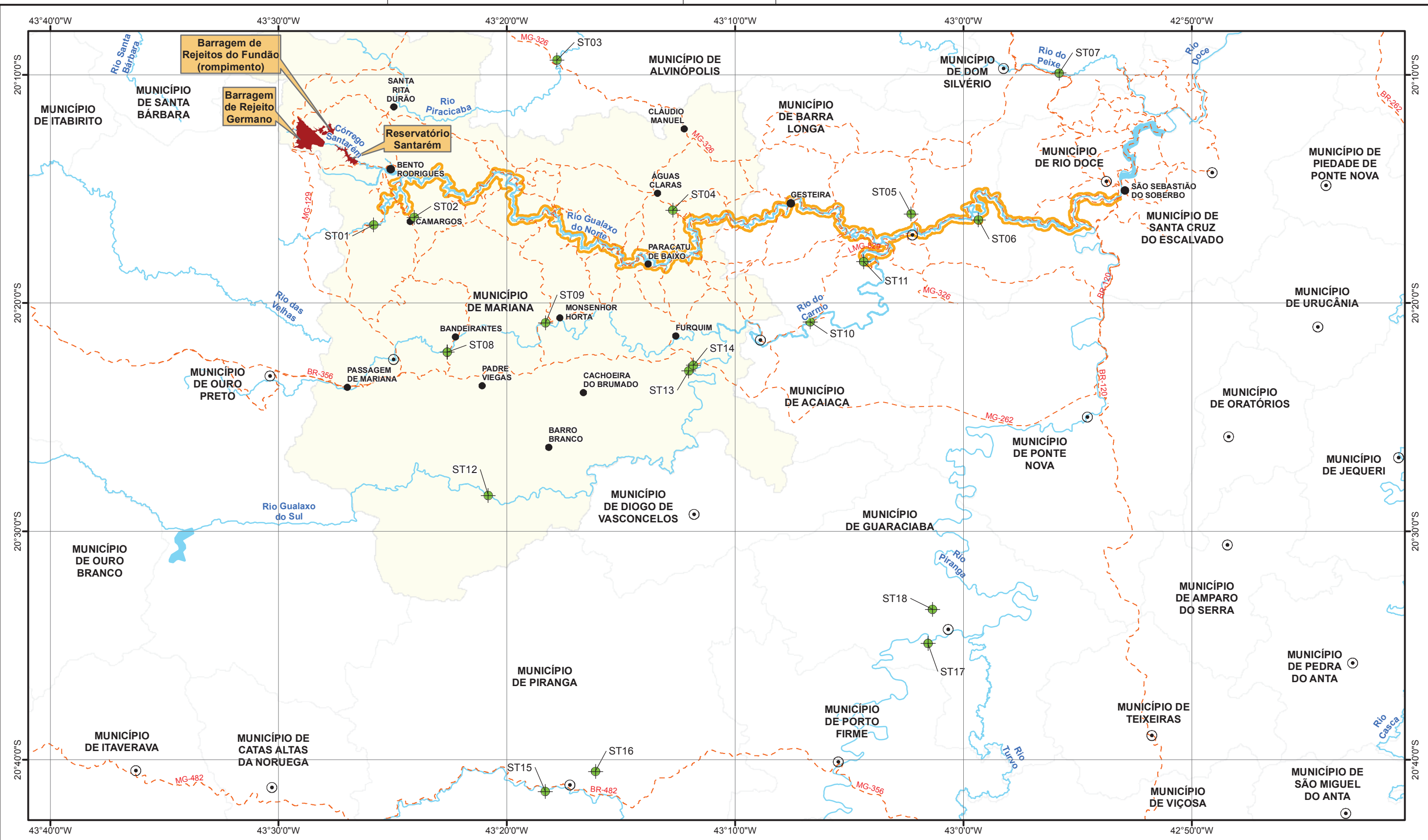
Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000

ESCALA GRÁFICA

PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **LOCAIS DE PESQUISA DE CAMPO NA ÁREA DE ESTUDO LOCAL**

PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:200.000
GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.4.2
REV:	DC	00	



LEGENDA

- Locais de Pesquisa de Campo Fora da Área de Estudo
- Área de Estudo Local
- Sede Municipal
- Distritos
- Município de Mariana
- Curso D'Água
- Estradas de Acesso
- Corpo D'Água
- Barragens de Rejeito
- Limite Municipal

LOCALIZAÇÃO

Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000

0 2,5 5 10 km

ESCALA GRÁFICA



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **LOCAIS DE PESQUISA DE CAMPO NA ÁREA DE ESTUDO REGIONAL**

PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:300.000
GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.4.3
REV:	DC	00	

Golder Associates



3.4.2.2 Levantamento de campo de Agosto de 2016

Um segundo levantamento de campo foi realizado em 22 e 23 de agosto de 2016 para revisar os efeitos geomorfológicos contínuos do rompimento. Esse levantamento de campo consistiu de caminhamentos de trechos de rio selecionados incluindo Rio Gualaxo do Norte superior a montante da confluência do Córrego Santarém e Rio Gualaxo do Norte. Rio Gualaxo do Norte a partir de aproximadamente 8 km a montante da vila de Paracatu para confluência do Rio Gualaxo do Norte com rio do Carmo em Barra Longa; e Rio do Carmo a partir de Barra Longa com cerca de 10 km a jusante de Barra Longa. Os dados observacionais coletados durante esse levantamento foram usados para revisar e refinar as análises realizadas nos dados coletados durante o levantamento de campo de março e abril.

Além disso, medições de espessura dos rejeitos foram realizadas usando exposições existentes ou escavadas à mão de camadas sedimentares no fundo do vale. Aproximadamente 55 medições de espessura de rejeitos extravasado foram coletados incluindo três perfis de transectos orientados perpendicularmente em direção ao fluxo e que se estendem desde o limite da invasão de rejeitos até as margens dos canais. Os perfis foram coletados em rejeitos não perturbados a aproximadamente 8 km e 6 km a montante da vila de Paracatu e em Paracatu. Observações de espessura de rejeitos dentro do canal foram limitadas pelo estado saturado continuado dos rejeitos e questões de segurança em andar através de uma crosta de rejeitos pouco desenvolvida.

3.4.3 Voo de reconhecimento em helicóptero

Um voo de visão geral de helicóptero da seção impactada do rio a partir do reservatório de Candonga até o local do rompimento da Barragem de Fundão foi realizado em 25 de agosto de 2016. O voo teve duração de 3 horas. A rota do helicóptero seguiu o vale do rio a partir do reservatório de Candonga no sentido montante até a área do rompimento da Barragem de Fundão. Fotografias oblíquas foram tiradas de áreas de planícies, de áreas ribeirinhas, da morfologia do canal, e dos trabalhos de reabilitação realizados até a data. Essas fotografias foram georreferenciadas a partir do trajeto de voo do helicóptero registrado em GPS portátil, usando o software GeoSetter™.

3.5 Resultados

3.5.1 Observações do voo de visão geral

O voo de visão geral de helicóptero forneceu observações detalhadas do rio principal e dos tributários a partir do reservatório de Candonga para a Barragem de Fundão. Essas observações confirmam e suportam observações e interpretações criadas em março de 2016, bem como durante o período de 22 e 23 de agosto, que constituem a base desse relatório. Fotografias representativas tiradas durante o voo são apresentadas no **Anexo A-5**.

O sistema fluvial é primeiramente um canal de segmento único com exceção do rio Doce, que é um canal de múltiplos segmentos como observado na extremidade a montante do reservatório de Candonga. Isso foi observado do ar e também em imagens de antes do rompimento. O canal principal do Rio Gualaxo do Norte exibe uma plataforma variável a partir de trechos de planície de inundação aluvial com algumas evidências de canal sinuoso até trechos retos não-aluviais controlados pela geometria do vale e pelo leito rochoso. O canal com múltiplo segmento do rio Doce parece ser parcialmente controlado pelo leito rochoso bem como pela carga e gradiente de sedimento, uma vez que ilhas defendidas de leito rochoso eram visíveis no rio. A extremidade a montante da seção impactada do Rio Gualaxo do Norte flui através de um estreito cânion controlado por leito rochoso. Esse cânion parece ter atenuado o fluxo de inundação de detritos porque a linha de lama observada nas árvores a montante do cânion é maior do que a linha de lama seguindo o evento do rompimento. A extensão de deposição de rejeitos pôde ainda ser observada em muitas áreas. Além disso, a extensão das obras de reabilitação das áreas impactadas realizadas até a data foi observada. Essas obras parecem incluir trabalhos em uma série de planícies de inundação impactadas pelos rejeitos depositados através da classificação, reconformação e revegetação do material depositado. O esforço envolvido na reconformação dos rejeitos foi suficiente para tornar difícil identificar a extensão para as quais os rejeitos



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

afetaram as áreas de terraço. Em algumas áreas de terraço os rejeitos tem sido escavados, misturados com solo nativo, ou removido para estocagem fora da planície de inundação.

Em áreas de terraço impactadas pela deposição de rejeito, erosão superficial de áreas vegetadas e não-vegetadas foi observada em áreas reconformadas e áreas ainda em tratamento. Essa erosão superficial tipicamente ocorreu como uma rede de drenagem de sulcos, estendendo a partir dos limites da inundação de detritos da área impactada para as áreas ripárias. Os sulcos tipicamente formam uma rede de drenagem paralela e dendrítica dependendo do declive e da largura da planície de inundação. Erosão em sulcos era particularmente notável em áreas de terraço que não foram reconformadas ou revegetadas.

As margens dos rios dentro da área de estudo variaram em grau de erosão ou deposição num padrão comumente observado em rios. Barras deposicionais de sedimento (a maioria provavelmente constituídas de rejeitos e solos de planície de inundação arrastados) foram observadas no interior de curvas e bancos de corte erosivos foram observados no exterior de curvas. Barras laterais foram observadas em segmentos de canal reto, tipicamente associados com declive, mas não com os bancos rebaixados. Barras de sedimento foram observadas no rio em locais similares em imagens anteriores ao rompimento e podem não estar especificamente associadas ao evento do rompimento. Margens do rio inclinadas foram também observadas nos trechos de canal reto não associadas com barras laterais. Solos naturais erodíveis em vários trechos estreitos e cânions resultaram em encostas íngremes com vegetação suprimida e que estão atualmente contribuindo para o aporte de sedimentos naturais no rio. Pelo menos em dois locais, estas encostas erodíveis têm desenvolvido em grandes falhas inclinadas, que estão liberando sedimento natural para o rio. Estas falhas inclinadas estão situadas aproximadamente 28km a jusante da confluência do Córrego Santarém e Rio Gualaxo do Norte e cerca de 7 km a montante da confluência do Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo.

A geologia do leito rochoso subjacente foi observada exercendo um forte controle na plataforma do canal do rio. O forte controle da geologia do leito rochoso nos perfis verticais do rio foram observados incluindo áreas de cânion de leito rochoso e afloramentos de rocha orientados perpendicularmente através do rio. Esses afloramentos parecem resultar em soleiras resistentes a erosão controlando, desse modo, a elevação e declinação do rio, e provavelmente exercendo controle significativo na largura e profundidade do canal.

As margens do canal e áreas ripárias parecem estar reestabelecendo sua vegetação. Em algumas áreas essa recuperação vegetativa ao longo das margens do rio excedem a recuperação da planície de inundação. Observações visuais inferiram que essa recuperação mais ligeira da vegetação ripária poderia estar atribuída a retenção do significativo tapete de raízes remanescente nas margens do rio logo após o rompimento. A retenção de material rizoide nas margens do rio provavelmente forneceu resistência a erosão, deste modo limitando o alargamento do canal durante o evento de fluxo de detritos.

O sistema fluvial aparece como um contínuo de trechos de planície de inundação deposicionais separados pelos trechos de transporte tipo cânion. O trecho fonte para o fluxo de detritos é o rompimento da Barragem de Fundão. Observações dos trechos de cânion indicaram que eles têm, principalmente, vasculhado o leito rochoso com limitação a nenhum armazenamento de rejeitos. À jusante dos trechos de cânion, barras medianas, foram tipicamente observadas no canal onde a planície de inundação se alarga novamente. Essas barras medianas foram inferidas para marcar uma queda na capacidade de transporte de sedimentos locais. Observou-se barras medianas em locais similares em imagens anteriores ao rompimento e podem não estar especificamente relacionados ao evento de rompimento.

Mudanças na capacidade de transporte e no fluxo de sedimentos foram observadas ao longo do rio. Em específico, áreas impactadas de rejeitos mais volumosos foram observados a montante dos trechos de rio tipo cânion e a jusante de áreas impactadas estreitas. Essa variabilidade em largura foi atribuída à geometria do vale e também ao potencial de represamento de sedimento e água do fluxo de detritos durante o evento do rompimento. Esse represamento inferido provavelmente contribuiu para a estimativa da taxa de atenuação do fluxo de detritos à medida que se distanciava à jusante da Barragem de Fundão.

Rejeitos estocados dentro do canal do rio foram observados como sendo móveis baseado na cor da água. Notou-se que o Rio Gualaxo do Norte possui uma cor marrom a alaranjado. As águas de drenagem fora do Córrego de Santarém eram mais alaranjadas do que as águas de drenagem fora do Rio Gualaxo do Norte superior, indicando uma concentração mais elevada de sólidos suspensos descarregando a partir do Córrego



Santarém do que a partir de áreas do Rio Gualaxo do Norte superior afetadas pelo fluxo da água represada. Em áreas onde tributários foram restaurados, os tributários, em geral, estavam descarregando água límpida para dentro do Rio Gualaxo do Norte. Observou-se que a zona de mistura dessa água límpida com a água turva do Rio Gualaxo do Norte estava entre 1-2 larguras do leito menor do rio principal.

3.5.2 Avaliação da Hidrologia

Uma avaliação da hidrologia foi realizada pela TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda (TEC3). A avaliação da hidrologia é apresentada no **(Anexo A-3)** desse relatório. A avaliação da hidrologia apresenta os resultados de uma análise de períodos de retorno para eventos de fluxo extremo ao longo do canal principal do Rio Gualaxo do Norte a partir da extremidade a montante – Barragem do Fundão até extremidade a jusante – reservatório de Candonga. Os resultados principais estão resumidos abaixo na **(Tabela 3.5.1)**. Essa avaliação da hidrologia realizada pela TEC3 baseou-se nos dados hidrométricos regionais disponíveis como resumidos no **Anexo A-3**. A análise considerou dados hidrométricos regionais disponíveis e desenvolveu uma curva da área de descarga versus a área da bacia para estimar fluxos dentro da área de estudo.

Os resultados da avaliação hidrológica (TEC3, **Anexo A-3**) mostram um aumento típico nas vazões de pico com aumento da área da bacia. O período de retorno de dois anos corresponde às vazões de pico típicas anuais para cada localização. As menores vazões de pico foram encontradas nas menores bacias e nas áreas mais a montante. Para o Córrego Santarém as vazões de pico estimadas variam de 11 m³/s para uma cheia típica anual com período de retorno de 2 anos, 49 m³/s para o período de retorno de 100 anos, e 94 m³/s para o período de retorno de 10.000 anos.

Para o Rio Gualaxo do Norte depois da confluência com Córrego Santarém, as vazões de pico estimadas variam de 38 m³/s para o período de retorno de 2 anos, até 180 m³/s para o período de retorno de 100 anos, e 340 m³/s para o período de retorno de 10.000 anos.

Para a foz do Rio Gualaxo do Norte, antes da confluência com o Rio Carmo, as vazões de pico estimadas variam de 110 m³/s para o período de retorno de 2 anos, até 500 m³/s para o período de retorno de 100 anos, e 970 m³/s para o período de retorno de 10.000 anos.

Para a entrada do Rio Doce dentro do reservatório de Candonga as vazões de pico estimadas variam de 560 m³/s para o período de retorno de 2 anos, até 1.730 m³/s para o período de retorno de 100 anos, e 3.100 m³/s para o período de retorno de 10.000 anos.

Tabela 3.5.1. Estimativas das vazões de pico para a área de estudo local

Localização	Área de drenagem (km ²)	Período de retorno (anos) e vazões de pico (m ³ /s)									
		2	5	10	20	50	100	200	500	1,000	10,000
Bento Rodrigues (foz do Córrego Santarém)	45.7	11	20	26	33	42	49	56	65	71	94
Rio Gualaxo do Norte á montante Córrego Santarém	121	28	51	68	86	110	130	140	170	190	240
Rio Gualaxo do Norte a jusante Córrego Santarém	167	38	70	95	120	150	180	200	230	260	340



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Localização	Área de drenagem (km ²)	Período de retorno (anos) e vazões de pico (m ³ /s)									
		2	5	10	20	50	100	200	500	1,000	10,000
Foz do rio Gualaxo do Norte (montante Barra Longa)	559	110	200	270	340	430	500	570	660	730	970
Rio do Carmo em Barra Longa	2,049	290	460	590	720	890	1,000	1,200	1,300	1,500	1,900
Rio do Carmo (Confluência Rio Doce)	2,263	320	500	650	790	980	1,100	1,300	1,500	1,600	2,100
Entrada reservatório Candonga (Rio Doce)	8,900	560	830	1,040	1,250	1,520	1,730	1,930	2,210	2,420	3,100

Avaliações hidrológicas adicionais foram realizadas em nome da Samarco pela SPEC para avaliar parâmetros hidrológicos para a construção de diques propostos (GD1, GD2, e GD3) no Rio Gualaxo do Norte (nhc, pers com, 28 de julho de 2016). Golder entende que há dois métodos correntemente em uso no Brasil, um usando uma análise regional de dados hidrométricos e outro usando um método precipitação-escoamento; o método precipitação-escoamento produz tipicamente estimativas elevadas (TEC3, pers com, 22 de agosto de 2016). É provável que os dois relatórios foram usados para dois métodos diferentes para estimar vazões de pico.

Observações coletadas durante o levantamento de campo geomorfológico sugere que as estimativas de descarga fornecidas pela TEC3 estão mais próximas do canal formando magnitudes de fluxo que são implicadas pela geometria do canal existente no Rio Gualaxo do Norte. Para o Rio Gualaxo do Norte, o fluxo do leito fluvial normal parece coincidir com o período de retorno de 10 anos do evento de inundação (Karen Dingley, pers com, 24 de agosto de 2016) baseado na modelagem HEC-RAS de níveis de inundação em Barra Longa. A capacidade da geometria fluvial observada para transportar as estimativas de vazões de pico de 10 anos fornecidas (**Tabela 3.5.1**) foram avaliadas analiticamente em três locais, na extremidade a montante da AEL no Rio Gualaxo do Norte a jusante da confluência com o Córrego Santarém, meio caminho através do AEL em Paracatu e perto da extremidade jusante da AEL em Barra Longa. As capacidades da geometria do canal estimadas em fluxo de leito fluvial normal para larguras e profundidades de leito fluvial normal principal nessas localizações, e aplicando um n de níveis de 0,04, são:

- Rio Gualaxo do Norte (extremidade a montante) – 57 m³/s, largura 65 m, profundidade 0.9 m, declive 0.2%;
- Rio Gualaxo do Norte em Paracatu (meio do caminho, Q₁₀ = 146 m³/s, área de bacia 280 km²) – 149 m³/s, largura 45 m, profundidade 1.9 m, declive 0.2%;
- Rio do Carmo em Barra Longa (extremidade a jusante) – 505 m³/s, largura 103 m, profundidade 2.7 m, declive 0.1%

A vazão de pico de 10 anos em Paracatu foi estimada com base em um ajuste da área de bacia de função de potência para as descargas nas localizações adjacentes no Rio Gualaxo do Norte. As capacidades estimadas do canal com base nas geometrias do canal visível são comparáveis as estimativas de vazão de pico de 10 anos apresentadas na (**Tabela 3.5.3**) e sugere-se que as estimativas mais abrangentes não podem ser representativas de condições do Rio Gualaxo do Norte.

Para referência, o período de retorno inicial estimado do fluxo associado com o evento de rompimento da Barragem de Fundão e no Córrego de Santarém em Bento Rodrigues foi significativamente maior do que o



evento de descarga de água limpa de 10.000 anos (Golder, 2016f). A descarga de detritos do evento foi estimada ser cerca de 30x maior do que um evento de descarga de água limpa de 10.000 anos estimado em Bento Rodrigues (área de drenagem de aproximadamente 45 km²) e 4x maior do que um evento de água limpa de 10.000 anos estimado na PCH Bicas (área de drenagem de aproximadamente 200 km²). Esses volumes de descarga excedem o evento de 10.000 anos mesmo tendo em consideração um fator de volume de 2x para os detritos incorporados dentro do fluxo (Julien and Leon, 2000). A jusante do Córrego Santarém, a descarga do rompimento foi estimada próxima ao volume de descarga associado com uma descarga de água limpa de 10.000 anos no momento em que a onda do fluxo de detritos alcançou o Rio do Carmo em Barra Longa.

Essa redução no período de retorno pode ser atribuída tanto para o aumento na área de drenagem a receber o fluxo do rompimento que se moveu a jusante quanto ao efeito de atenuação dos trechos de cânion e estreitos do Rio Gualaxo do Norte. Significativamente, um cânion de leito rochoso estreito e longo está situado no Rio Gualaxo do Norte cerca de 1.5 km a jusante da confluência do Córrego de Santarém e do Rio Gualaxo do Norte. Vídeos do evento de rompimento disponíveis publicamente² mostram significativa água represada da descarga do rompimento a montante desse cânion. A água represada e a onda de água e detritos acima do vale é indicativo da atenuação do fluxo no Rio Gualaxo do Norte.

As estimativas iniciais devem ser tratadas com cautela por causa dos efeitos da água represada inferidos das seções do cânion dentro do rio, que resultará em níveis de água e detritos mais altos do que aqueles associados com o fluxo que não foi restringido. Esse efeito de água represada foi observado no vídeo disponível publicamente através da metragem da área ao redor da confluência do Córrego Santarém com Rio Gualaxo do Norte. Além disso, uma constrição a jusante de Barra Longa foi inferida pela modelagem numérica dos níveis de inundação (Karen Dingley, pers com., 24 de agosto de 2016) levando a um efeito de remanso. A modelagem numérica do evento de fluxo de detritos em Barra Longa usando HEC-RAS sugeriu que a extensão da inundação associada com o fluxo de detritos é consistente com um evento de inundação de água limpa de 25 anos nessa localização (TEC3, 2016). Embora resultados de modelagem adicional para entrada na AEL não estão disponíveis, esses dados teriam sugerido atenuação significativa da onda de fluxo de detritos como percorrido a jusante. A revisão do imageamento disponível do evento de inundação e das observações de campo geomorfológicas suportam essa interpretação. As observações de mudança geomorfológica limitada no rio a montante do Córrego Santarém fazem sentido considerando-se o evento de atenuação do fluxo de detritos.

3.5.3 Análise documental

As imagens pré-rompimento foram analisadas em formato eletrônico usando o software ArcGIS. A atividade foi executada primariamente usando imagens de satélite adquiridas (**Tabela 3.5.2**), complementadas por imagens livremente disponíveis na plataforma Google EarthTM.

As principais feições ao longo dos cursos d'água foram observadas, na fase de planejamento, com uma escala de visualização de 1:10.000. Feições-chaves observadas ao longo do rio principal foram usadas para identificar e delinear as diferentes tipologias de segmentos geomorfológicos. Foram identificados cinco trechos-tipos de rio a partir da análise das imagens. As principais características para cada tipo de segmento são apresentadas na (**Tabela 3.5.2**).

Tabela 3.5.2: Critérios de Identificação dos Trechos de Rio.

Tipo de Trecho	Descrição dos Critérios
Cânion (CN)	Ausência de planície de inundação.
	Ausência de ilhas, bancos de sedimentos.

² Vídeos postados no Youtube encontrados usando os termos de busca "tailings spill brazil", "tailings spill Bento Rodrigues" and "rompimento de barragem em Mariana", acessado em 27/04/2016.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tipo de Trecho	Descrição dos Critérios
	<p>Perfil longitudinal elevado, geralmente acima de 2,5%.</p> <p>O leito é composto principalmente de matacões e afloramentos de rocha que frequentemente constituem controles de declive para o rio (p.ex. cachoeiras, corredeiras).</p> <p>Encostas dos vales íngremes a escarpados, frequentemente em rocha, podendo haver horizontes de solos delgados e descontínuos.</p> <p>Morfologia de canal do tipo sucessão de cascatas-poços.</p>
Confinado (CF)	<p>Similar ao trecho tipo cânion, porém com as seguintes características:</p> <ul style="list-style-type: none">■ O rio é confinado por seu vale com pouco ou nenhum espaço para migração lateral. Não há planície de inundação e os segmentos de vertentes próximos são íngremes (geralmente 45 graus). Coberturas pedológicas superficiais delgadas são mais frequentes.■ O leito é constituído principalmente de matacões, com algumas seções controladas pelo leito rochoso (queda d'água ou corredeiras).■ Barras de canal isolados podem ficar expostos durante períodos de vazante.■ Gradientes relativamente íngremes, tipicamente acima de 0,5%.■ Morfologia de canal cascata-poço ou corredeira-poço.
Estreito (NR)	<p>O curso do rio é estreito, mas possui limitadas seções de planície de inundação que se alternam em cada lado do rio. A planície de inundação tem até duas vezes a largura do leito menor do rio.</p> <p>Barras de pontal estão presentes nas curvas internas de meandros, sendo visíveis em períodos de vazante.</p> <p>Saliências no leito rochoso ou grandes blocos podem estar presentes no canal principal, mas não são característicos.</p> <p>As margens fluviais são íngremes.</p> <p>Predomínio no transporte de sedimentos.</p> <p>Os gradientes típicos do canal estão entre 0,5% e 0,2%.</p> <p>Morfologia do canal tipo cascata-poço ou corredeira-poço.</p>
Larga com pequena planície de inundação (BFS)	<p>A planície de inundação está presente na maior parte do comprimento do trecho, e é tipicamente até 4 vezes a largura do leito menor.</p> <p>Materiais do canal são uma mistura de cascalho e areia, com materiais grossos (cascalho) em locais de corredeiras.</p> <p>Controles de gradiente podem estar presentes, tais como saliências de leito rochoso ou grandes matacões de rocha que podem desenvolver depósitos de sedimento a montante e a jusante deles.</p> <p>Migração de meandros são típicos, e o rio migra dentro de sua planície de inundação.</p> <p>As margens de rio são compostas principalmente de material fino (aluvial). As margens são vegetadas e relativamente estáveis. A curva externa do meandro pode ter erosão ativa.</p> <p>Morfologia do canal de corredeira, com gradientes típicos de canal menores do que 0,3%.</p>
Larga com grande planície de inundação (BFL)	<p>A planície de inundação é larga e maior do que 4 vezes a largura do leito menor.</p> <p>Materiais do canal são uma mistura de cascalho e areia, com materiais grossos (cascalho) em localizações de corredeiras.</p> <p>Limitado ou nenhum controle de gradiente do canal.</p> <p>Migração de meandros são típicos, e o rio ativamente migra dentro de sua planície de inundação.</p>



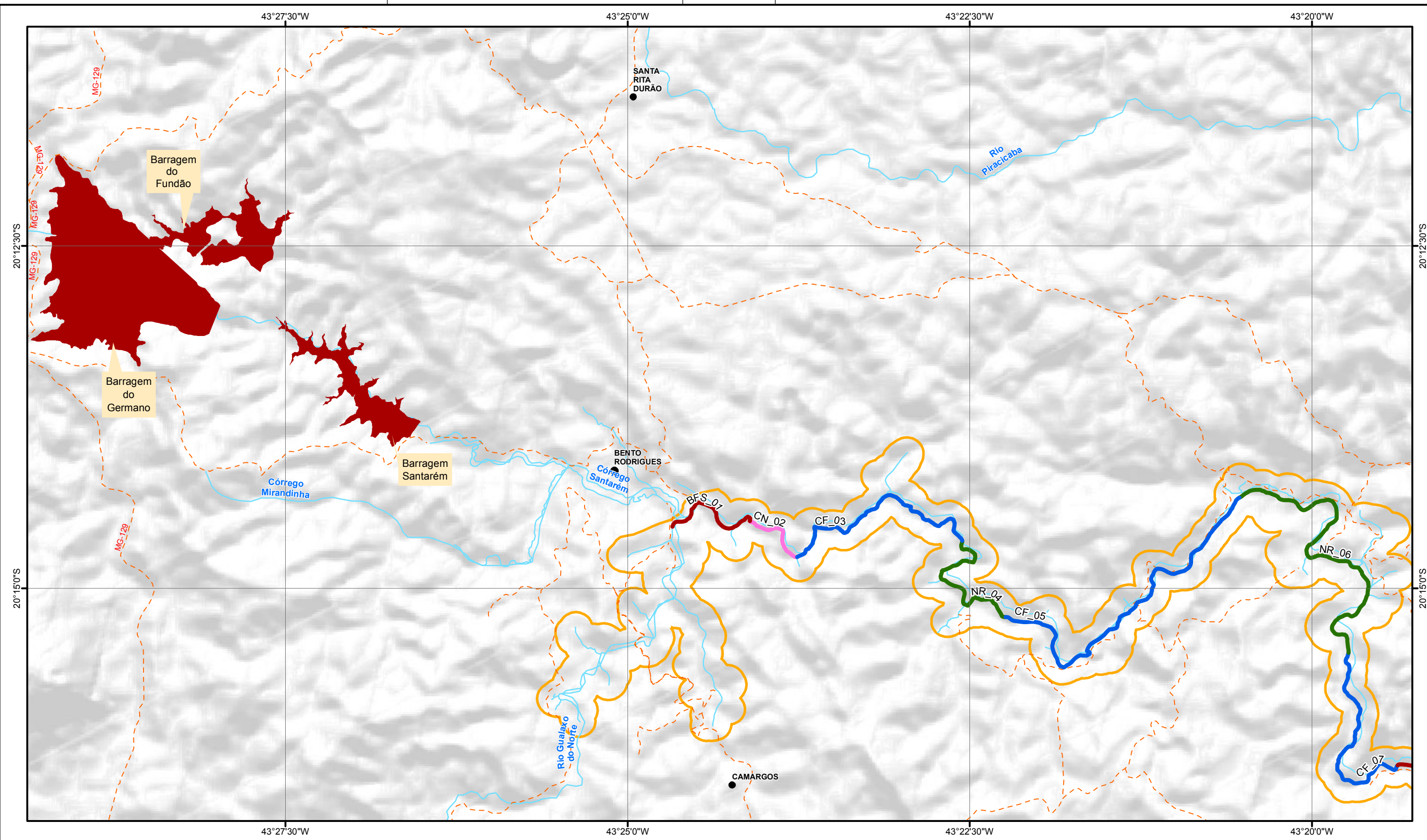
AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tipo de Trecho	Descrição dos Critérios
	Ilhas e canais laterais podem se desenvolver.
	As margens de rio são compostas principalmente de material fino (aluvial). As margens são vegetadas e relativamente estáveis. A curva externa do meandro pode ter erosão ativa.
	Os gradientes de canais típicos são menores do que 0.2%
	Morfologia do canal corredeira

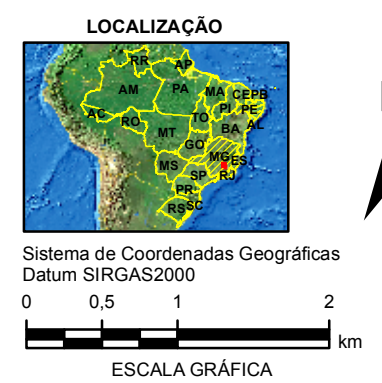
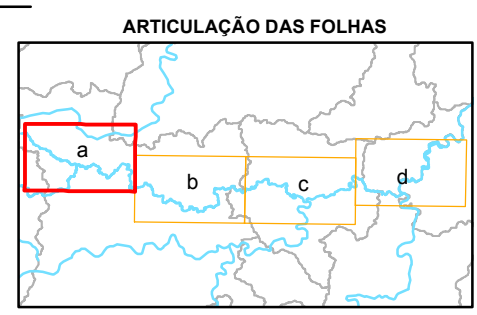
Observou-se que a distribuição dos trechos-tipos ao longo do rio principal geralmente segue um padrão alternado entre trechos com planícies de inundação geralmente mais largas (p.ex., BFS, BFL), trechos com planícies de inundação geralmente mais estreitas e trechos sem planície de inundação (p.ex., CN, CF, NR). A expressão morfológica deste padrão pode ser vista na **(Figura 3.5.1)** e na **(Tabela 3.5.2)**, e quando vista em planta, como uma relação montante-jusante em que os trechos de rio com planície de inundação desenvolvida (i.e., trechos BFS e BFL) estão localizados a montante de um trecho do tipo confinado ou do tipo cânion (i.e., trechos CN e CF). Os trechos estreitos (NR) parecem ser transições entre os demais trechos. Este padrão resulta das características do terreno circundante e da litologia subjacente; quando materiais duros (p.ex., leito rochoso e matacões ou laterais de vales íngremes que são suficientemente estreitos para restringir a passagem de grandes vazões) são encontrados pelo fluxo do rio, criam um controle de declividade hidráulica dentro do rio. Este controle hidráulico tende a limitar a capacidade do rio de ajustar a declividade local do leito em caso de altas vazões (controle de declividade) ou a vazão a jusante (estrangulamento topográfico), geralmente parecendo resultar em um efeito de remanso localizado a montante, o que estimula a deposição de sedimentos e o desenvolvimento de uma planície de inundação.

A ocorrência de um efeito de remanso tem sido confirmada por modelagem hidrodinâmica numérica do rio em vários eventos de inundação teórica (Golder, 2016a). No caso de inundações moderadas (p.ex., eventos de inundação de 10 anos e de 25 anos), o represamento de água no fundo do vale é visível a partir de resultados de modelagem. Represamentos geralmente se formam em uma área com baixas velocidades da água, o que favorece a deposição de sedimentos e contribui para a criação de planícies de inundação. Quanto mais extenso for o represamento, maior será a área potencial de formação de planície de inundação. Esta sequência de trechos-tipos de planície de inundação e trechos-tipos de confinamento tem importantes implicações para o transporte de sólidos (tanto sedimentos como rejeitos) no rio. Este efeito será discutido posteriormente neste relatório, na Seção 3.5.6.3.

Os trechos de rio identificados pela análise documental são apresentados na **(Tabela 3.5.3)**. A distribuição espacial dos trechos é mostrada na **(Figura 3.5.1)**.



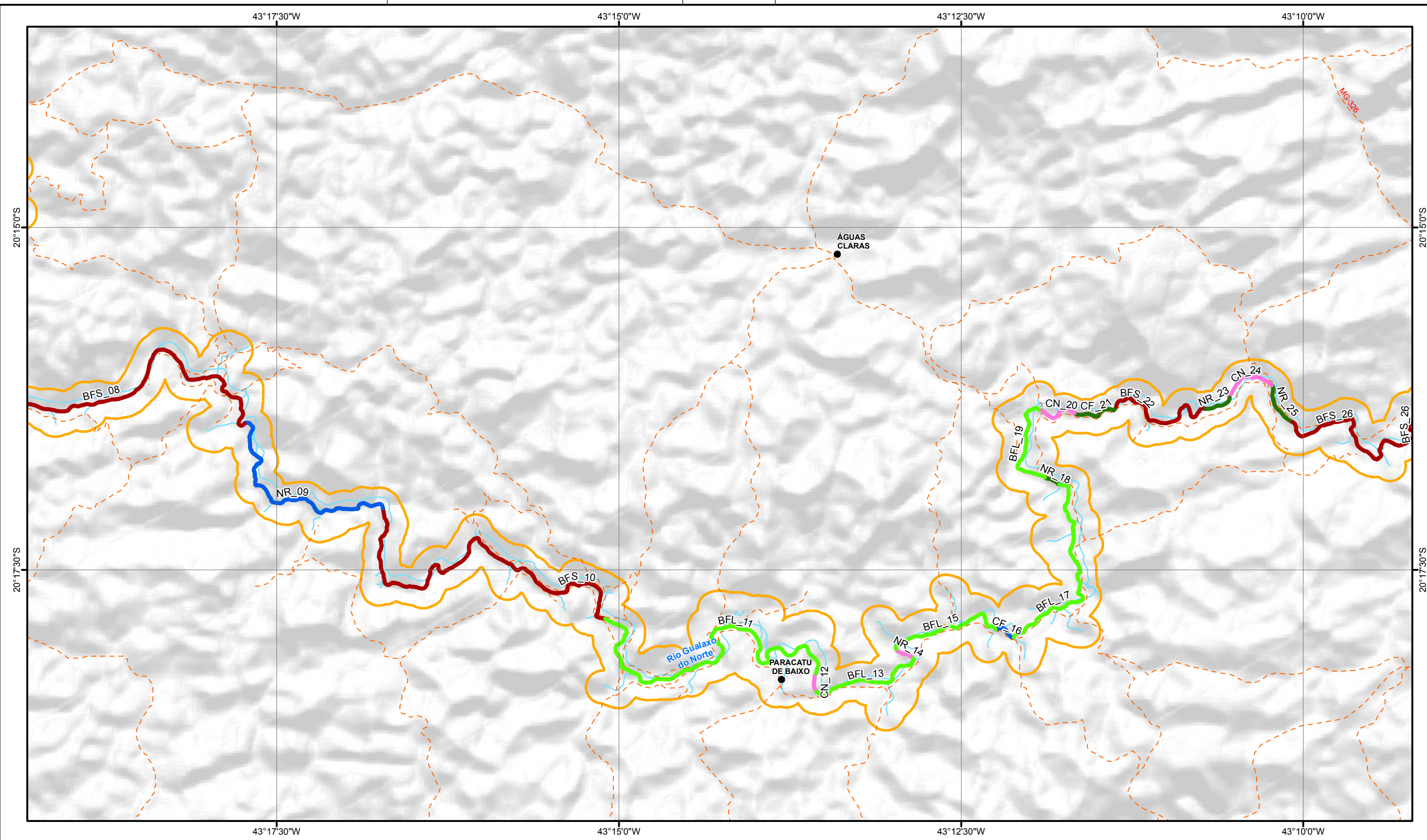
- LEGENDA**
- - - Estradas de Acesso
 - Trechos de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local



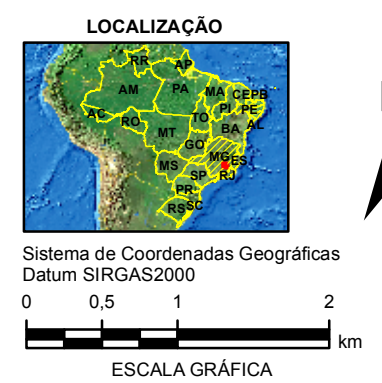
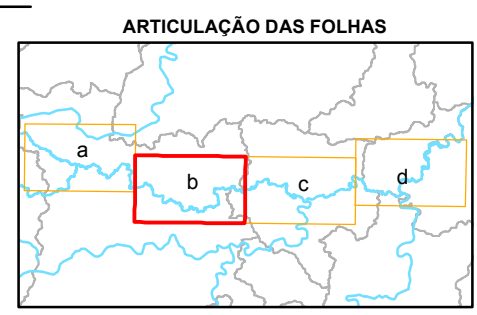
PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **TRECHOS DE RIO NA ÁREA DE ESTUDO**

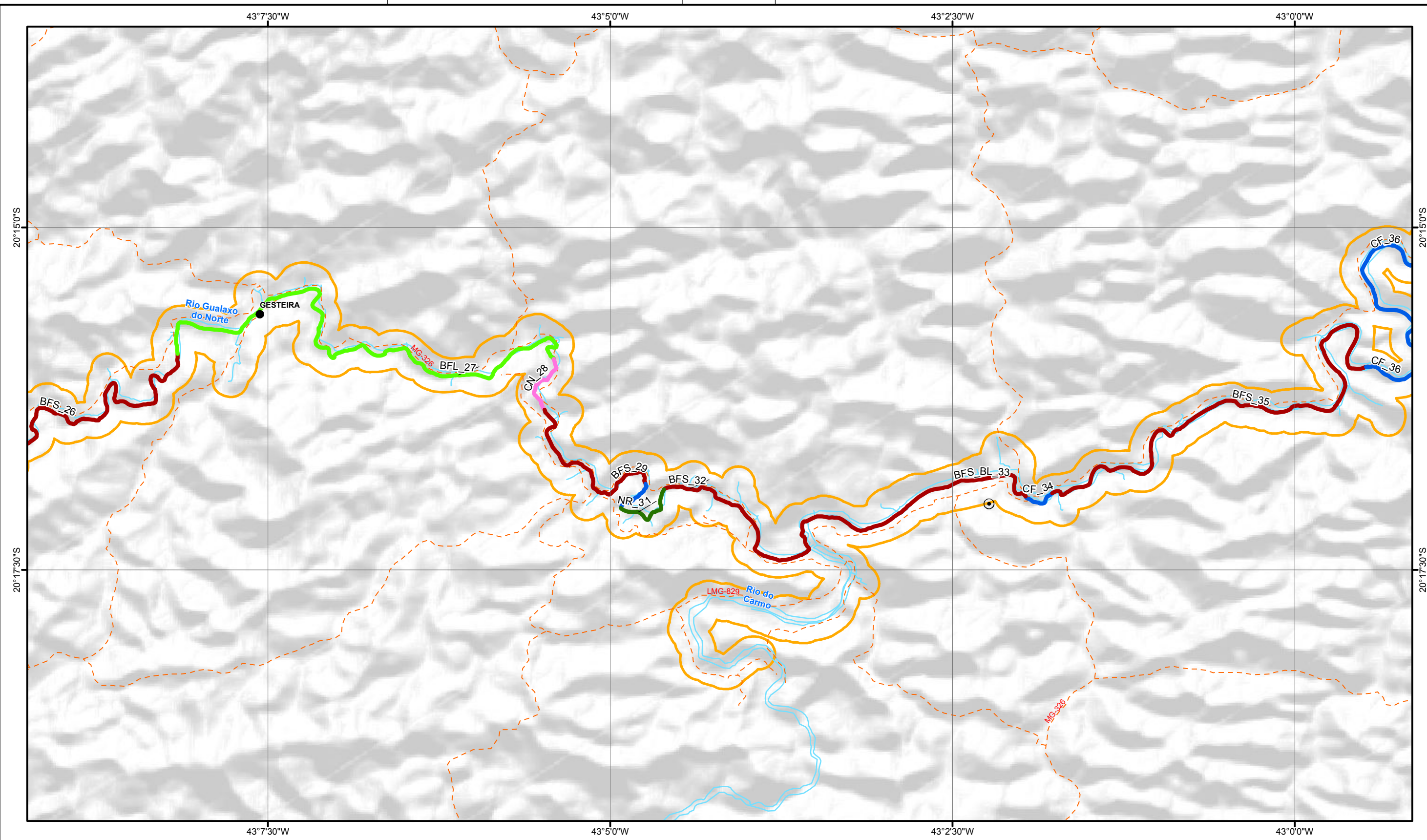
	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:50.000
	GIS:	NTFE	outubro/2016	Figure 3.4.1 a
	REV:	DC	00	



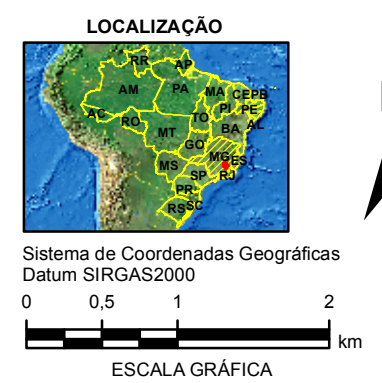
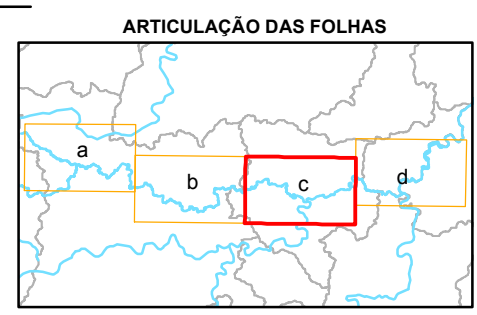
- LEGENDA**
- Estradas de Acesso
 - Trechos de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local



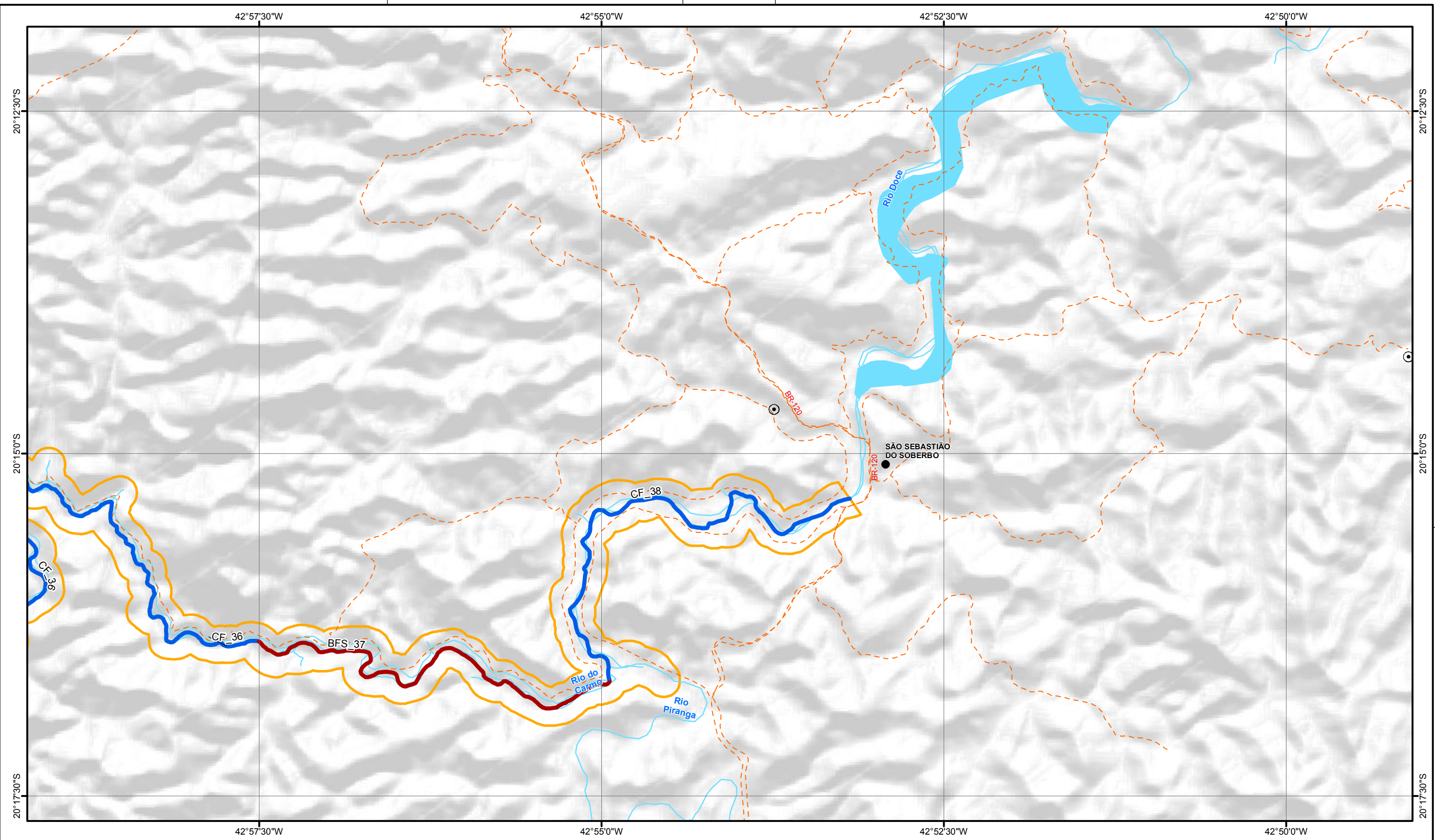
PROJETO: ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA													
TÍTULO: TRECHOS DE RIO NA ÁREA DE ESTUDO													
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>PROJETO:</td> <td>169-515-2282</td> <td>ESCALA:</td> <td>1:50.000</td> </tr> <tr> <td>GIS:</td> <td>NTFE</td> <td>outubro/2016</td> <td></td> </tr> <tr> <td>REV:</td> <td>DC</td> <td>00</td> <td></td> </tr> </table>	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:50.000	GIS:	NTFE	outubro/2016		REV:	DC	00	
PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:50.000										
GIS:	NTFE	outubro/2016											
REV:	DC	00											
Figure 3.4.1 b													



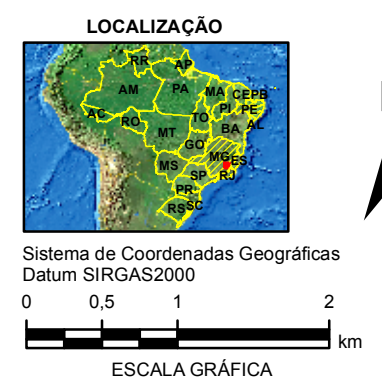
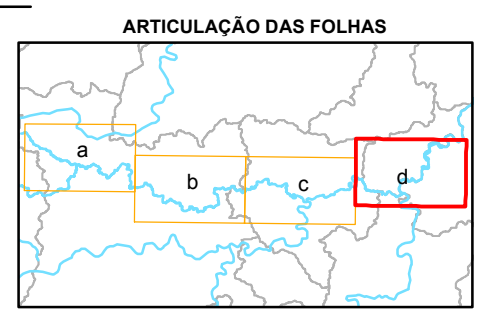
- LEGENDA**
- Estradas de Acesso
 - Trechos de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local




PROJETO:	ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA		
TÍTULO:	TRECHOS DE RIO NA ÁREA DE ESTUDO		
	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA: 1:50.000
	GIS:	NTFE	outubro/2016
	REV:	DC	00
Figure 3.5.1 c			



- LEGENDA**
- Estradas de Acesso
 - Trechos de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local



PROJETO: ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA												
TÍTULO: TRECHOS DE RIO NA ÁREA DE ESTUDO												
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>PROJETO:</td> <td>169-515-2282</td> <td>ESCALA:</td> <td>1:50.000</td> </tr> <tr> <td>GIS:</td> <td>NTFE</td> <td>outubro/2016</td> <td rowspan="2" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Figure 3.4.1 d</td> </tr> <tr> <td>REV:</td> <td>DC</td> <td>00</td> </tr> </table>	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:50.000	GIS:	NTFE	outubro/2016	Figure 3.4.1 d	REV:	DC	00
PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:50.000									
GIS:	NTFE	outubro/2016	Figure 3.4.1 d									
REV:	DC	00										



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tabela 3.5.3: Delimitação Geomorfológica dos Trechos-Tipos de Rio com Base em Dados Pré-rompimento.

Trecho	Rio	Tipo de Trecho	Classificação do trecho antes do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)	Comprimento do Trecho (km)	Declive médio (%)
BFS_01	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, margens aluviais	1,47	0.18
CN_02	Gualaxo do Norte	Não aluvial, cânion	Regime de transporte, A4, segmento único, canal direto, leito rochoso e leito tipo sucessão de cascatas-poços, margens de leito rochoso	0,91	2.20
CF_03	Gualaxo do Norte	Não aluvial, confinado	Regime de transporte, A3, segmento único, canal direto, leito rochoso e leito tipo sucessão de cascatas-poços	3,11	0.48
NR_04	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de deposição, A4, segmento único, canal direto, leito tipo corredeira-poços, margens aluviais	2,23	0.19
CF_05	Gualaxo do Norte	Não-aluvial, Confinado	Regime de transporte, A3, segmento único, canal direto, leito rochoso e leito do tipo sucessão de cascatas-poços	4,88	1.28
NR_06	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens aluviais	4,57	0.13
CF_07	Gualaxo do Norte	Não-aluvial, confinado	Regime de transporte, A4, segmento único,	2,88	0.40



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Trecho	Rio	Tipo de Trecho	Classificação do trecho antes do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)	Comprimento do Trecho (km)	Declive médio (%)
			canal direto, leito do tipo corredeira-poços carvalho, margens aluviais		
BFS_08	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, margens aluviais	4,16	0.46
NR_09	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de deposição, D4, multissegmentos, canal direto, leito tipo corredeira-poços cascalho, margens aluviais	3,04	0.53
BFS_10	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, leito tipo corredeira-poços cascalho, margens aluviais s	5,33	0.23
BFL_11	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação grande	Regime de deposição, G5, segmento único, canal sinuoso, margens aluviais	5,09	0.13
CN_12	Gualaxo do Norte	Não aluvial, cânion	Regime de transporte, A1, segmento único, canal, leito e margens rochosos	0,26	3.90
BFL_13	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação grande	Regime de deposição, G5, segmento único, canal sinuoso, margens aluviais	1,52	0.17
NR_14	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de transporte, A2, segmento único, canal direto, leito rochoso e seixo do tipo sucessão de cascatas-poços, margens aluviais	0,26	1.24
BFL_15	Gualaxo	Aluvial, vale	Regime de	1,62	0.22



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Trecho	Rio	Tipo de Trecho	Classificação do trecho antes do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)	Comprimento do Trecho (km)	Declive médio (%)
	do Norte	largo com planície de inundação grande	deposição, A5, segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens aluviais		
CF_16	Gualaxo do Norte	Não aluvial, confinado	Regime de transporte, A5, segmento único, canal direto	0,30	0.09
BFL_17	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação grande	Regime de deposição, G5, segmento único, canal sinuoso, margens aluviais	2,94	0.14
NR_18	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, margens aluviais	0,21	0.10
BFL_19	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação grande	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços, margens aluviais	1,40	0.18
CN_20	Gualaxo do Norte	Não Aluvial, cânion	Regime de transporte, A1, segmento único, canal direto, leito rochoso e seixo do tipo sucessão de cascatas-poços, margens de leito rochoso	0,53	2.38
CF_21	Gualaxo do Norte	Não aluvial, confinado	Regime de transporte, A3, segmento único, canal direto, leito de seixo de sucessão de cascatas-poços	0,63	0.21
BFS_22	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A4, segmento único, canal direto, leito de corredeira-poços	1,71	1.37



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Trecho	Rio	Tipo de Trecho	Classificação do trecho antes do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)	Comprimento do Trecho (km)	Declive médio (%)
			cascalho, margens aluviais		
NR_23	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de deposição, A3, segmento único, canal direto, leito de sucessão de cascatas-poços cascalho-seixo, margens aluviais	0,37	0.84
CN_24	Gualaxo do Norte	Não Aluvial, cânion	Regime de transporte, A1, segmento único, canal direto, leito rochoso e leito de degrau poço, margens de leito rochoso	0,75	3.61
NR_25	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de transporte, A4, segmento único, canal direto, sucessão de cascatas-poços cascalho, margens aluviais	0,61	0.46
BFS_26	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, leito sucessão de cascatas-poços cascalho, margens aluviais	6,12	0.22
BFL_27	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação grande	Regime de deposição, G5, segmento único, margens aluviais	7,41	0.22
CN_28	Gualaxo do Norte	Não aluvial, cânion	Regime de transporte, A1, segmento único, canal direto, leito rochoso e leito de degrau poço, margens de leito rochoso	0,89	0.79



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Trecho	Rio	Tipo de Trecho	Classificação do trecho antes do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)	Comprimento do Trecho (km)	Declive médio (%)
BFS_29	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, duna ondulação e leito de sucessão de cascatas cascalho, margens de areia-silte	2,52	0.28
CF_30	Gualaxo do Norte	Não aluvial, confinado	Regime de transporte, A2, segmento único, canal direto, seixo degrau-poço e leito rochoso, margens de leito rochoso	0,52	1.04
NR_31	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale estreito e planície de inundação	Regime de deposição, A3, segmento único, canal direto, leito de sucessão de cascatas-poço cascalho-seixo, margens de areia-silte	0,92	0.15
BFS_32	Gualaxo do Norte	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito do tipo sucessão de cascatas-poços, margens de areia-silte	2,54	0.09
BFS_BL_33	Rio do Carmo	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena no Segmento do Rio do Carmo	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte	3,77	0.11
CF_34	Rio do Carmo	Não aluvial, confinado	Regime de transporte, A5, segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso, margens	0,45	0.15



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Trecho	Rio	Tipo de Trecho	Classificação do trecho antes do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)	Comprimento do Trecho (km)	Declive médio (%)
			de areia-silte		
BFS_35	Rio do Carmo	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de deposição, A5, segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens	6,99	0.11
CF_36	Rio do Carmo	Não aluvial, confinado	Regime de transporte, A5, segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso, margens de areia-silte	8,51	0.15
BFS_37	Rio do Carmo	Aluvial, vale largo com planície de inundação pequena	Regime de transporte, A5, segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso, margens de areia-silte	5,97	0.13
CF_38	Rio Doce	Não aluvial, confinado	Regime de deposição, D5, multissegmento, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso, margens de areia-silte	6,98	0.22

Nota: m = metro; km = quilômetro; km² = quilômetros quadrados.

3.5.4 Levantamento de campo

Os dados geomorfológicos de campo coletados para esta avaliação são apresentados no **(Anexo A-1)**.

Parâmetros relevantes para caracterização física do canal do rio foram medidos em 24 pontos dentro da AEL (SG #, **Tabela 3.5.4**) e em 14 pontos dentro da AER (ST #, **Tabela 3.5.4**). Utilizando as informações da análise documental e as medições geomorfológicas de campo, os trechos dentro da AEL delimitados através da análise documental foram validados com base nas condições de campo. Em função do limitado acesso local na porção superior da AEL, os seis primeiros trechos de montante do rio não puderam ser visitados para validação, tendo sido delimitados somente com base em dados documentais, incluindo imagens aéreas e modelo digital de elevação obtido a partir dos dados do LiDAR (**Tabela 3.5.4**). O limite das bacias hidrográficas é apresentado na **Figura 3.5.2**.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tabela 3.5.4: Dados de Campo de Avaliação Geomorfológica (Condições pós-rompimento).

Nome do Ponto de Avaliação de Campo	Rio	Largura (m)		Profundidade (m)		Área de Drenagem m (km ²)
		Leito Menor	Planície de Inundação	Máxima do Leito Menor	Média	
SG01	Gualaxo do Norte	25	90	4,0	3,5	247
SG02	Gualaxo do Norte	30	150	4,5	4,0	254
SG03	Gualaxo do Norte	33	35	5,5	4,0	269
SG04	Gualaxo do Norte	30	110	4,0	3,5	269
SG05	Gualaxo do Norte	25	170	3,0	2,4	285
SG06	Gualaxo do Norte	40	120	5,0	3,5	295
SG07	Gualaxo do Norte	30	180	3,3	2,8	302
SG08	Gualaxo do Norte	25	30	4,0	3,7	308
SG09	Gualaxo do Norte	25	140	3,8	3,0	320
SG10	Gualaxo do Norte	35	38	6,0	6,0	321
SG11	Gualaxo do Norte	25	45	4,5	4,0	406
SG12	Gualaxo do Norte	25	65	3,5	3,0	413
SG13	Gualaxo do Norte	23	30	5,5	4,5	422
SG14	Gualaxo do Norte	30	160	3,0	2,2	523
SG15	Gualaxo do Norte	40	150	3,5	2,0	531
SG16	Gualaxo do Norte	35	270	3,5	2,8	549
SG17	Gualaxo do Norte	35	45	4,0	3,7	556
SG18	Gualaxo do Norte	32	130	3,5	3,0	561
SG19	Rio do Carmo	80	150	4,5	3,0	2062
SG20	Rio do Carmo	45	60	6,0	4,5	2145
SG21	Rio do Carmo	60	170	5,5	4,0	2166
SG22	Rio do Carmo	60	100	6,0	4,5	2245
SG23	Rio do Carmo	60	170	5,5	4,5	2274
SG24	Rio Doce	110	200	5,0	2,5	8899
ST01	Gualaxo do Norte	30	50	2,3	1,8	96,5
ST02	Camargo	3,75	35	0,7	0,5	7,8
ST03	Piracicaba	35	100	4,0	3,0	209
ST04	Águas Claras	5	60	1,3	1,0	72,1
ST05	Água Fria	10	100	2,5	1,8	49,6
ST06	Quebra Canoa	6	80	2,0	1,5	43,8
ST07	Peixe	9	28	2,0	1,3	285
ST08	Rio do Carmo	20	60	1,8	1,5	132
ST09	Rio do Carmo	25	150	2,8	2,1	200
ST10	Rio do Carmo	65	250	5,0	3,5	1385
ST11	Rio do Carmo	52	150	6,0	4,0	1491
ST12	Gualaxo do Sul	33	70	7,0	5,0	502
ST13	Gualaxo do Sul	42	65	4,0	2,7	867
ST14	Cachoeira do Brumado	9	20	1,7	0,9	108
ST15	Piranga	55	150	4,5	2,5	1395



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Nome do Ponto de Avaliação de Campo	Rio	Largura (m)		Profundidade (m)		Área de Drenagem (km ²)
		Leito Menor	Planície de Inundação	Máxima do Leito Menor	Média	
ST16	Pirapetinga	15	80	2,0	1,3	239
ST17	Piranga	65	180	5,0	4,0	4403
ST18	Bacalhau	12	50	2,8	2,0	264

A maioria dos pontos de avaliação visitados em campo dentro da AEL estão localizados no Rio Gualaxo do Norte (pontos numerados de SG01 a SG18) e cobrem uma área de drenagem com aproximadamente 250 km² no ponto mais a montante e 560 km² a jusante da confluência com o Rio do Carmo. Nesta seção do rio, a largura do leito menor do rio varia entre 25 m e 35 m, com uma largura máxima de 40 m, mínima de 23 m e média de 30 m.

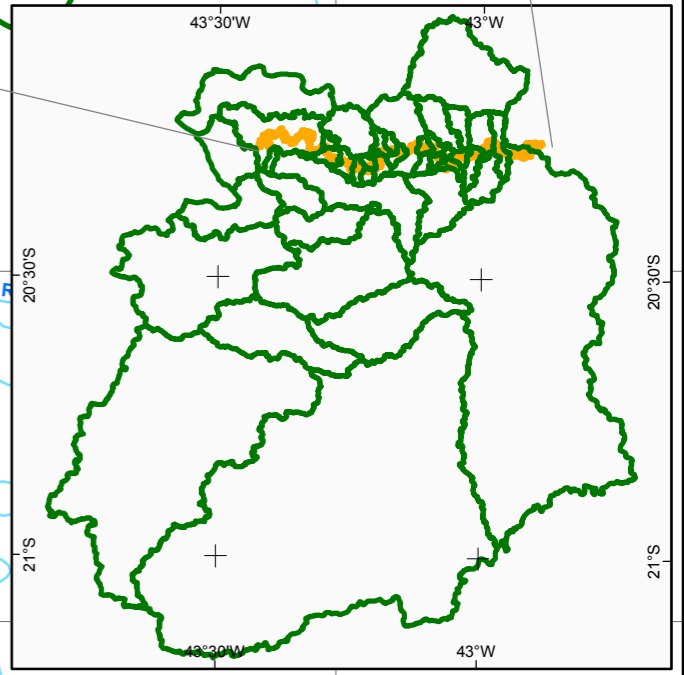
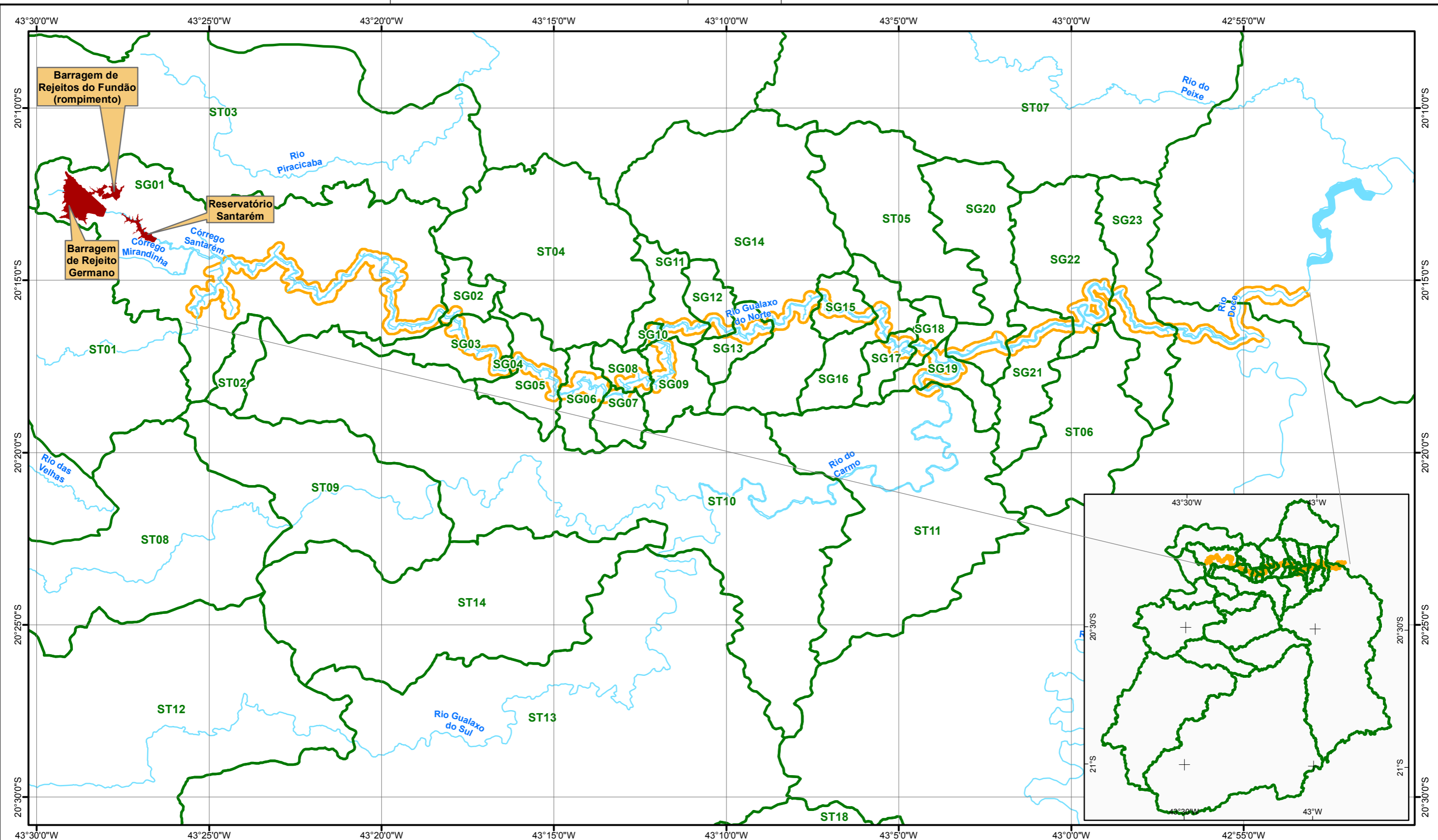
A variação na largura do canal parece ser mais fortemente controlada pela variação no formato do vale circundante e pela extensão pela qual as litologias subjacentes controlam a formação do canal do rio. O sobrevoo de helicóptero, realizada em agosto de 2016, identificou fortes controles geológicos do leito rochoso nos perfis verticais do rio dentro do AEL. Incluindo as áreas de cânion em leito rochoso, afloramentos rochosos orientados perpendiculares ao rio foram observados no Rio Gualaxo do Norte e a montante de Barra Longa no Rio do Carmo. Esses afloramentos rochosos parecem resultar em patamares resistentes a erosão controlando assim a elevação e declive do rio, e provavelmente têm efeito significativo sobre profundidade e largura do canal.

Foram avaliados cinco pontos no rio do Carmo (pontos numerados de SG19 a SG23) que abrangem uma área de drenagem entre aproximadamente 2000 km² no ponto mais a montante e 2275 km² no ponto mais a jusante.

Nesta seção do rio, a largura do leito menor é de aproximadamente 60 m, com um máximo de 80 m e um mínimo de 45 m. No Rio do Carmo, a variação na largura do canal parece ser controlada de maneira similar àquela observada no Rio Gualaxo do Norte. Um ponto foi avaliado no Rio Doce (SG24), a montante da entrada do Reservatório de Candonga. Neste ponto, a largura do rio era de 110 m e a área de drenagem contribuinte para o canal é de aproximadamente 8.900 km².

Largura do canal também é controlada pelo balanço relativo de resistência à erosão das margens e do leito do canal (e.g. Eaton and Giles, 2009). As margens do canal e áreas ribeirinhas parecem ser bem vegetadas segundo imagens de antes do rompimento. Observações e amostragem após o rompimento indicaram que quantidades significantes de matéria rizoide associada com vegetação ribeirinha permaneceram *in situ* ao longo das margens do rio enquanto o leito do canal parece ter sido revolvido e preenchido com uma camada de rejeitos. A correnteza observada e preenchimento do leito do rio associado com a retenção de matéria rizoide ao longo das margens do rio sugere que as margens fossem mais resistentes a erosão do que o leito. Esse regime de geometria do canal indica que mudanças em alterações pós o rompimento na largura de canal são menos prováveis de ter ocorrido do que alterações na profundidade do canal.

Os pontos investigados dentro da AER (pontos ST01 a ST18) abrangeram uma série de áreas de drenagem desde aproximadamente 7 km² até 4.400 km². Dentro desta gama de áreas de drenagem, as larguras do leito menor do rio variaram de 3,75 m a 65 m. Estes pontos fornecem os dados de referência que podem ser usados para avaliar as condições naturais de largura do canal para os trechos de cursos d'água afetados dentro da AEL. A largura de canal tende a aumentar na direção jusante, com um aumento na área de drenagem e um aumento correspondente na descarga.



- LEGENDA**
- Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Limite Bacia Hidrográfica
 - Área de Estudo Local



Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000

ESCALA GRÁFICA



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **LIMITE DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS PARA OS LOCAIS DE PESQUISA**

	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:200.000
	GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.5.2
	REV:	DC	00	



3.5.4.1 Análise regional de larguras e profundidades de canal

Foram desenvolvidas relações para avaliar a variação regional da largura e da profundidade do leito menor do canal fluvial em função da área de drenagem, a partir dos pontos de avaliação geomorfológica de campo dentro da AEL (**Figura 3.5.3**) e da AER (**Figura 3.5.4**). Esses gráficos são baseados na análise das medições da largura e da profundidade do canal em 24 estações dentro do AEL e 18 estações dentro do AER.

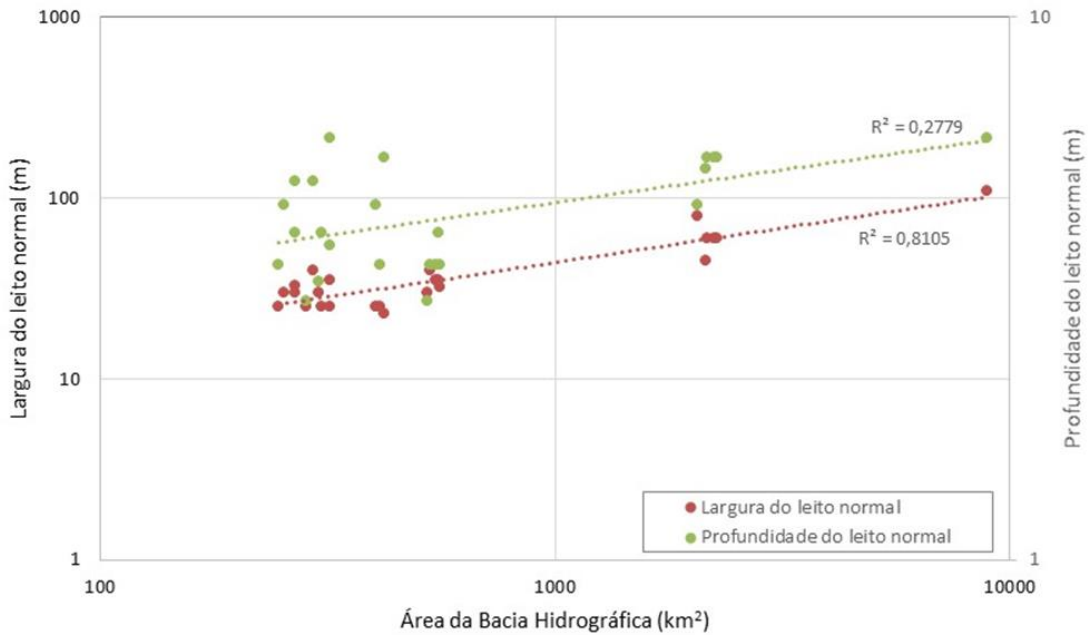


Figura 3.5.3: Variação de largura do leito menor fluvial e profundidade da seção fluvial para pontos dentro da AEL.

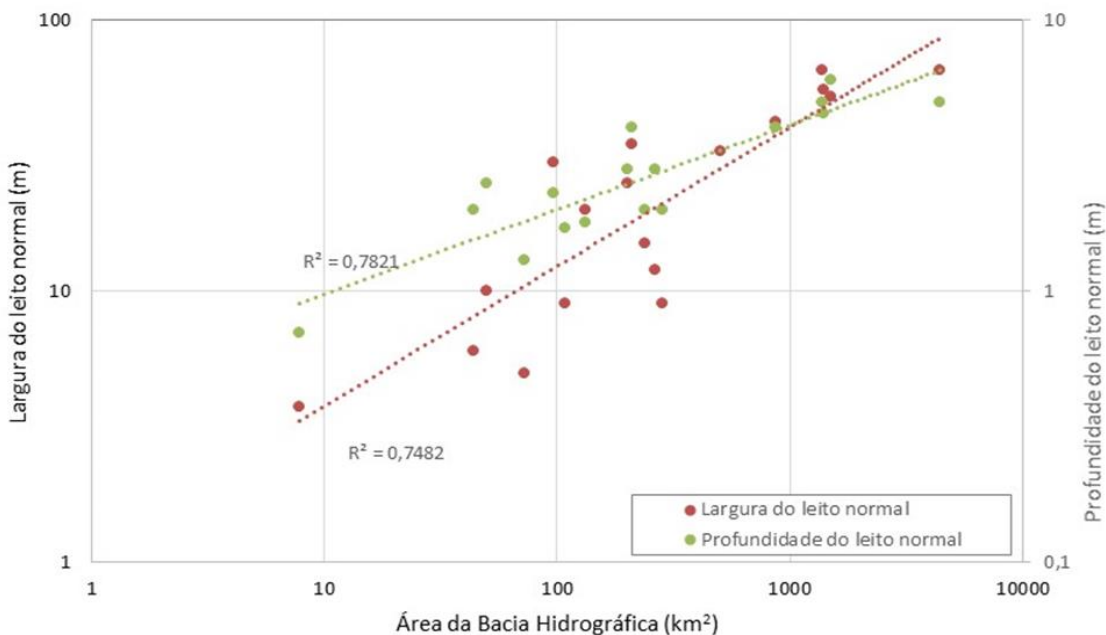


Figura 3.5.4: Variação de largura do leito menor fluvial e profundidade da seção fluvial para pontos dentro da AEL, porém dentro da AER.



A alta variabilidade e a baixa correlação ($R^2 = 0,2779$, **Figura 3.5.3**) entre a profundidade do rio e a área de drenagem para os pontos dentro da AEL foram atribuídas ao fato de que a profundidade nestes pontos não pôde ser medida/estimada com maior precisão porque a água estava muito opaca e o fundo do rio não estava visível. Estes dados de profundidade foram usados com cautela neste relatório.

Para os pontos localizados na AER, existe uma correlação relativamente boa entre a profundidade do leito menor e a área de drenagem ($R^2 = 0,7821$, **Figura 3.5.4**). A variabilidade observada na profundidade do leito menor para áreas de drenagem entre 50 km² e 250 km² é provavelmente atribuível à variação na morfologia dos vales dos rios e à litologia local, uma vez que vales com planícies de inundação maiores e vales estreitos geralmente podem apresentar gradientes de canal distintos.

A relação entre largura do leito menor e área de drenagem tanto para pontos de campo na AEL ($R^2 = 0,8105$, **Figura 3.5.3**) como para pontos de campo na AER ($R^2 = 0,7482$, **Figura 3.5.4**) apresentou uma forte correlação. Estes dados sugerem que a largura e a profundidade do canal variam com a área de drenagem na bacia do Alto Rio Doce e que os parâmetros de canal coletados em cursos d'água vizinhos podem ser usados para fins de comparação com os dados coletados em trechos de rio impactados, visando avaliar mudanças que podem ter ocorrido após o rompimento.

A largura e a profundidade do leito menor do rio para os pontos de avaliação de campo dentro da AEL foram analisadas em relação aos pontos de avaliação de campo dentro da AER (**Figura 3.5.5** e **Figura 3.5.10**). Isto permitiu uma comparação entre dados de canal derivados regionalmente relativos a cursos d'água não afetados e os dados de canal do rio principal afetado.

As larguras do canal fluvial em seu leito menor (**Figura 3.5.5**) medidas nos pontos de avaliação de campo dentro da AEL parecem ser consistentes com as larguras do canal fluvial do rio em seu leito menor medidas em cursos d'água vizinhos não afetados. Isto sugere que a largura de canal foi, em determinados segmentos fluviais, relativamente pouco afetada pelo rompimento da barragem, não tendo sido verificado nenhum estreitamento de canal devido à sedimentação. Nenhum alargamento fluvial foi observado, uma vez que os pontos de avaliação de campo estão geralmente localizados acima da linha de valor regional médio (**Figura 3.5.5**). A faixa de variabilidade de largura do leito menor do rio também se encontra dentro da variabilidade observada nos dados regionais.

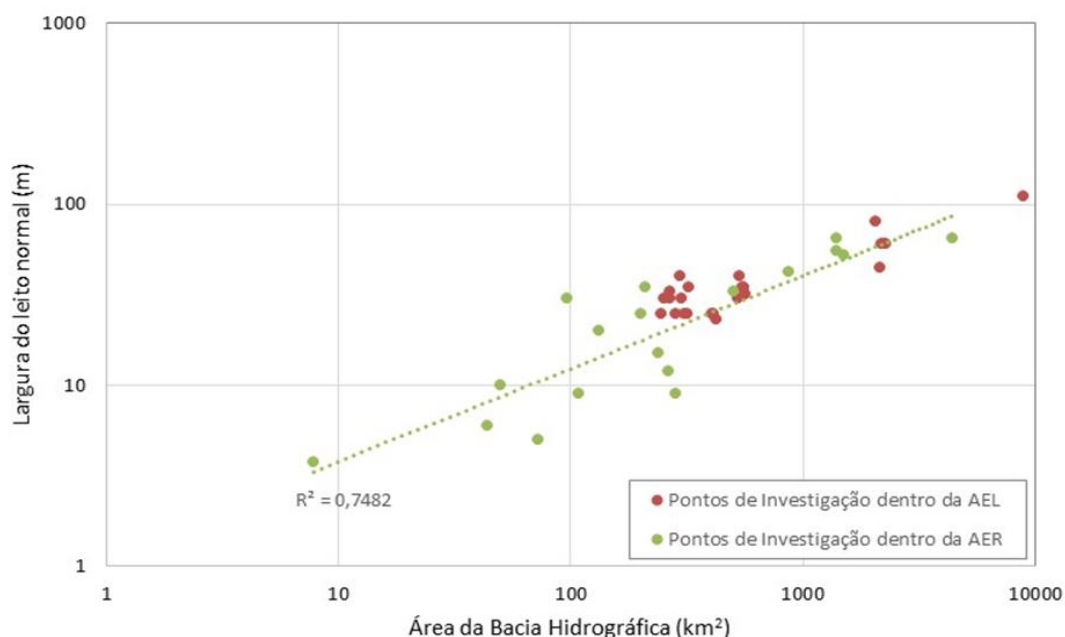


Figura 3.5.5: Análise regional de largura do leito menor rio para todos os pontos investigados (pontos na AEL em vermelho, pontos na AER em verde).



A **Figura 3.5.6** a **Figura 3.5.9** apresentam exemplos de comparações de imagens oblíquas pré e pós-rompimento, obtidas no ponto de campo SG_15. As imagens mostram o canal principal relativamente intacto após o fluxo de rejeitos, e larguras do leito menor do rio muito similares. Pode-se observar alguma erosão na margem esquerda, onde o rio já parece sofrer um processo ativo de erosão das margens. Em condições naturais, havia um pequeno canal lateral (não visível nestas fotos) que transportava parte do fluxo. Após o rompimento, parece que este canal foi coberto pelos rejeitos e agora toda a vazão ocorre dentro do canal principal.

Parece ter ocorrido alguma erosão dentro do talvegue principal; as profundidades efetivas do rio não puderam ser medidas por questões de segurança de acesso ao rio.



Figura 3.5.6: Condições pré-rompimento no ponto SG_15, vista para montante, a partir da margem esquerda.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO



Figura 3.5.7: Condições pós-rompimento no ponto SG_15, vista para montante, a partir da margem esquerda.



Figura 3.5.8: Condições pré-rompimento no ponto SG_15, vista transversal do rio, a partir da margem esquerda.



Figura 3.5.9: Condições pós-rompimento no ponto SG_15, vista transversal do rio, a partir da margem esquerda.

As profundidades do leito menor do rio (**Figura 3.5.10**) medidas nos pontos de avaliação de campo dentro da AEL estão localizadas, em sua maioria, acima da linha de valor médio regional derivada a partir dos dados de campo obtidos nos pontos de avaliação de campo da AER. Isto sugere que o canal sofreu algum aprofundamento. Além disso, a variabilidade ao redor da média parece ser maior do que os dados regionais. Entretanto, como já mencionado, devido a limitações na coleta de dados de profundidade, a variabilidade e o aprofundamento inferido do canal devem ser tratados com alguma cautela.

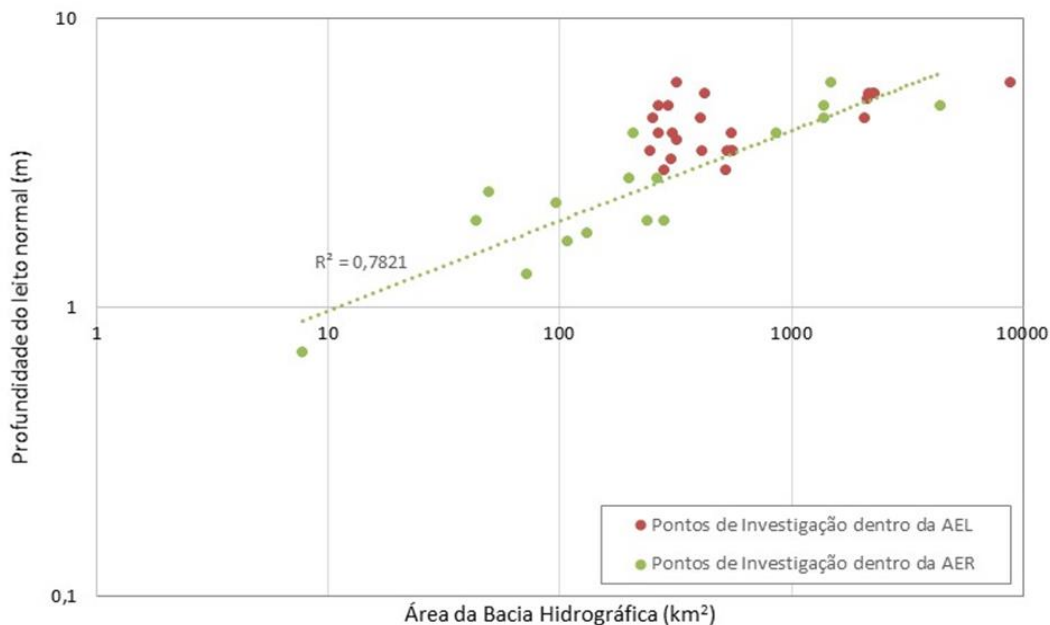


Figura 3.5.10: Análise regional de profundidade do leito menor do rio para todos os pontos pesquisados (pontos na AEL em vermelho, pontos na AER em verde).



3.5.4.2 Comparação da geometria do canal antes e depois do rompimento

Poucos dados da geometria do canal na AEL estavam disponíveis para as condições pré-rompimento. As larguras do canal podem ser observadas nas imagens disponíveis, mas para as profundidades de canal pré-rompimento não haviam dados disponíveis. Usando imagens aéreas georreferenciadas para as condições pré-rompimento, a largura do leito menor do canal pré-rompimento foi medida nos pontos de avaliação de campo estabelecidos na AEL (**Tabela 3.5.5**), de modo a permitir a comparação direta entre as larguras pré-rompimento e pós-rompimento (**Seção 3.5.4, Tabela 3.5.4**). As larguras pré-rompimento foram medidas a partir de imagens disponíveis no período de 2008 a 2015.

As larguras do leito menor após o rompimento medidas no campo em 24 localizações foram comparadas aos valores de largura antes do rompimento (**Figura 3.5.11**) derivados de imagens nas mesmas 24 localizações. Essas localizações são representativas de todos tipos de trecho de canal observados na imagem e no campo. A relação entre os dois conjuntos de valores mostra limitada a nenhuma mudança na largura do leito menor do canal quando os valores são lançados em uma reta.

Tabela 3.5.5: Largura do leito menor pré-rompimento nos pontos de avaliação de campo.

Nome do Ponto	Rio	Largura do Leito menor (m)
SG01	Gualaxo do Norte	23
SG02	Gualaxo do Norte	31
SG03	Gualaxo do Norte	32
SG04	Gualaxo do Norte	30
SG05	Gualaxo do Norte	28
SG06	Gualaxo do Norte	41
SG07	Gualaxo do Norte	30
SG08	Gualaxo do Norte	26
SG09	Gualaxo do Norte	25
SG10	Gualaxo do Norte	32.5
SG11	Gualaxo do Norte	25
SG12	Gualaxo do Norte	26
SG13	Gualaxo do Norte	23
SG14	Gualaxo do Norte	28
SG15	Gualaxo do Norte	37
SG16	Gualaxo do Norte	34
SG17	Gualaxo do Norte	33.5
SG18	Gualaxo do Norte	30
SG19	Rio do Carmo	76
SG20	Rio do Carmo	44
SG21	Rio do Carmo	60
SG22	Rio do Carmo	62
SG23	Rio do Carmo	60
SG24	Rio Doce	107

Uma análise estatística dos dois conjuntos de dados foi feita usando um teste t Student e um nível de significância de $p = 0,005$. A hipótese nula foi que não há nenhuma diferença entre os dois conjuntos de dados. Os dados de largura do canal para o Rio Gualaxo do Norte retornaram uma probabilidade de $p = 0,120$ ($n = 18$), enquanto os dados para o Rio do Carmo resultaram em uma probabilidade de $p = 0,287$ ($n = 5$).



Baseando-se nestas probabilidades os dados de largura do canal foram avaliados como estatisticamente indistinguíveis entre a condição pós-rompimento e pré-rompimento. Esta análise é aplicável ao longo do Rio Gualaxo do Norte desde a confluência com o Córrego Santarém até o Rio Doce. Entretanto, considerando que a resolução das imagens pré-rompimento situa-se geralmente entre 1 m e 3 m e que as larguras típicas de canal nas seções do rio em que se encontram estes pontos de avaliação é de pelo menos 30 m, então é razoável considerar que as larguras pós-rompimento encontram-se em uma faixa de 5% a 10% das larguras pré-rompimento. As linhas de $\pm 10\%$ estão representadas no gráfico trazendo a comparação entre as larguras pré e pós rompimento (**Figura 3.5.11**).

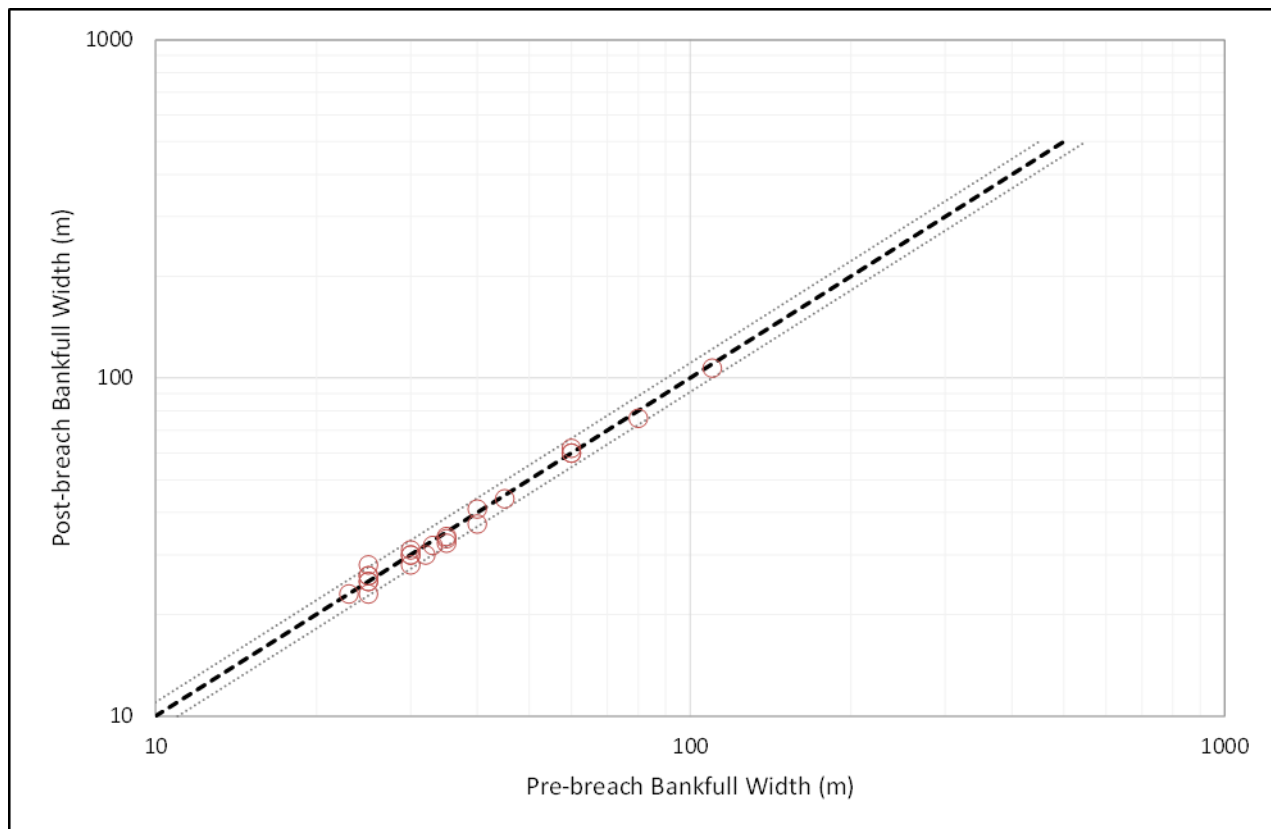


Figura 3.5.11: Comparação de larguras do leito menor pré e pós-rompimento; a linha representa uma comparação 1 a 1, com limites de $\pm 10\%$.

Não foi possível uma comparação das profundidades pré-rompimento e pós-rompimento devido à insuficiência de dados pré-rompimento para os pontos de avaliação de campo e às limitações das medições de profundidades observadas para os dados pós-rompimento. Como mostrado acima na **Figura 3.5.3** e na **Figura 3.5.10**, as profundidades pós-rompimento em cada ponto apresentam uma fraca relação/correlação com a área de drenagem e uma alta variabilidade em torno da média regional.

3.5.5 Trechos fluviais geomorfológicos

Os trechos fluviais geomorfológicos foram identificados e delimitados durante a análise documental e a avaliação de campo. Cada trecho representa um comprimento geral consistente para o qual um conjunto de dados físicos é adequado para descrever o rio. A delimitação do trecho foi adaptada a partir dos sistemas de classificação do rio disponíveis (ver Buffington, 2013) para as especificidades do relevo dentro da área de estudo do Rio Gualaxo do Norte. A delimitação dos trechos de rio foi desenvolvida a partir da fase de análise documental e o levantamento de campo. A delimitação do trecho considerou o seguinte critério: o processo principal observado na imagem, por exemplo, produção de sedimentos, transporte e deposição (Nanson and



Croke 1992), e material de leito e mobilidade observados (Buffington 2001, Church 2002, 2006). Estes trechos foram usados para desenvolver um entendimento da geomorfologia de canal de curso d'água dentro da AEL para as condições pré-rompimento e pós-rompimento e para avaliar os impactos do fluxo de rejeitos.

3.5.5.1 Descrição de trechos fluviais geomorfológicos pré-rompimento

Havia pouca informação disponível sobre a geometria de canais fluviais na AEL para trechos de rio nas condições pré-rompimento. As larguras de canal podem ser observadas nas imagens disponíveis, mas não havia dados sobre as profundidades de canal pré-rompimento. Usando imagens aéreas georreferenciadas para as condições pré-rompimento de trechos fluviais, a largura do leito menor do canal pré-rompimento foi medida em seções transversais representativas (**Figura 3.5.12**) para permitir comparação direta entre as larguras pré-rompimento e pós-rompimento (**Tabela 3.5.6**).

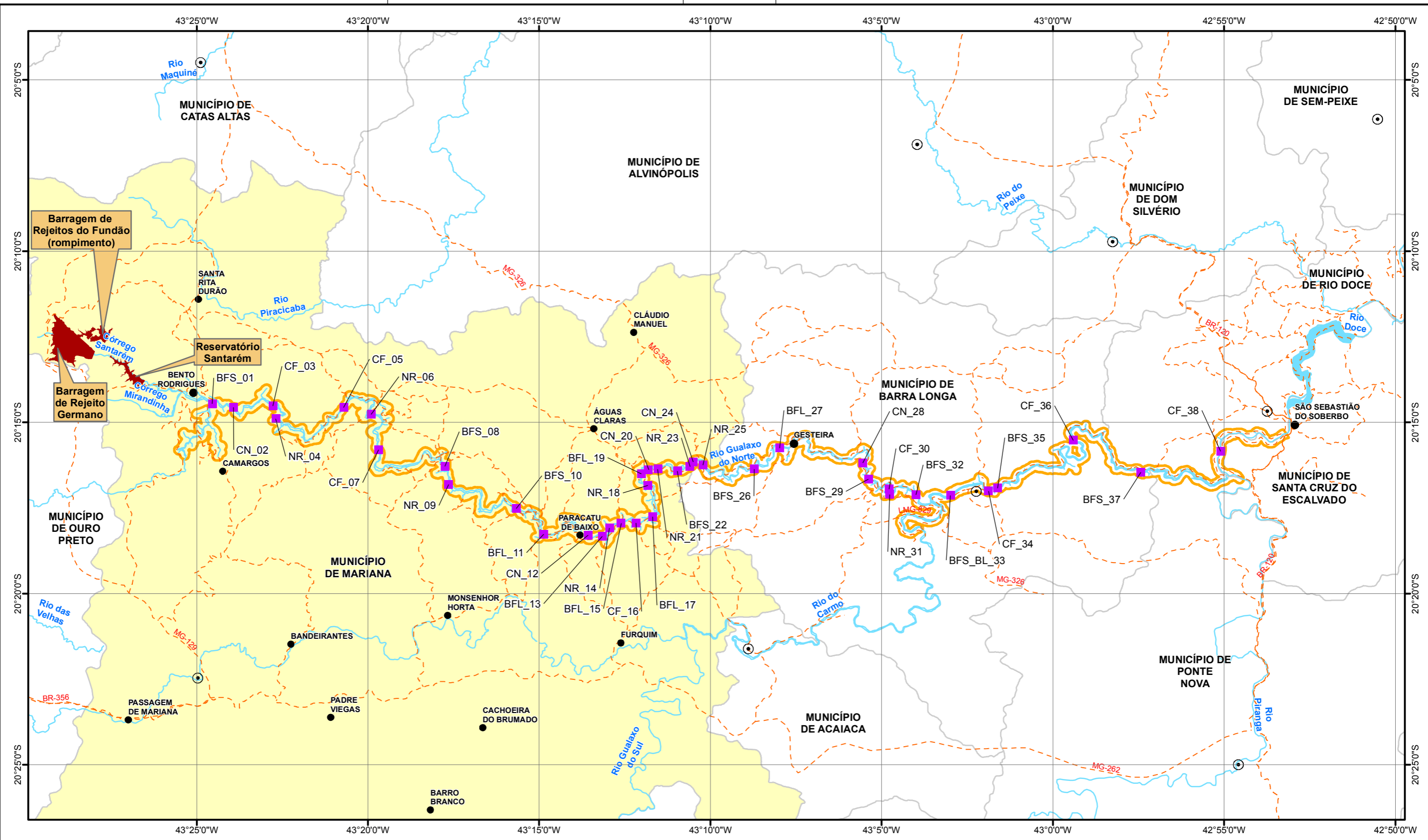
Tabela 3.5.6: Largura do Leito menor Pré-Rompimento de Trechos Fluviais Geomorfológicos.

Nome do Trecho	Rio	Largura do Leito menor (m)
BFS_01	Gualaxo do Norte	26
CN_02	Gualaxo do Norte	11
CF_03	Gualaxo do Norte	17
NR_04	Gualaxo do Norte	21
CF_05	Gualaxo do Norte	16
NR_06	Gualaxo do Norte	27
CF_07	Gualaxo do Norte	19
BFS_08	Gualaxo do Norte	22
NR_09	Gualaxo do Norte	21
BFS_10	Gualaxo do Norte	23
BFL_11	Gualaxo do Norte	22
CN_12	Gualaxo do Norte	13
BFL_13	Gualaxo do Norte	23
NR_14	Gualaxo do Norte	25
BFL_15	Gualaxo do Norte	20
CF_16	Gualaxo do Norte	20
BFL_17	Gualaxo do Norte	25
NR_18	Gualaxo do Norte	20
BFL_19	Gualaxo do Norte	25
CN_20	Gualaxo do Norte	9
CF_21	Gualaxo do Norte	13
BFS_22	Gualaxo do Norte	36
NR_23	Gualaxo do Norte	20
CN_24	Gualaxo do Norte	10
NR_25	Gualaxo do Norte	23
BFS_26	Gualaxo do Norte	30
BFL_27	Gualaxo do Norte	32
CN_28	Gualaxo do Norte	27
BFS_29	Gualaxo do Norte	26
CF_30	Gualaxo do Norte	24

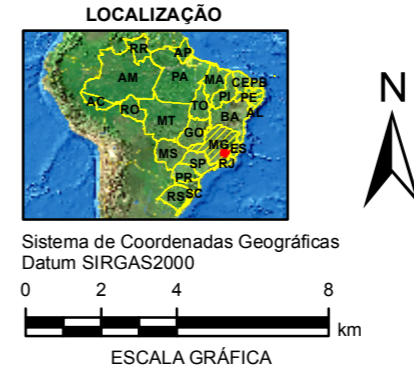


AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Nome do Trecho	Rio	Largura do Leito menor (m)
NR_31	Gualaxo do Norte	27
BFS_32	Gualaxo do Norte	29
BFS_BL_33	Rio do Carmo	65
CF_34	Rio do Carmo	71
BFS_35	Rio do Carmo	64
CF_36	Rio do Carmo	63
BFS_37	Rio do Carmo	68
CF_38	Rio Doce	137



- LEGENDA**
- ⊙ Sede Municipal
 - Distritos
 - Localização das Seções
 - - - Estradas de Acesso
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local
 - Município de Mariana
 - Limite Municipal



PROJETO:	ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA		
TÍTULO:	LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE CANAL NOS TRECHOS DOS RIOS		
PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:200.000
GIS:	NTFE	april/2016	Figura 3.5.12
REV:	DC	00	





3.5.5.2 *Descrição de trechos fluviais geomorfológicos pós-rompimento*

Na AEL, 38 trechos fluviais geomorfológicos foram delineados de acordo com as tipologias descritas na **(Tabela 3.5.7)**. Para cada trecho fluvial, os parâmetros geomorfológicos foram extraídos do modelo digital de elevação LIDAR em seções transversais representativas. Os parâmetros registrados incluem a largura do leito menor, sua profundidade, a largura da planície de inundação e a declividade do canal **(Tabela 3.5.7)**. As áreas das bacias de drenagem foram delineadas para a porção jusante de cada trecho fluvial, enquanto o comprimento do trecho foi medido ao longo da linha de centro do canal **(Figura 3.5.13)**.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tabela 3.5.7: Descrição dos Parâmetros de Trecho Fluvial Geomorfológico.

Nome do Trecho	Rio	Comprimento do Trecho (km)	Área da Bacia de Drenagem (km ²)	Largura do Leito Normal (m)	Profundidade Média do Leito Normal (m)	Largura de Inundação fluxo de detritos (m)	Classificação do trecho depois do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)
BFS_01	Gualaxo do Norte	1,47	170,5	65	0.9	67	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens e leito de areia-silte
CN_02	Gualaxo do Norte	0,91	171,5	14	1.4	14	Regime de transporte, A1, Segmento único, canal direto, leito rochoso e leito de sucessão em cascatas-poços seixo, margens de leito rochoso
CF_03	Gualaxo do Norte	3,11	185,5	27	2.2	31	Regime de transporte, A3, Segmento único, canal direto, leito rochoso e leito do tipo sucessão de cascatas-poços, margens de areia-silte
NR_04	Gualaxo do Norte	2,23	192,5	34	1.0	54	Regime de deposição, A4, Segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços, margens de areia-silte
CF_05	Gualaxo do Norte	4,88	201,2	26	1.7	28	Regime de transporte, A3, Segmento único, canal direto, leito rochoso e leito do tipo sucessão de cascatas-poços, margens de areia-silte
NR_06	Gualaxo do Norte	4,57	234,9	34	1.1	48	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens de areia-silte
CF_07	Gualaxo do Norte	2,88	240,1	29	2.0	33	Regime de transporte, A4, Segmento único, canal direto, gravel leito do tipo corredeira-poços, margens de areia-silte
BFS_08	Gualaxo do Norte	4,16	258,8	53	1.4	77	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
NR_09	Gualaxo do Norte	3,04	266,8	29	0.8	54	Regime de deposição, D4, multissegmentos, canal direto, leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens de areia-silte
BFS_10	Gualaxo do Norte	5,33	280,3	45	1.4	64	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito do tipo corredeira-poços, margens de areia-silte
BFL_11	Gualaxo do Norte	5,09	294,8	95	1.1	102	Regime de deposição, G5, Segmento único, meandering channel, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
CN_12	Gualaxo do Norte	0,26	294,9	16	1.7	19	Regime de transporte, A1, Segmento único, canal direto, margens e leito rochosos
BFL_13	Gualaxo do Norte	1,52	302,0	79	1.2	90	Regime de deposição, G5, Segmento único, canal sinuoso, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
NR_14	Gualaxo do Norte	0,26	302,1	39	1.5	47	Regime de transporte, A2, Segmento único, canal direto, leito rochoso e leito de sucessão em cascatas-poços seixo, margens de areia-silte
BFL_15	Gualaxo do Norte	1,62	307,6	68	1.6	94	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens de areia-silte



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Nome do Trecho	Rio	Comprimento do Trecho (km)	Área da Bacia de Drenagem (km ²)	Largura do Leito Normal (m)	Profundidade Média do Leito Normal (m)	Largura de Inundação fluxo de detritos (m)	Classificação do trecho depois do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)
CF_16	Gualaxo do Norte	0,30	307,7	28	2.5	34	Regime de transporte, A5, Segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
BFL_17	Gualaxo do Norte	2,94	319,5	106	1.2	116	Regime de deposição, G5, Segmento único, canal sinuoso, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
NR_18	Gualaxo do Norte	0,21	319,5	25	2.6	34	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
BFL_19	Gualaxo do Norte	1,40	320,8	130	1.0	155	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito do tipo corredeira-poços, margens de areia-silte
CN_20	Gualaxo do Norte	0,53	321,1	15	2.1	19	Regime de transporte, A1, Segmento único, canal direto, leito rochoso e leito de sucessão em cascatas-poços seixo, margens de leito rochoso
CF_21	Gualaxo do Norte	0,63	321,6	16	2.2	18	Regime de transporte, A3, Segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços seixo, margens de areia-silte
BFS_22	Gualaxo do Norte	1,71	405,4	39	2.1	55	Regime de deposição, A4, Segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens de areia-silte
NR_23	Gualaxo do Norte	0,37	405,7	28	2.3	42	Regime de deposição, A3, Segmento único, canal direto, leito do tipo cascata-poços cascalho-seixo, margens de areia-silte
CN_24	Gualaxo do Norte	0,75	411,9	14	1.9	20	Regime de transporte, A1, Segmento único, canal direto, leito rochoso e leito de sucessão em cascatas-poços seixo, margens de leito rochoso
NR_25	Gualaxo do Norte	0,61	412,4	48	1.7	62	Regime de transporte, A4, Segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poço cascalho e leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
BFS_26	Gualaxo do Norte	6,12	423,5	35	2.0	57	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens de areia-silte
BFL_27	Gualaxo do Norte	7,41	536,2	120	1.1	159	Regime de deposição, G5, Segmento único, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
CN_28	Gualaxo do Norte	0,89	536,7	34	2.3	39	Regime de transporte, A1, Segmento único, canal direto, leito rochoso e leito de sucessão em cascatas-poços seixo, margens de leito rochoso
BFS_29	Gualaxo do Norte	2,52	552,1	73	1.5	102	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens de areia-silte
CF_30	Gualaxo do Norte	0,52	552,2	26	2.7	32	Regime de transporte, A2, Segmento único, canal direto, leito do tipo sucessão de cascatas-poços seixo e leito rochoso, margens de leito rochoso



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Nome do Trecho	Rio	Comprimento do Trecho (km)	Área da Bacia de Drenagem (km ²)	Largura do Leito Normal (m)	Profundidade Média do Leito Normal (m)	Largura de Inundação fluxo de detritos (m)	Classificação do trecho depois do rompimento (Rosgen, 1996, Montgomery and Buffington 1997, Church 2006)
NR_31	Gualaxo do Norte	0,92	555,8	42	1.9	50	Regime de deposição, A3, Segmento único, canal direto, leito do tipo corredeira-poços cascalho-seixo, margens de areia-silte
BFS_32	Gualaxo do Norte	2,54	561,7	92	1.4	104	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito do tipo corredeira-poços cascalho, margens de areia-silte
BFS_BL_33	Rio do Carmo	3,77	2145,2	97	2.8	169	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
CF_34	Rio do Carmo	0,45	2145,5	103	2.7	109	Regime de transporte, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso margens de areia-silte
BFS_35	Rio do Carmo	6,99	2225,3	113	1.6	141	Regime de deposição, A5, Segmento único, canal direto, leito de duna-ondulação, margens de areia-silte
CF_36	Rio do Carmo	8,51	2264,7	92	2.7	96	Regime de transporte, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso, margens de areia-silte
BFS_37	Rio do Carmo	5,97	2282,6	133	2.4	139	Regime de transporte, A5, Segmento único, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso, margens de areia-silte
CF_38	Rio Doce	6,98	8917,0	177	2.7	190	Regime de deposição, D5, multissegmentos, canal direto, duna-ondulação e leito rochoso, margens de areia-silte

Nota: m = metro; km = quilômetro; km² = quilômetros quadrados.

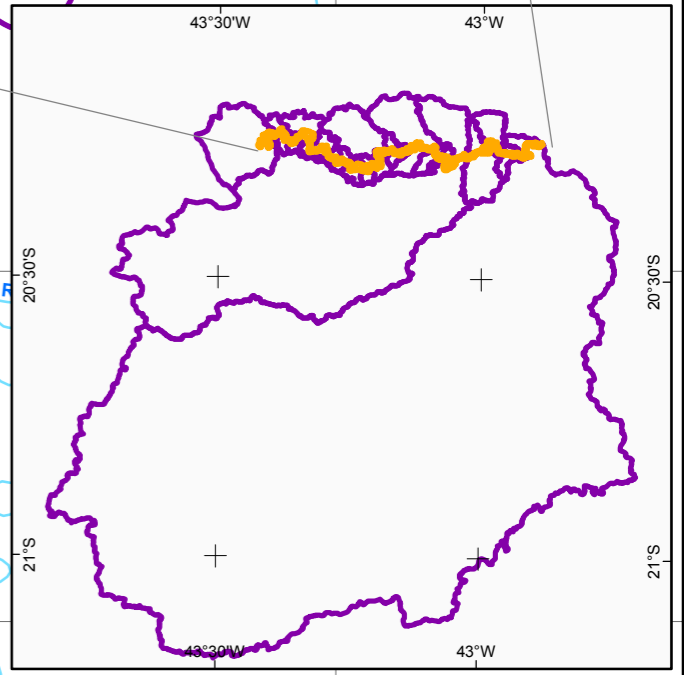
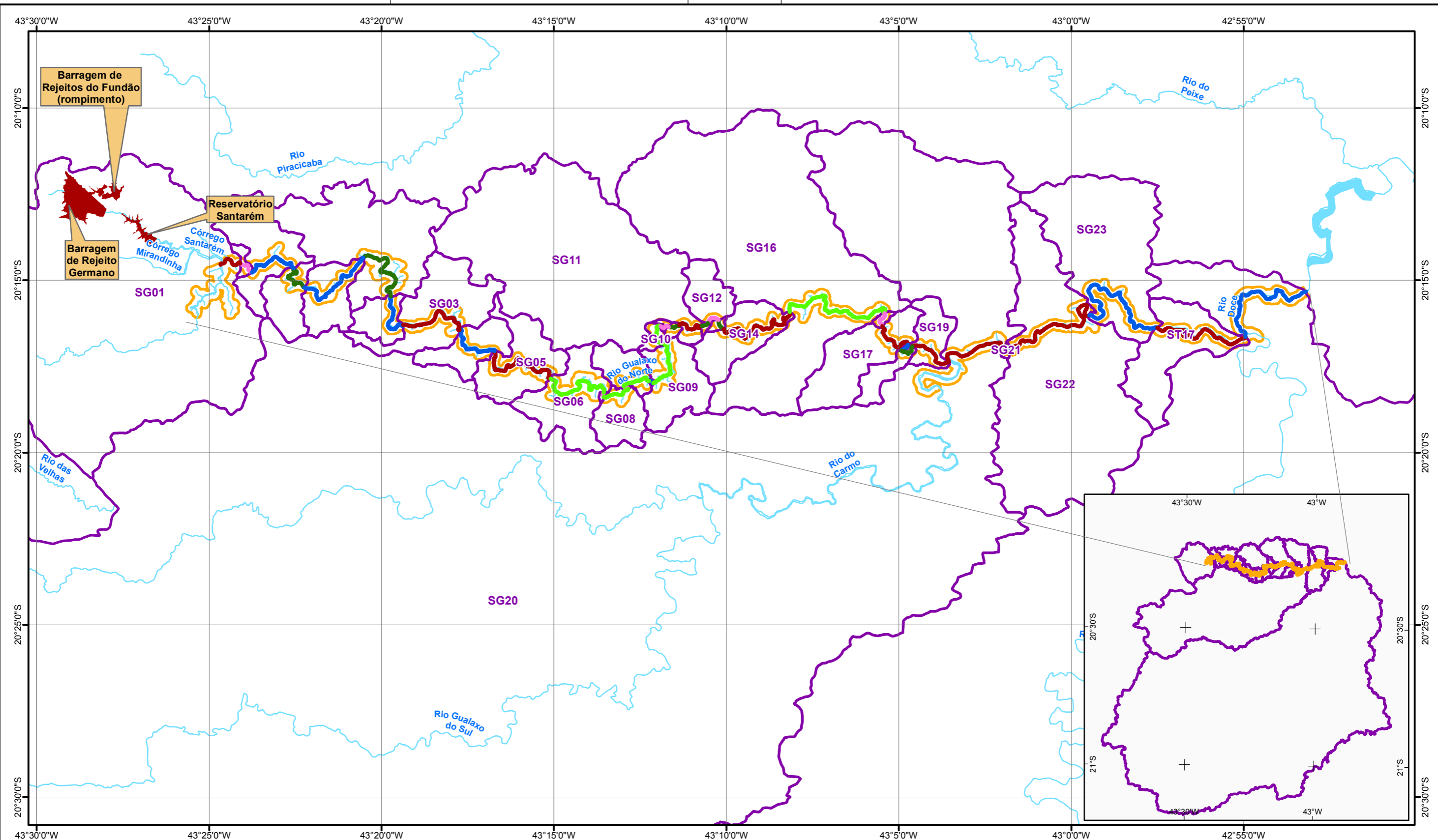


AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

A área da bacia de drenagem na porção montante da AEL no Rio Gualaxo do Norte é de aproximadamente 115 km², aumentando para aproximadamente 560 km² na confluência com Rio do Carmo, próximo a Barra Longa. A largura do leito fluvial normal do Rio Gualaxo do Norte é de 20-25 m na porção montante, aumentando para aproximadamente 30-35 m na confluência com o Rio do Carmo. A largura da planície de inundação é altamente variável, estando diretamente relacionada com o tipo de trecho observado nas imagens. Trechos estrangulados possuem planícies de inundação pequenas ou nenhuma planície de inundação (p.ex., os trechos tipo cânion e confinado), enquanto trechos menos estrangulados possuem planícies de inundação com largura de até 150 m (p.ex., os trechos largos com planícies de inundação bem desenvolvidas). A elevação estimada da área de inundação (isto é, planície fluvial) associada com o evento de rompimento foi estimado com base em uma interpretação visual no campo. Essa área de inundação do evento de rompimento excedeu a planície fluvial do rio natural. A elevação da inundação foi inferida com base no julgamento profissional dos dados de perfil de corte transversal disponíveis derivados dos dados LIDAR e das observações de campo da linha de lama nas árvores, construções e vertentes, assim como a linha de corte de vegetação (a zona limpa de vegetação acima do solo durante o fluxo de detritos). Na ausência de pesquisas de canal acurado das condições de antes do rompimento, comparações confiáveis de elevações da área de inundação não foram possíveis.

As medições de largura de leito menor, profundidade de leito menor, e largura da planície de inundação para todos os tipos de trecho de rio tendem para não estar estreitamente correlacionados. *Outliers* nesses conjuntos de dados indicaram que dados adicionais beneficiariam a análise e fortaleceriam os resultados e o entendimento final da morfologia do rio. Os efeitos desses *outliers* deveriam ser observados quando os resultados são interpretados.

Há uma tendência geral de aumento da largura do leito fluvial, da profundidade e da largura da planície de inundação em função da área da bacia de drenagem e da distância a jusante entre trechos para os tipos de segmentos comuns. Alterações visíveis nestes parâmetros de canal foram observadas nas principais confluências onde os parâmetros a jusante são significativamente maiores do que os valores a montante. Esta graduação nos parâmetros de canal é inferida para corresponder aos grandes aumentos na área da bacia de drenagem que ocorrem quando o rio principal da AEL entra em uma bacia de drenagem maior. Esta é uma tendência natural esperada em uma bacia de drenagem.



- LEGENDA**
- Trecho de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Limite Bacia Hidrográfica
 - Área de Estudo Local



Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000

ESCALA GRÁFICA



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **TRECHO BACIAS HIDROGRÁFICAS**



PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:200.000
GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.5.13
REV:	DC	00	



3.5.5.2.1 Trechos do tipo Cânion (CN)

Os trechos do tipo cânion (CN) são geralmente encontrados na parte montante da AEL, sendo seus comprimentos relativamente pequenos, usualmente inferiores a 1 km. Eles geralmente ligam um trecho de rio que possui uma larga planície de inundação a montante com um trecho de rio que geralmente não possui nenhuma ou uma pequena planície de inundação a jusante, revelando o controle estrutural que caracteriza esta porção da bacia. A largura do leito menor (**Figura 3.5.14**) geralmente varia entre 10 m e 15 m, aumentando ligeiramente com a distância a jusante. As margens do canal não são contínuas e, às vezes, consistem de segmentos verticais da vertente. As profundidades do leito menor são relativamente grandes e a largura do canal para transportar a vazão se estende inteiramente entre os flancos verticais do leito. Estes trechos apresentam o maior gradiente observado na AEL, geralmente acima de 2,5%, sendo que o leito fluvial consiste de rochas e grandes matacões.

A passagem do fluxo de detritos e rejeitos através destes trechos fluviais resultou em poucas alterações físicas no canal, a não ser a remoção da vegetação ciliar ao longo das margens do canal. A profundidade e a largura do leito fluvial normal nestes trechos aumentam com a distância a jusante (**Figura 3.5.15**) e com a área da bacia de drenagem (**Figura 3.5.16**). A resistência à erosão do leito do canal e da margem resulta da presença de matacões e do aspecto rochoso do fundo fluvial, oferecendo resistência e confinando o escoamento do fluxo de detritos, minimizando ou evitando-se a erosão de margens terrosas adjacentes.

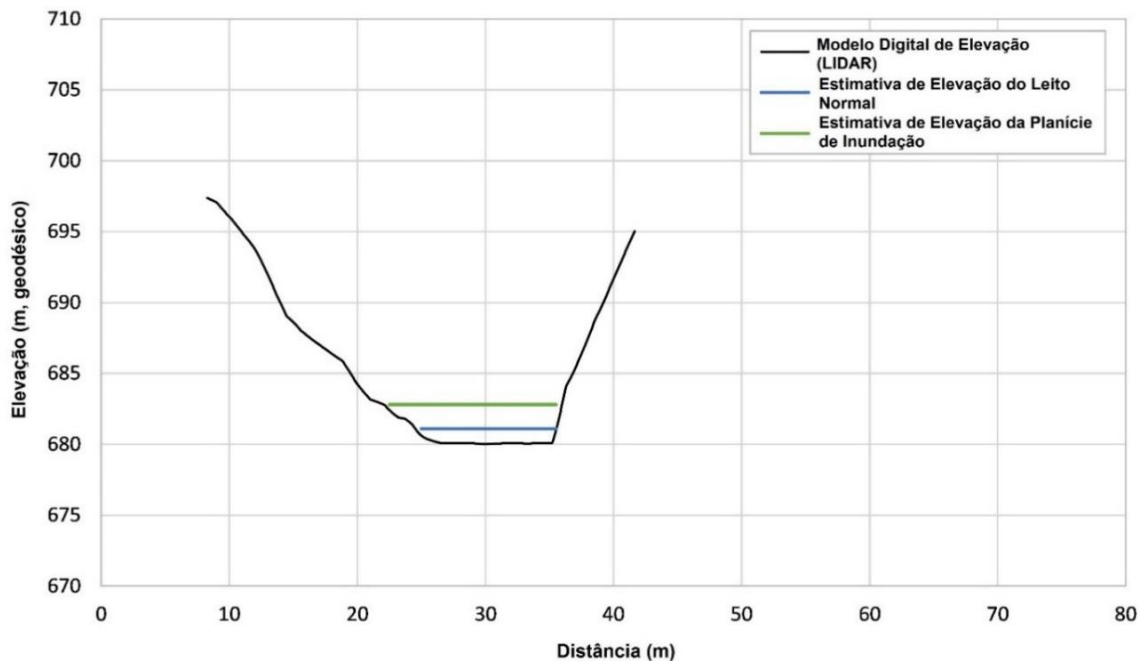


Figura 3.5.14: Trecho Fluvial do Tipo Cânion – Seção Transversal de Canal Típica (Típica seção transversal do canal na estação de rio 1,72km).



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

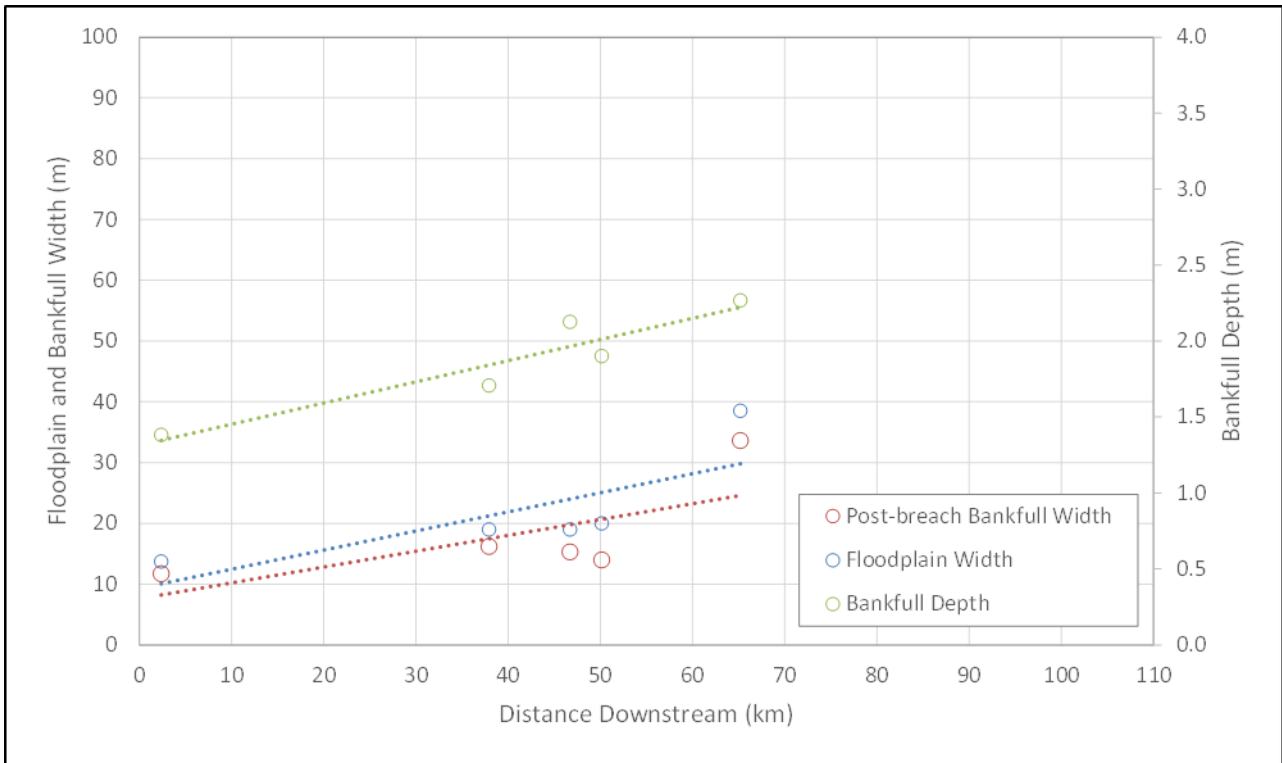


Figura 3.5.15: Trecho Fluvial do Tipo Cânion – Variação da geometria do canal em função da distância a jusante.

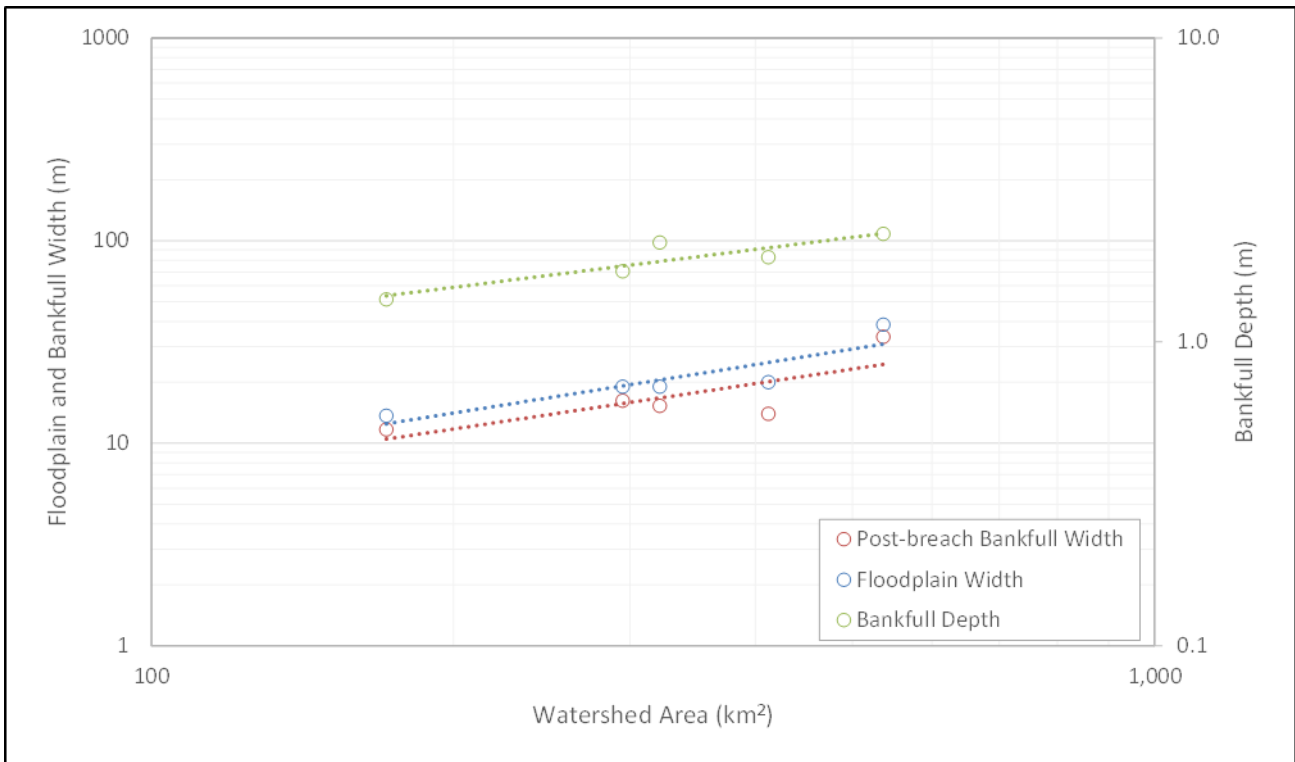


Figura 3.5.16: Trecho Fluvial do Tipo Cânion – Variação da geometria do canal em função da área da bacia de drenagem.



3.5.5.2.2 Trechos do tipo Confinado (CF)

Trechos do tipo confinado (CF) são encontrados em toda a AEL, sendo distribuídos de forma relativamente uniforme de montante a jusante. Eles apresentam características similares aos trechos do tipo cânion, exceto em relação as margens que geralmente não são tão íngremes quanto as do tipo cânion. Difere também por ter em suas margens presença de vegetação. A largura do leito menor (**Figura 3.5.17**) geralmente varia de 10 m a 25 m a montante da confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo, e de 50 m a 60 m a jusante desta. As margens do canal não são contínuas e, às vezes, consistem de paredes de vale. Estes tipos de trecho fluvial possuem uma grande declividade quando comparados com outros trechos na AEL, geralmente entre 0,5% e 1,5%, sendo o leito constituído principalmente de grandes matacões. Existem seções de leito rochoso, que parecem controlar a declividade do rio.

A passagem do fluxo de detritos e rejeitos através destes trechos fluviais resultou em poucas alterações físicas no canal, a não ser a remoção da vegetação ciliar ao longo das margens do canal. A profundidade e a largura do canal geralmente aumentam a jusante (**Figura 3.5.18**) e com a ampliação da área da bacia de drenagem (**Figura 3.5.19**). A resistência à erosão do leito do canal e da margem, resultante da presença de matacões e do leito rochoso, evitou que o canal fosse significativamente afetado pelo fluxo de rejeitos.

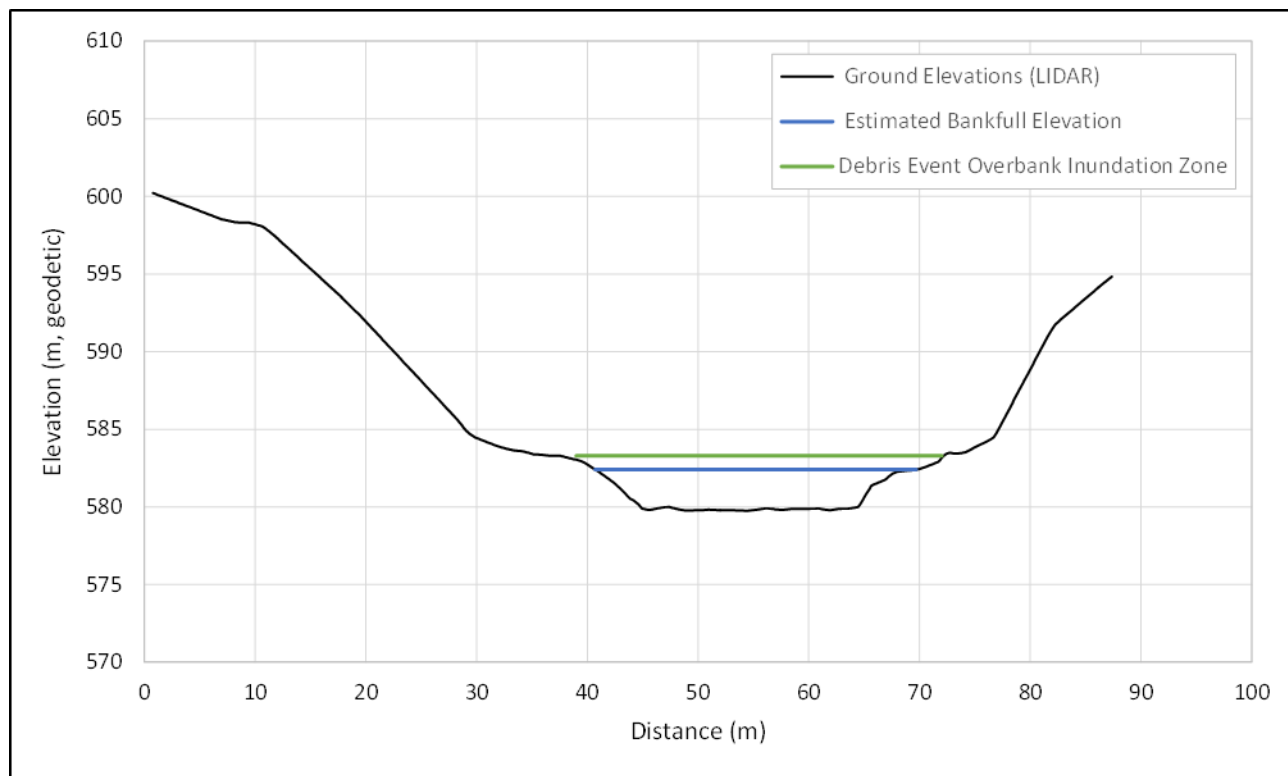


Figura 3.5.17: Trecho de Rio Confinado – Seção transversal de canal típica (Típica seção transversal do canal na estação de rio 11,8 km).



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

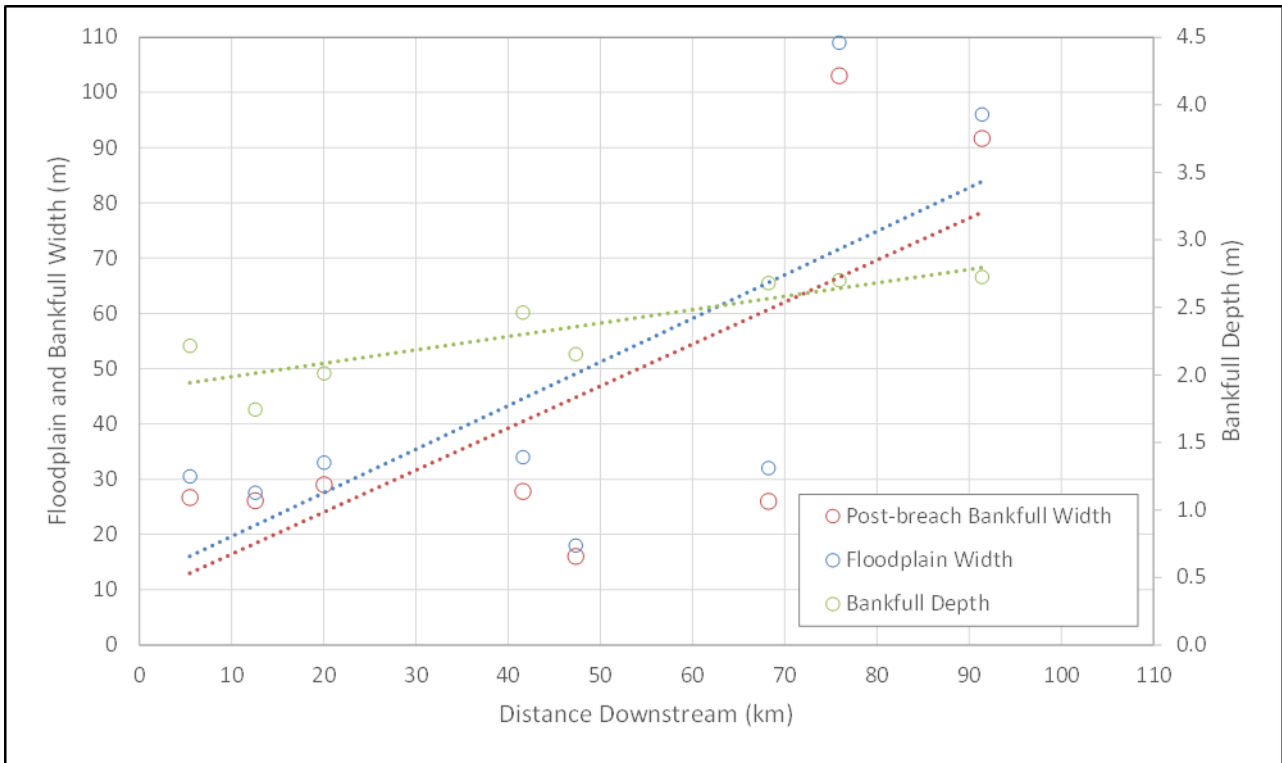


Figura 3.5.18: Trecho de Rio Confinado – Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

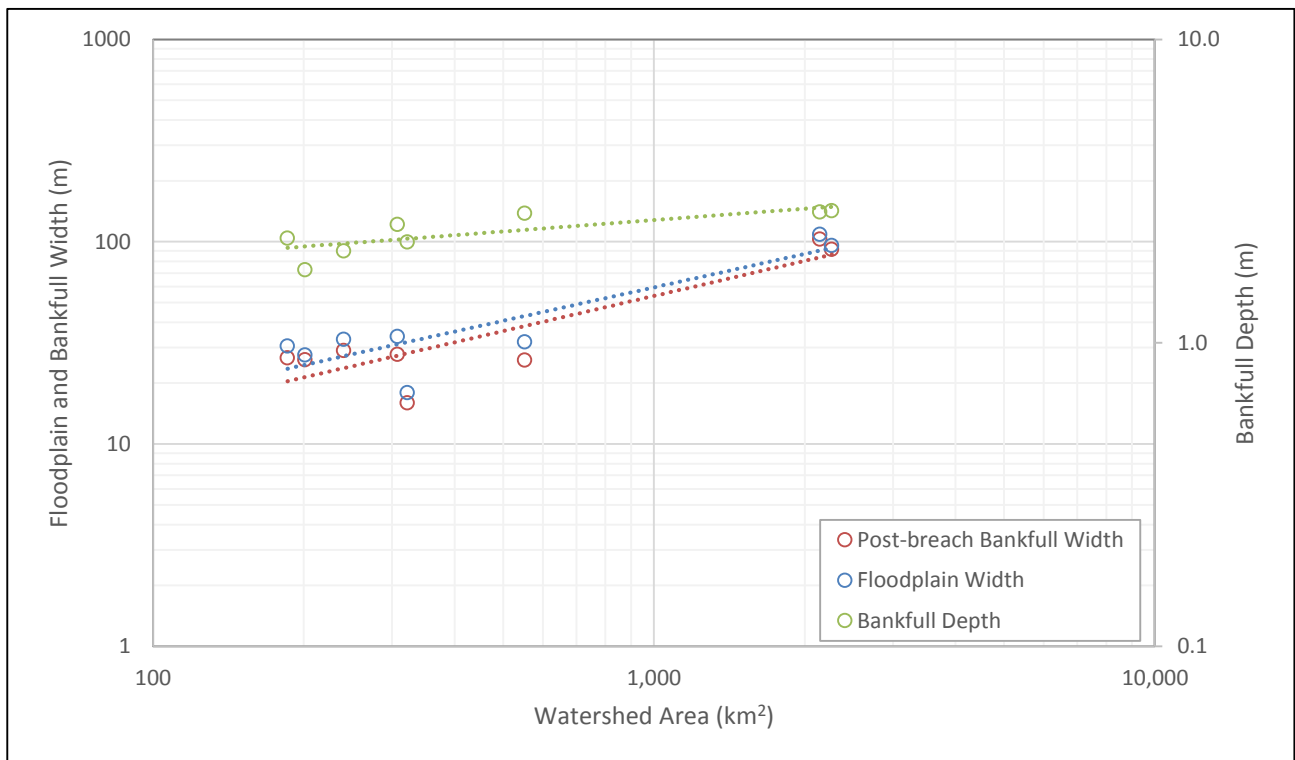


Figura 3.5.19: Trecho de Rio Confinado – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



3.5.5.2.3 Trechos do tipo Estreito (NR)

Trechos do tipo estreito (NR) são encontrados em toda a AEL e geralmente conectam trechos do tipo cânion e confinado a trechos com planícies de inundação maiores. Eles representam uma tipologia de segmento fluvial de transição entre trechos de rio do tipo cânion e confinado e os trechos largos com planícies de inundação plenamente desenvolvidas.

A largura do leito menor nestes trechos geralmente varia entre 30 m e 40 m (**Figura 3.5.20**), aumentando ligeiramente a jusante (**Figura 3.5.21**) e com a ampliação da área de drenagem (**Figura 3.5.22**). O rio, neste segmento, flui através de um corredor estreito, geralmente com pequenas porções descontínuas de planície de inundação. Os gradientes do rio variam de 0,3% a 0,5%, sendo o leito fluvial constituído principalmente de cascalho e pedregulhos. A morfologia do canal é corredeira-poço, com cascalho e pequenos pedregulhos nas seções de corredeira. As seções de leito rochoso não são típicas para este tipo de trecho, mas pode-se encontrar pequenas saliências no canal principal, o que pode favorecer a formação de ilhas no meio do canal a montante e a jusante de tais saliências.

A passagem do fluxo de detritos e rejeitos através destes trechos fluviais resultou em poucas alterações físicas no canal, a não ser a remoção da vegetação ciliar ao longo das margens. A geometria do canal dos trechos estreitos parece ter sido minimamente afetada pelo fluxo de rejeitos, e houve limitada área de planície fluvial para deposição de rejeito.

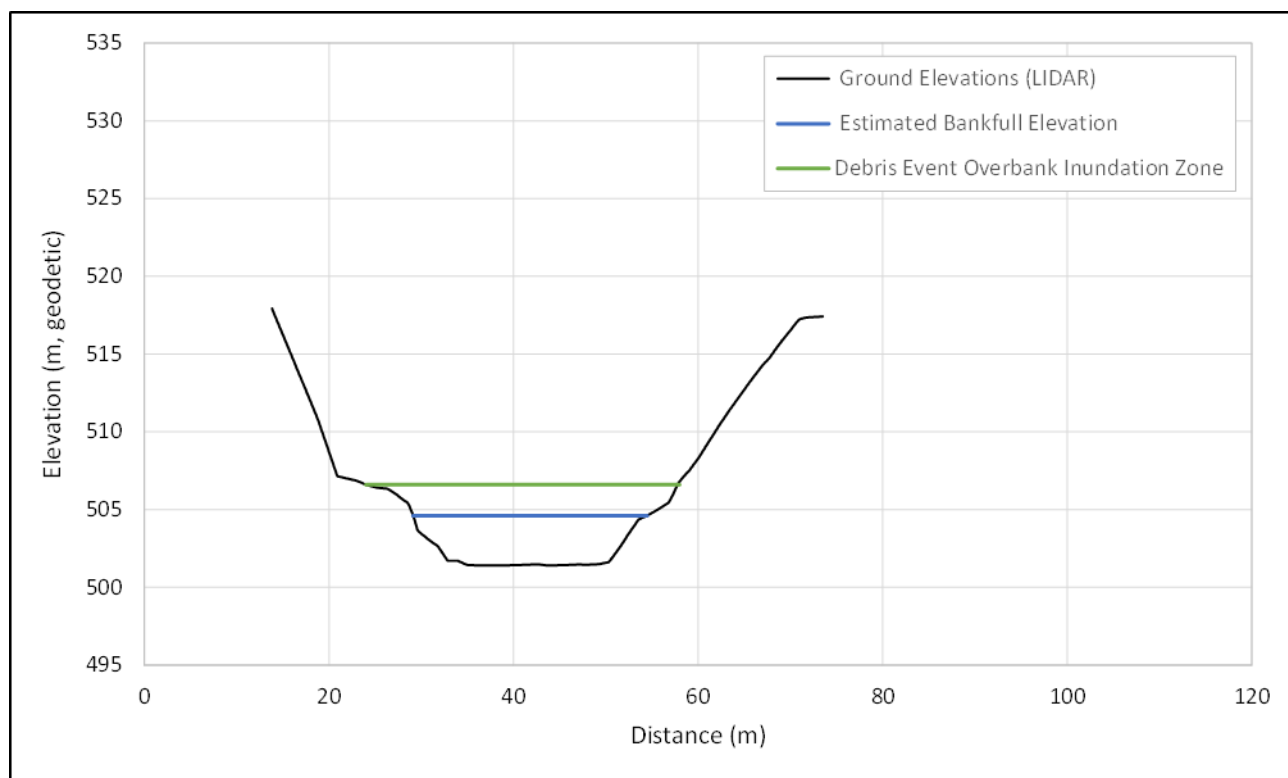


Figura 3.5.20: Trecho de rio estreito – Seção transversal de canal típica (Típica seção transversal do canal na estação de rio 44,41km).



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

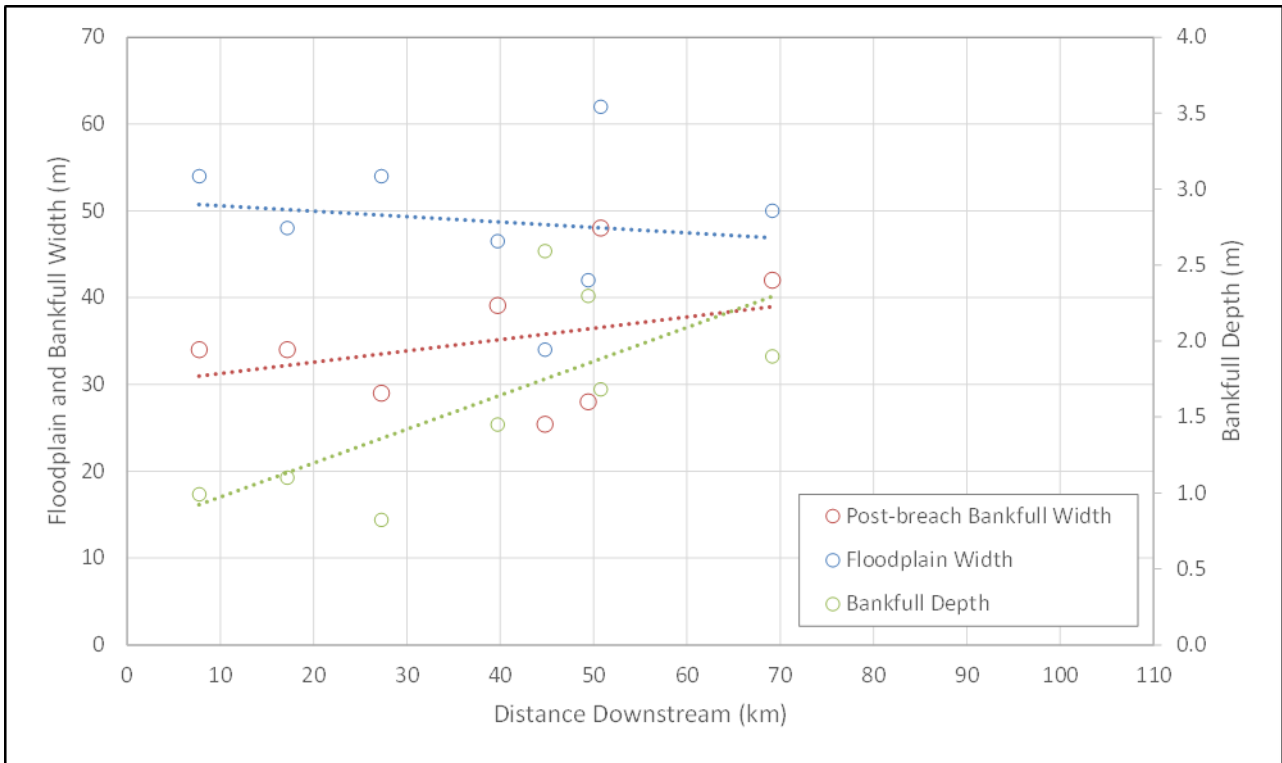


Figura 3.5.21: Trecho de Rio Estreito - Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

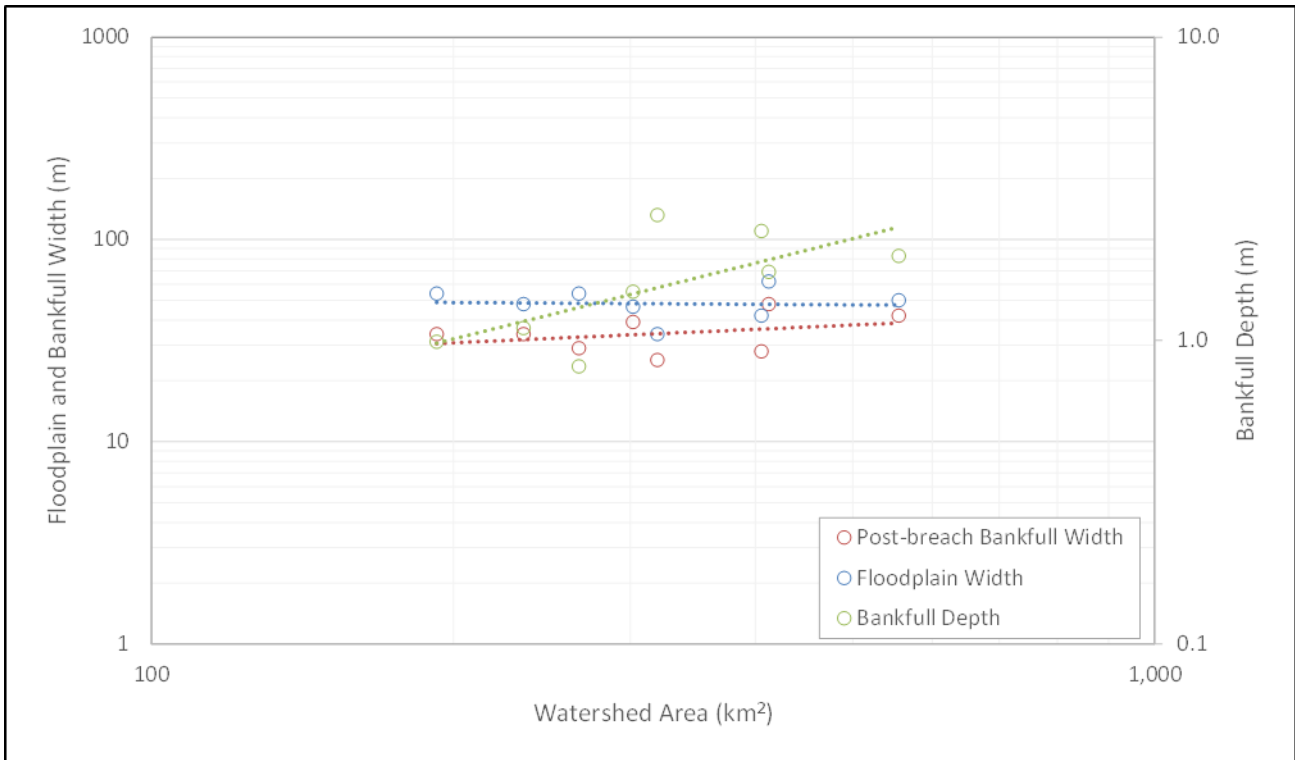


Figura 3.5.22: Trecho de rio estreito – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



3.5.5.2.4 Trechos do tipo Largo com Pequena Planície de Inundação (BFS)

Os trechos do tipo largo com pequena planície de inundação (BFS) estão geralmente localizados a jusante de trechos de rio confinados ou estreitos. A largura do leito fluvial normal geralmente varia entre 20 m e 40 m a montante da confluência do Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo (**Figura 3.5.23**), e entre 80 m e 150 m mais a jusante. Os gradientes do rio são geralmente inferiores a 0,3%, sendo o leito constituído principalmente de cascalho e areia. A morfologia do canal é corredeira-poço, com cascalho e pequenos pedregulhos nas seções de corredeira.

As margens de rio geralmente consistem de sedimentos aluviais finos, tais como silte e areias finas. A vegetação ciliar que existia antes do rompimento ao longo das margens do canal foi removida pelo fluxo de rejeitos, mas, de um modo geral, o sistema de raízes permaneceu no lugar. Foram observados tocos residuais de árvores intactos e *in situ* ao longo das margens o que sustenta a interpretação de aumentos limitados na largura de canal como resultado da descarga de rejeitos. Áreas de erosão localizada foram observadas na porção externa de meandros, principalmente em pontos onde se inferiu, com base nas imagens pré-rompimento, que já havia erosão ativa.

Os trechos BFS possuem planícies de inundação bem desenvolvidas, que se estendem por até 4 vezes a largura do leito menor e já existiam antes do rompimento. A largura da planície de inundação nestes trechos aumenta com a distância a jusante (**Figura 3.5.24**) e com a área da bacia de drenagem (**Figura 3.5.25**) de 80 m para aproximadamente 150 m.

A passagem do fluxo de detritos e rejeitos através destes trechos fluviais resultou em algumas alterações físicas no canal, principalmente a remoção da vegetação ciliar ao longo das margens e erosão de pontos de erosão pré-existent. A geometria do canal dos trechos BFS parece ter sido minimamente afetada pelo fluxo de rejeitos, mas os rejeitos se depositaram na planície de inundação disponível.

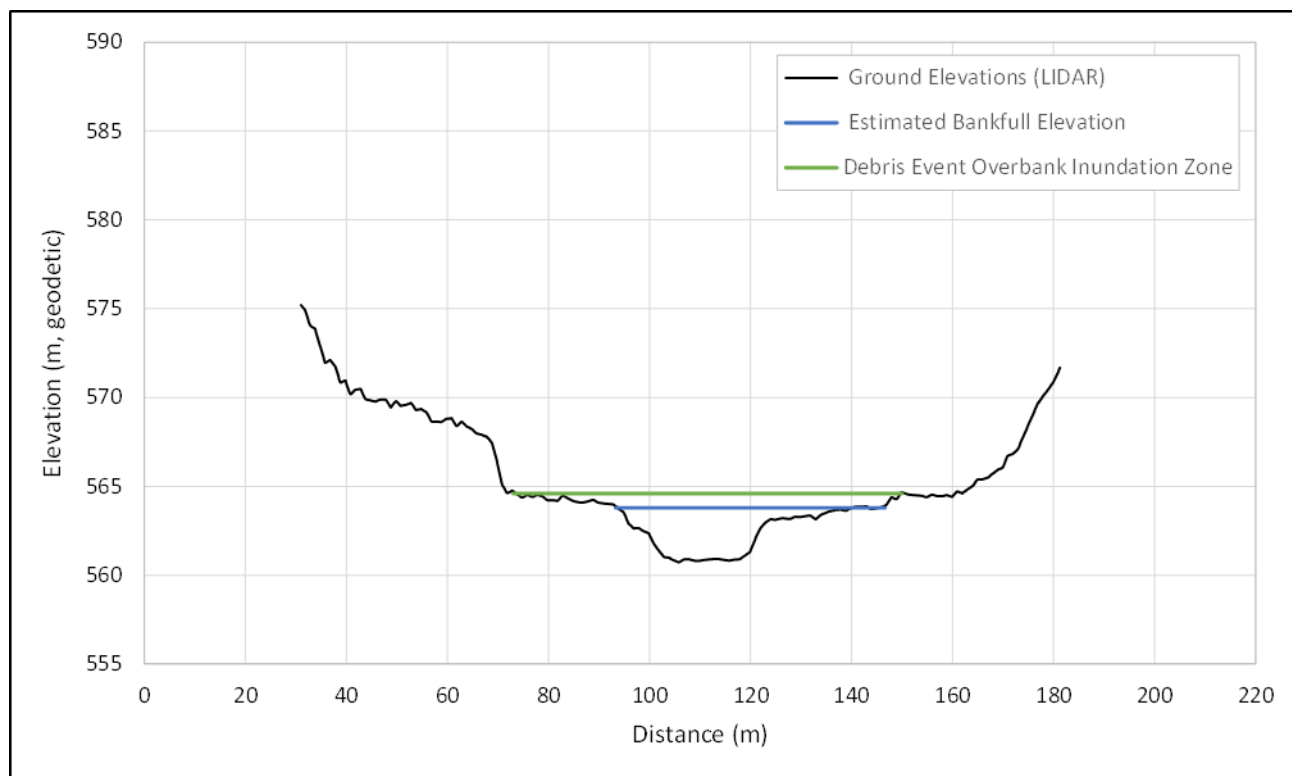


Figura 3.5.23: Trecho de Rio Largo com planície de inundação pequena – Seção transversal de canal típica na estação de rio 23,63 km.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

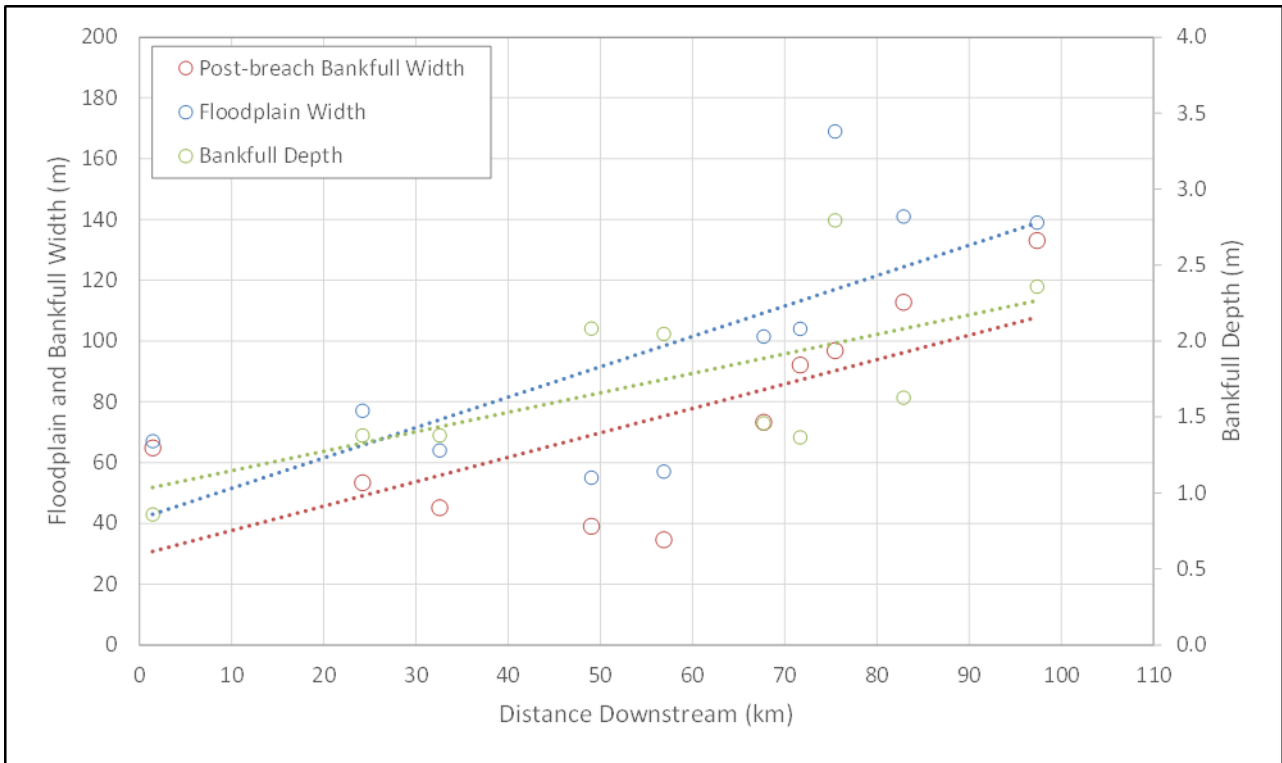


Figura 3.5.24: Trecho de Rio Largo com planície de inundação pequena – Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

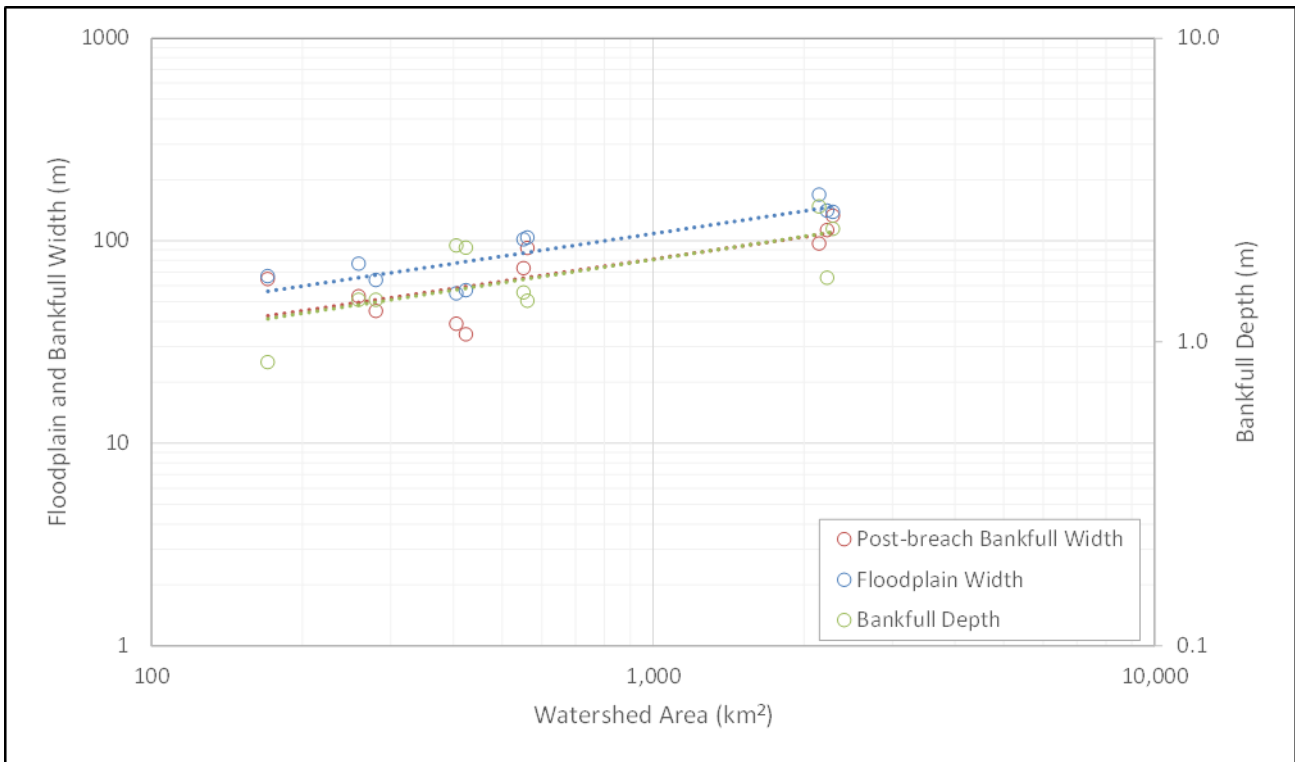


Figura 3.5.25: Trecho de Rio Largo com planície de inundação pequena – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



3.5.5.2.5 Trechos do tipo Largo com Planície de Inundação Grande (BFL)

Os trechos do tipo largo com planície de inundação grande (BFL) possuem as planícies de inundação mais desenvolvidas e estão geralmente localizados imediatamente a montante de trechos de rio do tipo confinado ou cânion. A largura do leito menor geralmente varia entre 20 m e 40 m (**Figura 3.5.26**). A distribuição destes trechos na AEL é limitada àqueles trechos localizados a montante da confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo. Os gradientes do rio são geralmente inferiores a 0,2%, sendo o leito constituído principalmente de cascalho e areia. A morfologia do canal é corredeira-poço, com cascalho e pequenos pedregulhos nas seções de corredeira.

As margens de rio geralmente consistem de sedimentos aluviais finos, tais como silte e areias finas. A vegetação ciliar que existia antes do rompimento ao longo das margens do canal foi removida pelo fluxo de rejeitos, mas, de um modo geral, o sistema de raízes permaneceu no lugar. Foram observados tocos residuais de árvores intactos e *in situ* ao longo das margens, o que sustenta a interpretação de aumentos limitados na largura de canal como resultado da descarga de rejeitos, a exemplo dos segmentos BFS. Áreas de erosão localizada foram observadas na porção externa de meandros, principalmente em pontos onde se inferiu, com base nas imagens pré-rompimento, que já havia erosão ativa.

Os trechos BFL possuem planícies de inundação bem desenvolvidas, que se estendem por até mais de 4 vezes a largura do leito menor. A largura da planície de inundação nestes trechos aumenta com a distância a jusante (**Figura 3.5.27**) e com a área da bacia de drenagem (**Figura 3.5.28**) de 100 m para aproximadamente 160 m.

A passagem do fluxo de detritos e rejeitos através destes trechos fluviais resultou em algumas alterações físicas no canal, principalmente a remoção da vegetação ciliar ao longo das margens do canal e erosão de pontos de erosão pré-existent. A geometria do canal dos trechos BFS parece ter sido minimamente afetada pelo fluxo de rejeitos, mas os rejeitos se depositaram na planície de inundação disponível.

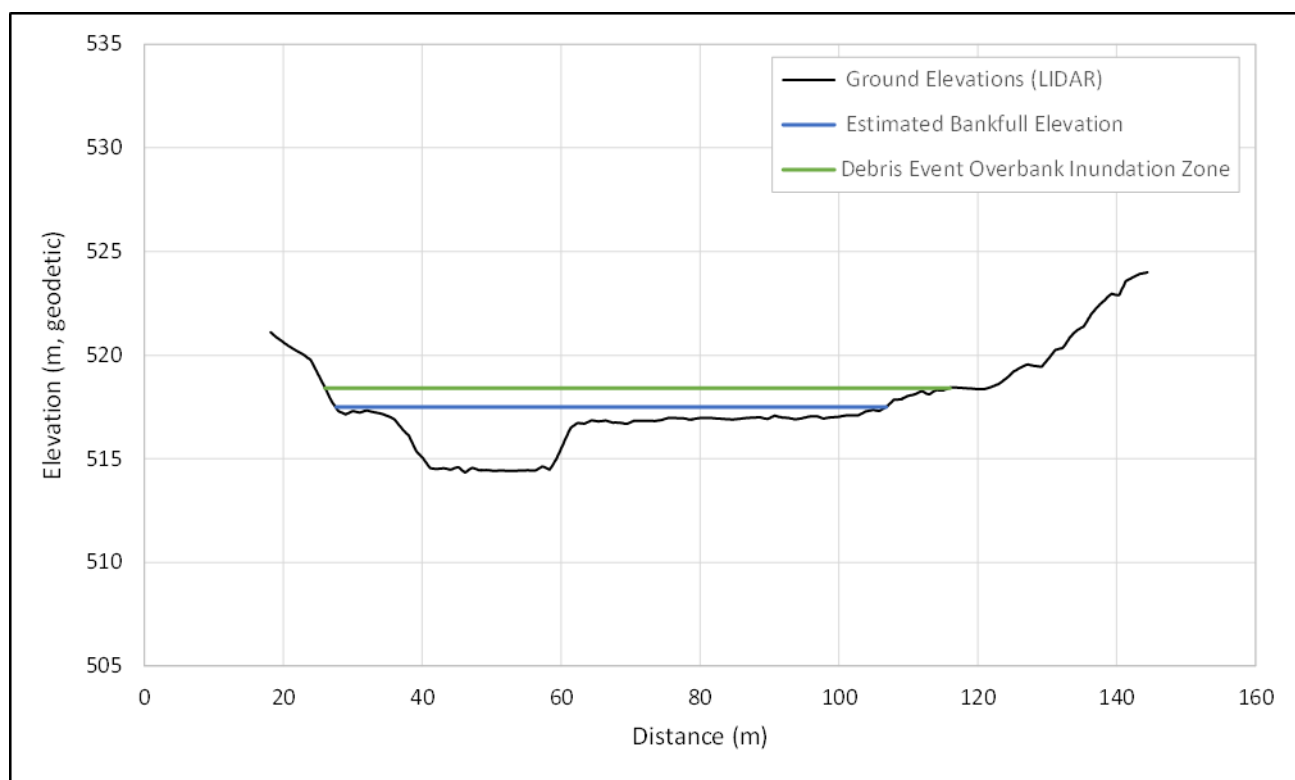


Figura 3.5.26: Trecho de Rio Largo com planície de inundação grande – Seção transversal de canal típica na seção de rio 38,41 km.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

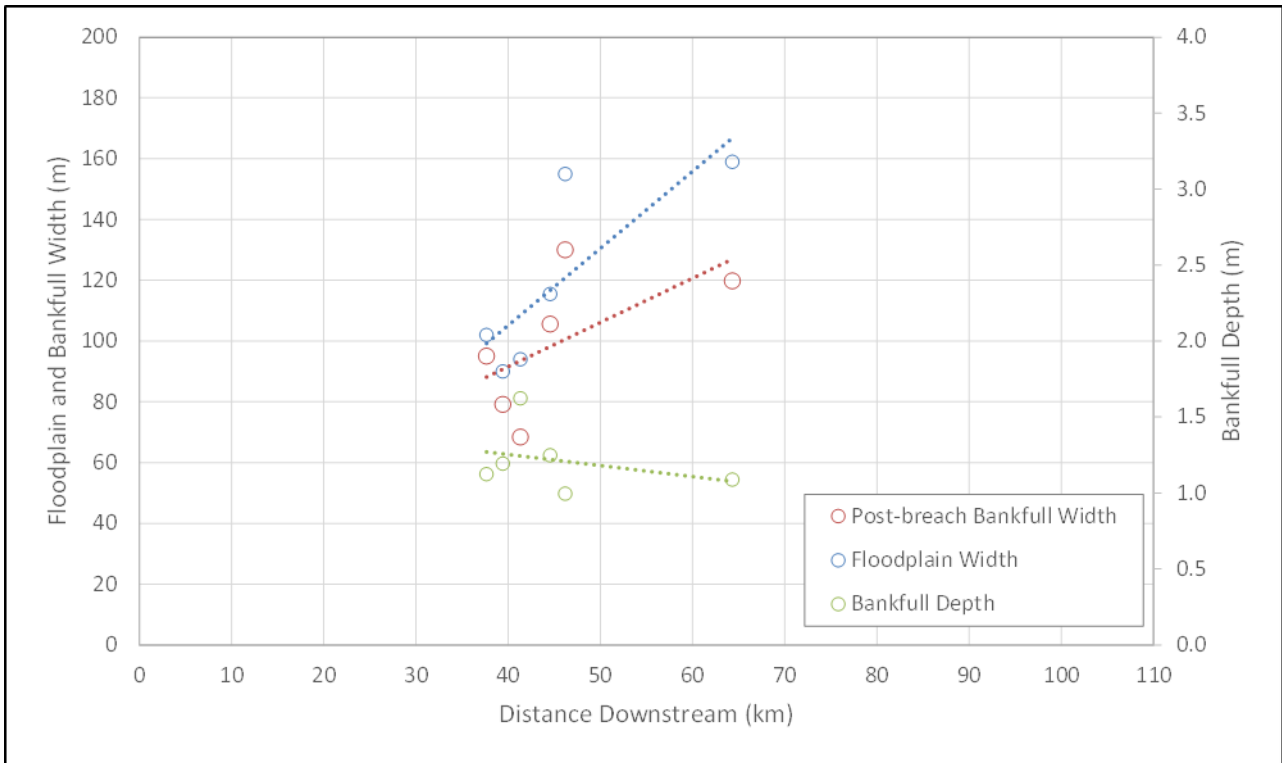


Figura 3.5.27: Trecho de Rio Largo com planície de inundação grande – Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

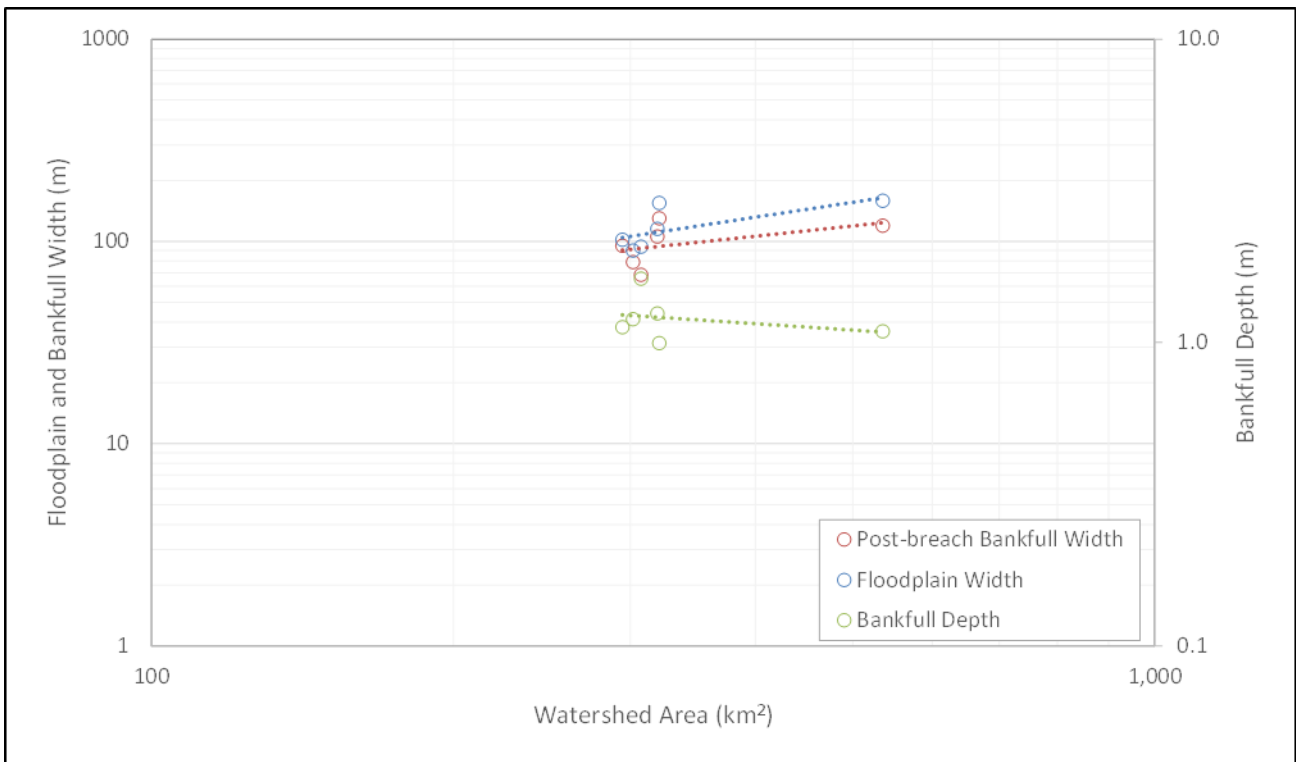


Figura 3.5.28: Trecho de Rio Largo com planície de inundação grande – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



3.5.5.3 Comparação geomórfica da configuração em planta pré-rompimento e pós-rompimento

Foi feita uma avaliação dos dados dos trechos pré-rompimento e pós-rompimento para determinar alterações observáveis na configuração em planta do rio. As condições naturais do rio e de seu vale, com o padrão alternado de trechos confinados ou de cânions separando trechos de planícies de inundação mais largas e mais integralmente desenvolvidas, parecem ter afetado a forma como o fluxo de detritos e rejeitos transitou pela AEL e como o fluxo de detritos afetou o canal e o vale durante e após o evento.

Esperavam-se alterações na configuração em planta do canal após o fluxo de detritos e rejeitos, uma vez que o canal do rio havia sido submetido a um grande evento de fluxo. A largura, profundidade e configuração em planta do canal podem ser significativamente alteradas como resultado de um grande evento de fluxo. Medições de campo da geometria do canal e a análise de imagens pré-rompimento e pós-rompimento indicam que a extensão dos ajustes da configuração em planta do canal foi pequena. As maiores alterações aparentes ocorreram principalmente em trechos de rio com planícies de inundação largas (p.ex., BFL), onde os rejeitos puderam se depositar em uma ampla área. Os trechos de rio com uma planície de inundação pequena ou um vale estreito permaneceram bem similares às condições pré-rompimento, exceto pelas áreas em que houve perda de vegetação ciliar. Exemplos destas observações são apresentados na **Figura 3.5.29** a **Figura 3.5.32**.

Na **Figura 3.5.29**, um trecho de rio estreito (trecho número NR_18) foi delineado sob condições pré-rompimento, próximo ao ponto de levantamento de campo SG_09. A imagem mostra um canal relativamente estreito entre duas curvas do rio, com barras de pontal e medial de sedimentos ao longo do rio principal em três locais; barras de pontal na porção interna de cada curva, bem como os bancos mediais no centro aproximado da seção de corredeira entre as duas curvas.

A **Figura 3.5.30** mostra o canal ativo pós-rompimento comparado com o canal pré-rompimento. A largura do canal ativo parece ser consistente antes e após o rompimento, e a configuração em planta do rio permanece reta entre duas curvas. Não são observados os três bancos de sedimentos. A ausência dos bancos pode indicar um solapamento pelo fluxo de detritos ou pode se dever à opacidade da água, limitando a observação dos bancos. A perda de vegetação ciliar pode ser vista claramente, bem como a extensão da deposição de rejeitos nas áreas de planície de inundação ou nos baixos terraços do trecho. A vegetação da planície de inundação foi removida ou enterrada, embora observações de campo da deposição de rejeitos nas planícies de inundação e das raízes remanescentes na área ciliar sugiram que o aterramento é a mais provável das duas alternativas.

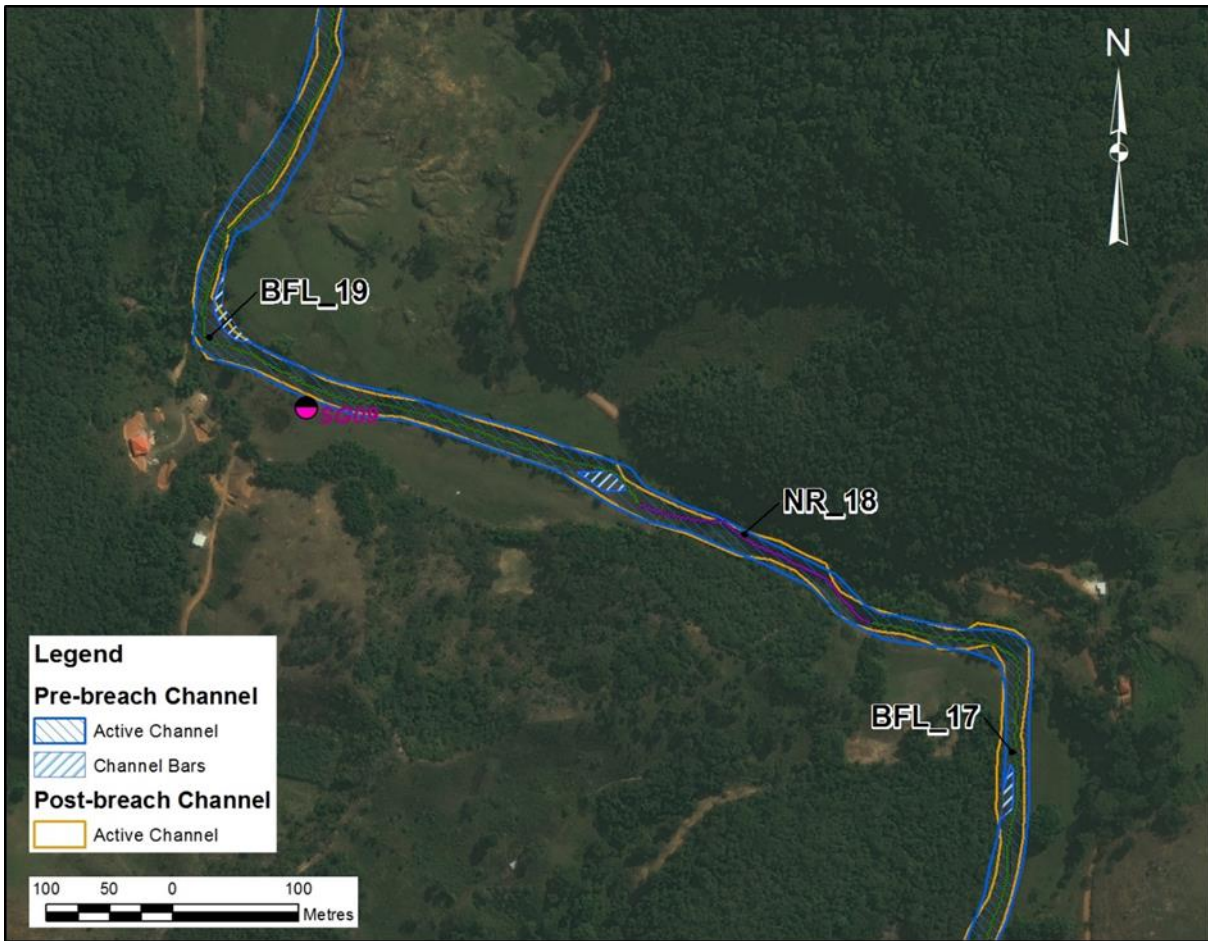


Figura 3.5.29: Delimitação do Canal Ativo Pré-Rompimento para Trechos de Rio com Planícies de inundação Estreitas (Trecho NR_18).

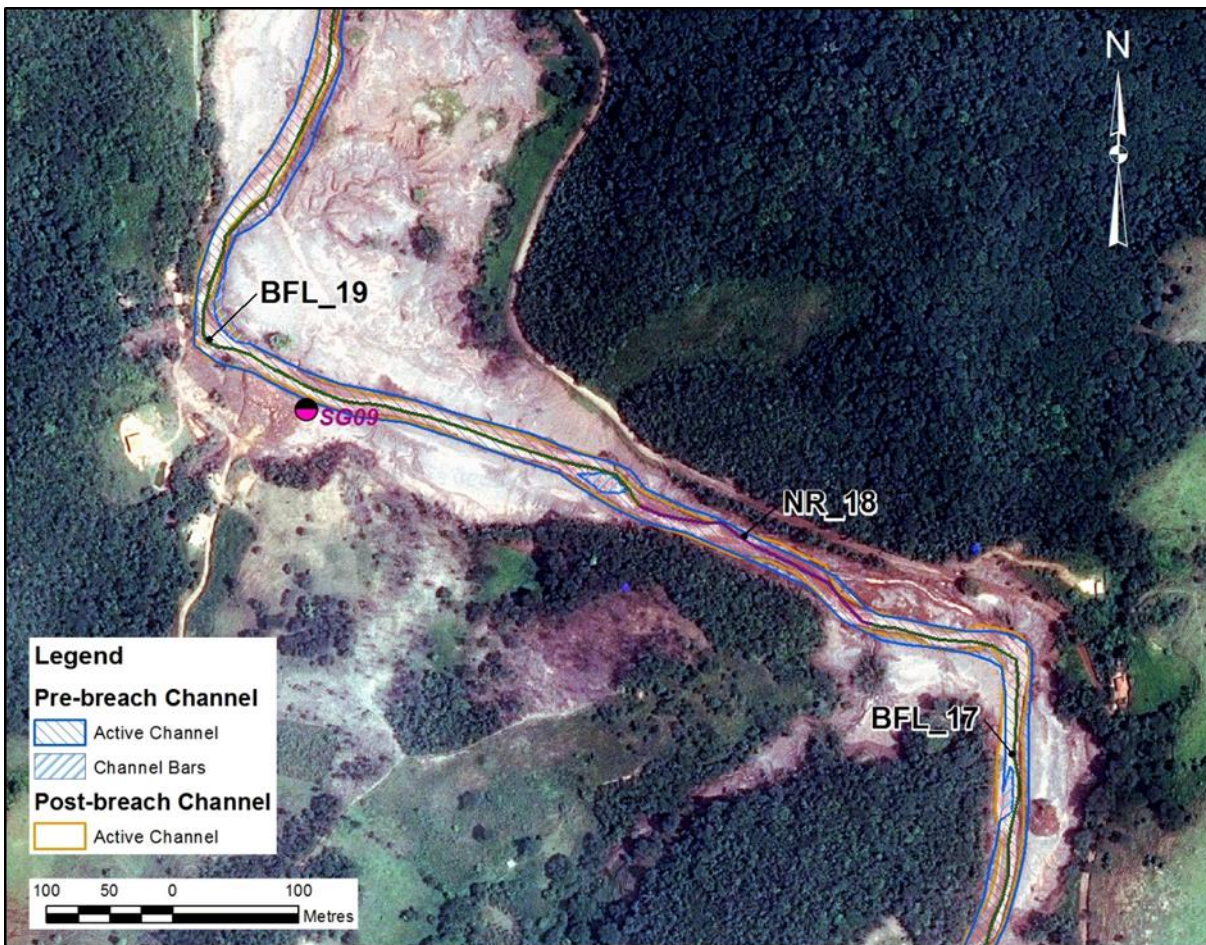


Figura 3.5.30: Delimitação do Canal Ativo Pós- Rompimento para Trechos de Rio com Planícies de inundações Estreitas.

Para trechos de rio com uma planície de inundação desenvolvida, observou-se que o canal ativo sofreu principalmente uma alteração em locais em que uma margem existente estava sofrendo erosão ativa e o canal já estava sujeito a migração sob condições naturais. A **Figura 3.5.31** mostra um trecho do rio com planície de inundação larga, com aproximadamente 150 m. Antes do rompimento, a evidência de migração do canal ativo é observada nas imagens na forma de uma divisão do canal ao redor de uma ilha na porção central. Ilhas no meio do canal, parcialmente cobertas com vegetação e com leito fluvial parcialmente exposto são geralmente indicativo de uma configuração de canal que está passando por um ajuste natural. A **Figura 3.5.32** mostra o impacto do evento de rompimento sobre esta seção do rio. A ilha no meio do canal foi removida e substituída por um canal com fluxo simples e mais reto. Afastado do local da ilha, o canal pós-rompimento parece ter se estreitado, possivelmente como resultado de um aumento localizado na declividade do leito do rio devido à remoção da ilha ou, possivelmente, como resultado de uma redução localizada na declividade, resultante da restrição do fluxo causada pela ponte (parte superior direita da imagem) e do acúmulo de rejeitos e sedimentos em uma zona de deposição formada a montante da ponte. Agora, o canal pós-rompimento está mais reto do que o canal pré-rompimento e os meandros a jusante da seção ajustada têm um raio menor do que antes do rompimento. A deposição de rejeitos pode ser observada em toda a planície de inundação. A perda de vegetação ciliar pode ser claramente vista, assim como a extensão da deposição de rejeitos nos baixos terraços ou áreas de planície de inundação presentes neste trecho. A vegetação da planície de inundação foi removida ou enterrada, embora observações de campo da deposição de rejeitos nestas planícies e das raízes remanescentes na área ciliar sugiram que o aterramento é a mais provável das duas alternativas.



Apesar das mudanças no canal observadas na imagem e da deposição na planície de inundação, o canal manteve uma geometria de seção transversal similar antes e após o rompimento com uma largura do leito menor típica para este trecho.



Figura 3.5.31: Delimitação do Canal Ativo Pré- Rompimento para Trechos de Rio com Planícies de inundação Largas.



Figura 3.5.32: Delimitação do Canal Ativo Pós- Rompimento para Trechos de Rio com Planícies de inundação Largas.

3.5.5.4 Tributários

Os tributários que deságuam no rio principal também foram afetados pelo fluxo de detritos e rejeitos. Para entender o efeito sobre os tributários, foi desenvolvido um modelo conceitual da afluência e da deposição de rejeitos.

No modelo conceitual, enquanto o nível do fluxo de rejeitos aumentava no rio principal, a água e os rejeitos começaram a refluir ao longo de vales de tributários. A velocidade do fluxo era provavelmente diretamente proporcional à taxa de aumento do nível do fluxo de detritos. À medida que os rejeitos se moviam para montante, eles formavam uma frente de detritos que avançava à frente da onda de inundação. Enquanto o fluxo de detritos e rejeitos atingia níveis máximos no rio principal, o avanço do fluxo nos tributários se desacelerava até que fosse estabelecida uma superfície de fluxo de detritos em equilíbrio com o rio principal



em condições de remanso. Nesta condição de remanso, as velocidades do fluxo eram baixas, permitindo que parte dos rejeitos se assentasse e depositasse.

Depois que os níveis de pico do fluxo de detritos no rio principal passaram e o nível da água e do fluxo de rejeitos começou a recuar, a água e os rejeitos nos vales tributários começaram a fluir de volta para a drenagem do nível de base, acompanhando a queda no nível do fluxo de detritos no mesmo. À medida que os rejeitos fluíam de volta para o rio principal, os rejeitos assentados pareciam ainda estar em uma fase suficientemente líquida, de modo que eles também começaram a recuar. Entretanto, seu mecanismo de fluxo era diferente, provavelmente devido a algum grau de consolidação e a um aumento na viscosidade dos rejeitos como resultado do progressivo deságue à medida que a água drenava mais rapidamente do que os rejeitos. Isto resultou em uma lâmina de rejeitos nos tributários que, com base em observações de campo, parece ter recoberto o topo dos materiais da planície de inundação. Os rejeitos depositados lembram uma formação sedimentar que cobre a topografia subjacente com uma camada de material mais ou menos uniforme.

A espessura observada desta camada de rejeitos está relacionada com a taxa de recuo da onda de inundação no rio principal e com o comprimento e declividade do tributário. Quanto mais rapidamente os níveis das águas recuavam no rio principal e quanto mais íngreme e mais curto era o vale do tributário, mais rapidamente os rejeitos fluíram de volta para o vale do rio principal e mais fina era a camada de rejeitos deixada para trás.

Vários tributários foram visitados durante o levantamento de campo para elaboração deste relatório visando entender a natureza do fluxo de rejeitos nestas áreas e coletar dados para orientar a recuperação das áreas dos tributários. Durante o levantamento de campo, alguns tributários já haviam sido recuperados e alguns estavam em processo de recuperação. No caso dos tributários visitados em que nenhum trabalho de recuperação ainda havia sido feito, a camada de rejeitos cobria a planície de inundação existente de modo consistente com o modelo conceitual de deposição descrito acima. Nestes locais, o tributário parecia ter escavado novamente o canal natural pré-rompimento, não tendo sido observada evidência de um realinhamento do canal (**Figura 3.5.33**). Ao mesmo tempo, observou-se que a água fluindo estava relativamente limpa, com o leito fluvial visível, definido e com uma carga de sedimentos suspensos semelhante à dos tributários e cursos d'água não afetados.

Entretanto, observou-se que a camada de rejeitos depositada no tributário estava coberta de sulcos. Sulcos geralmente se desenvolvem devido à erosão causada por escoamento superficial da precipitação em solos de granulometria fina. A presença de sulcos nos rejeitos expostos indica que a erosão provavelmente causará um aumento do fluxo de rejeitos para o curso d'água quando chover e um aumento na descarga de sólidos suspensos do tributário para o rio principal.



Figura 3.5.33: Vista para montante em um tributário, mostrando a camada de rejeitos e o fluxo de água limpa (o leito do curso d'água é visível).

Além disso, os leitos de tributários observados em áreas afetadas dentro da AEL continham sedimentos finos em abundância. Tributários de tamanho similar observados na AER apresentavam leitos constituídos de areias e cascalhos, com alguns pedregulhos (**Figura 3.5.34 e Figura 3.5.35**). Portanto, inferiu-se que a presença de sedimentos finos nos tributários na AEL era derivada dos rejeitos depositados. A ausência de sedimentos de granulometria fina nos cursos d'água de declividade similar na AER indica que os depósitos de sedimentos finos (rejeitos) dos tributários afetados pelo rompimento de Fundão irão provavelmente ser mobilizados pelo fluxo lento e a baixa velocidade natural das drenagens. Esta mobilização dos rejeitos depositados dentro dos canais irá continuar até que um leito com granulometria mais grosseira seja desenvolvido, o que é granulometricamente mais próximo ao observado nas drenagens não afetadas pelo fluxo de rejeito.

Tendo tais observações como base, parece que os rejeitos depositados ao longo dos tributários e que estão totalmente expostos à precipitação provavelmente contribuirão para a carga de sedimentos do rio principal, na ausência de medidas remediadoras.



Figura 3.5.34: Vista detalhada de sedimentos no leito fluvial em tributários não afetados.



Figura 3.5.35: Vista detalhada de sedimentos no leito fluvial em tributários não afetados – Cascalho e Seixos.



3.5.6 Regime de sedimentos (Passado e Presente)

3.5.6.1 Movimento de sedimentos em um rio

Sedimentos em rios são geralmente transportados por dois mecanismos: turbulência de fluido e interações grão a grão (p.ex., saltação, rolamento ou deslizamento) (Ritter, 1986). Sedimentos suspensos transportados por turbulência de fluido podem ser separados em carga de lavagem e carga suspensa. A carga de lavagem consiste de silte e partículas de granulometria de argila (p.ex., finos) que são mantidos em suspensão pela turbulência da água, de tal modo que eles estão relativamente ausentes dos sedimentos no leito fluvial, uma vez que o movimento da água é capaz de manter estes materiais em suspensão por um longo tempo, mesmo em condições de baixa vazão. A carga suspensa consiste de areia e partículas com granulometria de cascalho, que podem ficar em suspensão no rio em caso de vazões entre moderadas e altas, mas que estão também presentes nos sedimentos do leito fluvial. A carga do leito consiste de material grande, geralmente do tamanho de cascalho ou maior, que se move bem junto ao leito sob condições de alta vazão.

Em geral, o transporte de sedimentos aumenta com o aumento da vazão de um rio. Entretanto, esta relação é não linear e o transporte de sedimentos geralmente aumenta com o quadrado da velocidade do fluxo. Além disso, sedimentos de menor tamanho são preferencialmente mobilizados e transportados antes dos sedimentos maiores, à medida que a vazão cresce, resultando em um aumento na turbidez no início do aumento da vazão e antes do início de um aumento na suspensão de areias e cascalhos pelo movimento do leito fluvial. Esta diferença temporal no transporte dos sedimentos finos em relação ao transporte de sedimentos grossos geralmente resulta em um pico de turbidez antes do início da vazão de pico.

O afluxo de sedimentos para córregos e rios é geralmente uma função da capacidade da chuva erodir e transportar sedimentos da terra para o curso d'água. Durante eventos de precipitação, a chuva que atinge o terreno é absorvida pelo solo por infiltração, capturada pelas plantas por evapotranspiração ou é levada para córregos e rios próximos por escoamento superficial. A remoção da vegetação do solo geralmente aumenta o componente que é levado para córregos e rios na forma de escoamento superficial. À medida que o escoamento superficial aumenta de volume ele geralmente atinge maiores profundidade e velocidade. À medida que a profundidade da água aumenta, a velocidade aumenta e a capacidade de transporte de sedimentos também cresce. No caso de solos de granulometria fina, este aumento no escoamento frequentemente resulta na formação de sulcos, que servem para concentrar o fluxo e aumentar a erosão localmente. A recuperação da cobertura vegetal e/ou o controle da água superficial em solos expostos constituem abordagens bem testadas para reduzir a erosão superficial.

O transporte de sedimentos no Córrego Santarém, Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce é regulado por estes princípios básicos. Quando a vazão dos córregos e rios aumenta, os sedimentos finos no canal são arrastados primeiro e carregados como sedimentos suspensos, gerando uma turbidez maior do que nas vazões mais baixas. A carga do leito fluvial que, tendo como base observações de trechos não afetados de tributários, parece consistir principalmente de cascalhos e pedregulhos, é provavelmente movimentada somente com uma alta vazão, mas a observação e a medição desta carga no Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce estão atualmente prejudicadas pela opacidade da água. É provável que os períodos de opacidade da água ocorram naturalmente no rio durante eventos de inundação. Há uma limitação também pelo fato de que as observações e medições de campo estão sendo feitas em condições de baixa vazão, a fim de gerenciar o risco normal para a saúde e segurança dos trabalhadores quando os rios estão com uma alta vazão.

O transporte de sedimentos no Córrego Santarém, Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo, e Rio Doce é controlado por esses princípios básicos os quais agem tanto sobre sedimentos naturais (p. ex. os materiais da planície aluvial) e sedimentos antropogênicos (rejeitos de Fundão). Quando a vazão dos rios aumenta, os sedimentos finos no canal são arrastados primeiro e carregados como sedimento em suspensão, resultando em maior turbidez do que nas vazões mais baixas. A carga de sedimentos do rio, que parece ser principalmente areais e cascalhos com alguns seixos com base na observação de trechos não afetados no sistema tributário, é provavelmente mobilizado apenas em fluxos altos, mas a observação e a medição dessa carga no curso principal do Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo, e Rio Doce está atualmente dificultada pela opacidade da água. É provável que períodos de água turva ocorram naturalmente no rio durante eventos de inundação. É também limitado pelas observações e medições de campo que foram feitas com baixa vazão a



fim de gerenciar o risco normal para saúde e segurança dos trabalhadores em serviço ao longo de rios fluindo com alta vazão.

Os rejeitos liberados pelo rompimento da barragem de Fundão são de granulometria fina e, por conseguinte, foram transportados provavelmente em suspensão. A relação de materiais sólidos e água no evento do fluxo de rejeitos era provavelmente alta, afetando assim a viscosidade da mistura água e rejeitos. Esses rejeitos foram depositados na planície de inundação como uma camada de material, tipicamente com 0,5 de espessura (variando de 0 – 1 m), baseando-se nas observações na estratigrafia da planície.

Os rejeitos também foram depositados nos rios em barras de sedimentos em locais onde a capacidade de transporte no limite da inundação provavelmente reduziu abaixo da capacidade do fluxo para transportar o material arrastado. A limitada alteração observada na morfologia fluvial (p. ex. largura da planície fluvial) sugere que a energia de transporte disponível do fluxo de detritos foi suficiente para transportar os rejeitos em suspensão, mas esta mesma energia não foi suficiente para vencer a resistência da margem do rio e alargar o canal natural. Isto pode ter sido resultado de um aumento na viscosidade do fluxo devido ao volume de sedimentos arrastados ou devido às interações grão-grão dos sólidos suspensos (Iverson, 1997). O efeito da inundação por rejeito na profundidade do canal parece ter sido o de erodir o leito do canal preenchendo-o com o rejeito transportado e o solo carregado na fase limite - regressional da inundação. A erosão da margem do rio durante o evento de inundação e subsequente reestabelecimento das elevações do leito é um comportamento comum dos rios.

3.5.6.2 Erosão de sedimento natural durante o evento de rompimento

A erosão de sedimento natural durante o rompimento foi observada no campo sob duas formas principais: erosão modesta e generalizada ao longo das margens de rios (p.ex., na porção externa de curvas de meandros nas planícies de inundação) e erosão mais localizada em pontos específicos em um trecho de rio (p.ex., depósitos aluviais nos pontos em que tributários entram no rio principal). Estas áreas de erosão e contribuição de sedimentos naturais para a carga de sedimentos do rio principal são descritas em mais detalhes a seguir.

3.5.6.2.1 Contribuição da erosão ao longo das margens de rios

Observou-se a ocorrência de erosão generalizada distribuída ao longo das margens de rios, afetando-as de um modo relativamente uniforme. O grau de erosão estava distribuído de forma relativamente uniforme, variando em extensão e magnitude em função da tipologia do trecho.

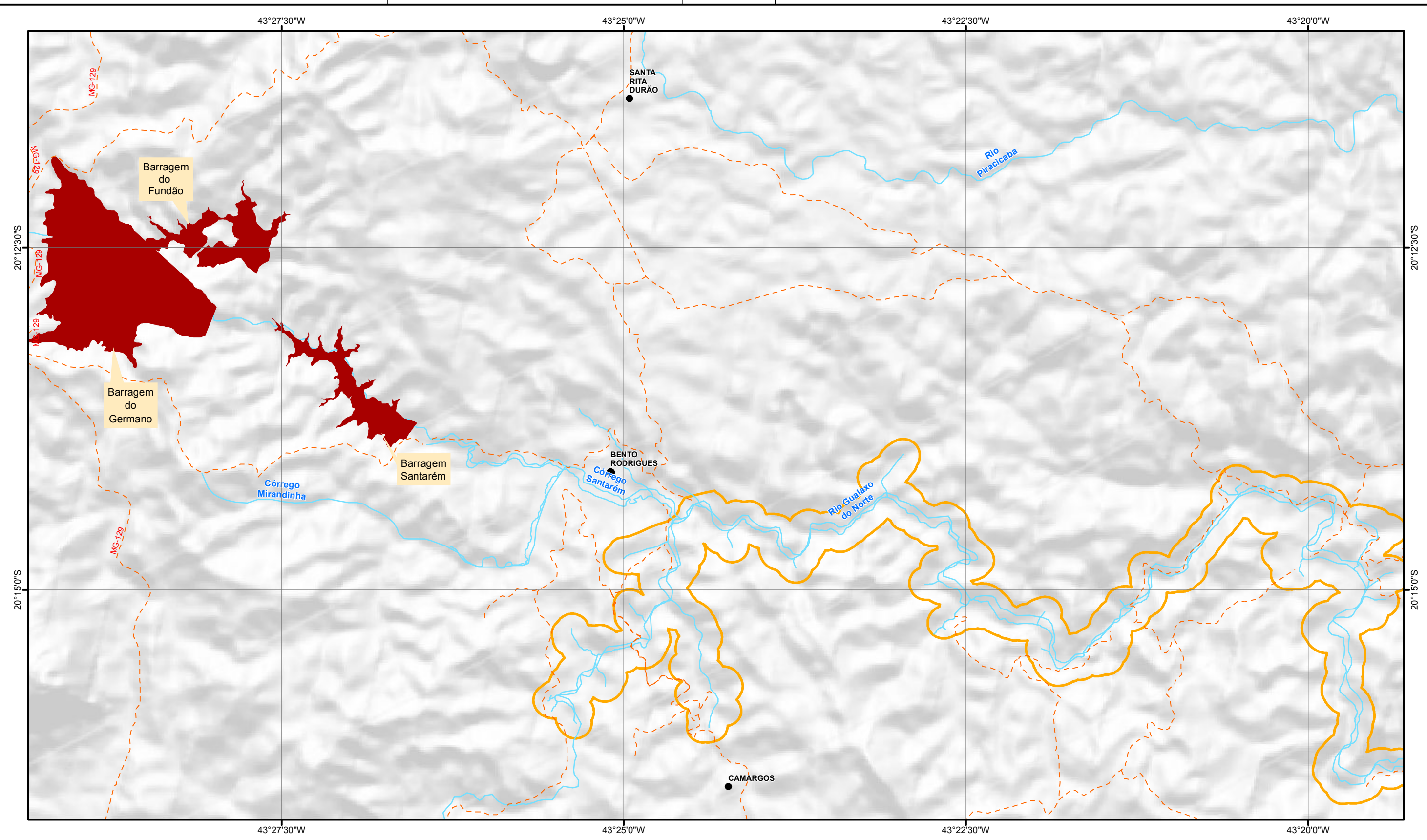
Em geral, trechos de cânion (CN) pareciam ter sofrido uma menor erosão das margens como resultado do fluxo de rejeitos. As margens nos trechos de cânion apresentavam leito rochoso abundante, sendo resistente à erosão. A não ser pela perda da vegetação ciliar e de solos nas encostas, a margem fluvial propriamente dita parece ter permanecido muito discretamente modificada com a passagem da onda de detritos. Inversamente, as planícies de inundação mais largas nos trechos BFL, parecem ter sido as mais afetadas pelo fluxo de rejeitos, resultando em alterações na localização do canal em alguns pontos.

Diretamente relacionada com as observações da erosão mais generalizada está a perda da margem de suporte da vegetação ciliar. Os trechos onde a vegetação ciliar nas margens era mais desenvolvida (BFL, BFS e NR) apresentou uma perda significativa deste ambiente natural após o rompimento. As seções de trecho mais confinadas também apresentaram perda de mata ciliar e de mata de encosta nos pontos em que o fluxo de detritos se estendeu de forma mais expressiva. As observações pós-rompimento dos impactos do fluxo de rejeito e detritos sugerem que os trechos com planícies de inundação parecem ter sido os mais afetados pelo rompimento. Nestes trechos, a perda de vegetação ciliar das margens dos rios e em parte da planície de inundação é mais visível. A presença de tocos residuais e sistemas de raízes observados no campo deu suporte às medições de campo que acabaram por indicar mudanças limitadas na largura de canal nos trechos fluviais investigados.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

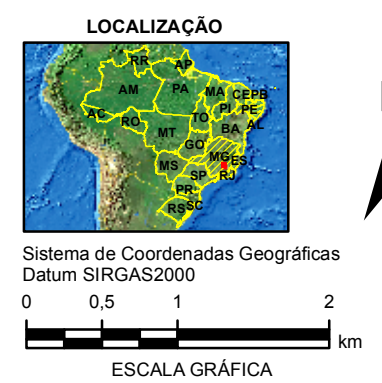
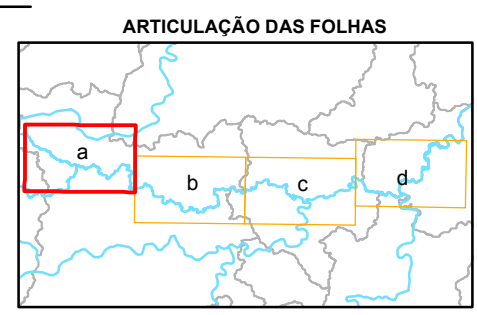
Erosão da margem do rio levou a formação de margens erosivas, geralmente localizados na face externa da curva do rio. Margens erosivas são fontes naturais de sedimentos fluviais relacionados a processos naturais de meandros fluviais e formação de planície de inundação e são encontrados em locais onde o rio está ativo ou pré-disposto a migração natural do canal. As margens erosivas são tipicamente identificadas nas curvas de meandro externo e a maioria comumente nas porções de jusante de um meandro. Essas localizações estão onde o rio naturalmente migra lateralmente dentro de sua planície de inundação. Durante o levantamento de campo, 11 pontos principais de erosão foram observados no segmento do rio a montante na confluência do rio Gualaxo do Norte com Rio do Carmo e 5 pontos principais de erosão nos segmentos restantes a jusante (**Figura 3.5.36**).



LEGENDA

- ⊙ Sede Municipal
- Distritos
- localização De Pontos de Erosão Observados nos Rios
- Localização Com Estimativa da Espessura do Rejeito
- - - Estradas de Acesso
- Curso D'Água
- Corpo D'Água
- Barragens de Rejeito

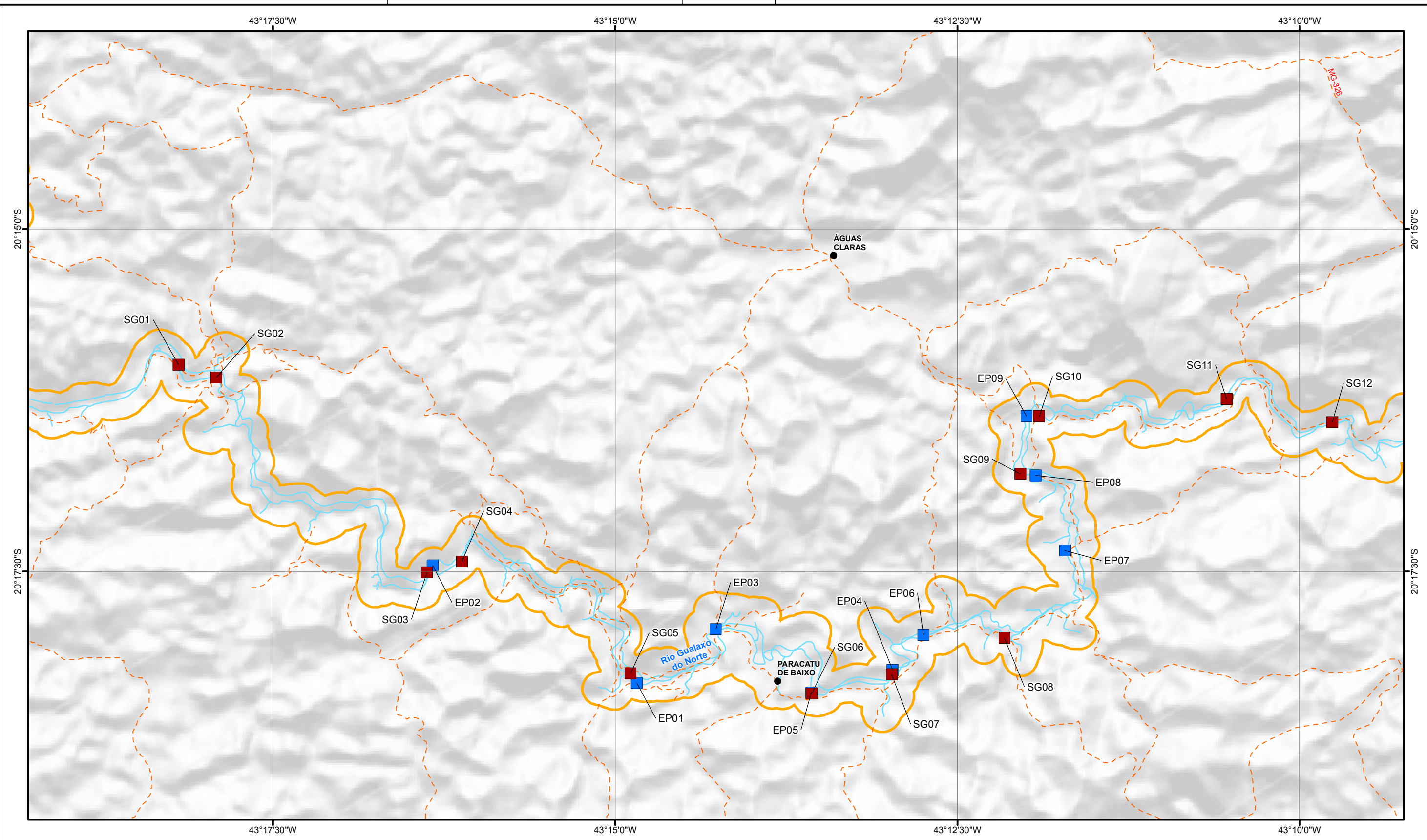
□ Área de Estudo Local



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ESPESSURA DE REJEITO E PONTOS DE EROSÃO**

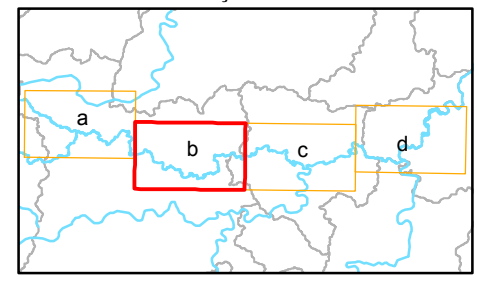
PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:50.000
GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.5.36 a
REV:	DC	00	



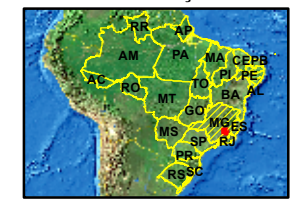
LEGENDA

- ⊙ Sede Municipal
- Distritos
- localização De Pontos de Erosão Observados nos Rios
- Localização Com Estimativa da Espessura do Rejeito
- - - Estradas de Acesso
- Curso D'Água
- Corpo D'Água
- Barragens de Rejeito
- Área de Estudo Local

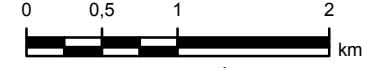
ARTICULAÇÃO DAS FOLHAS



LOCALIZAÇÃO



Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000



ESCALA GRÁFICA



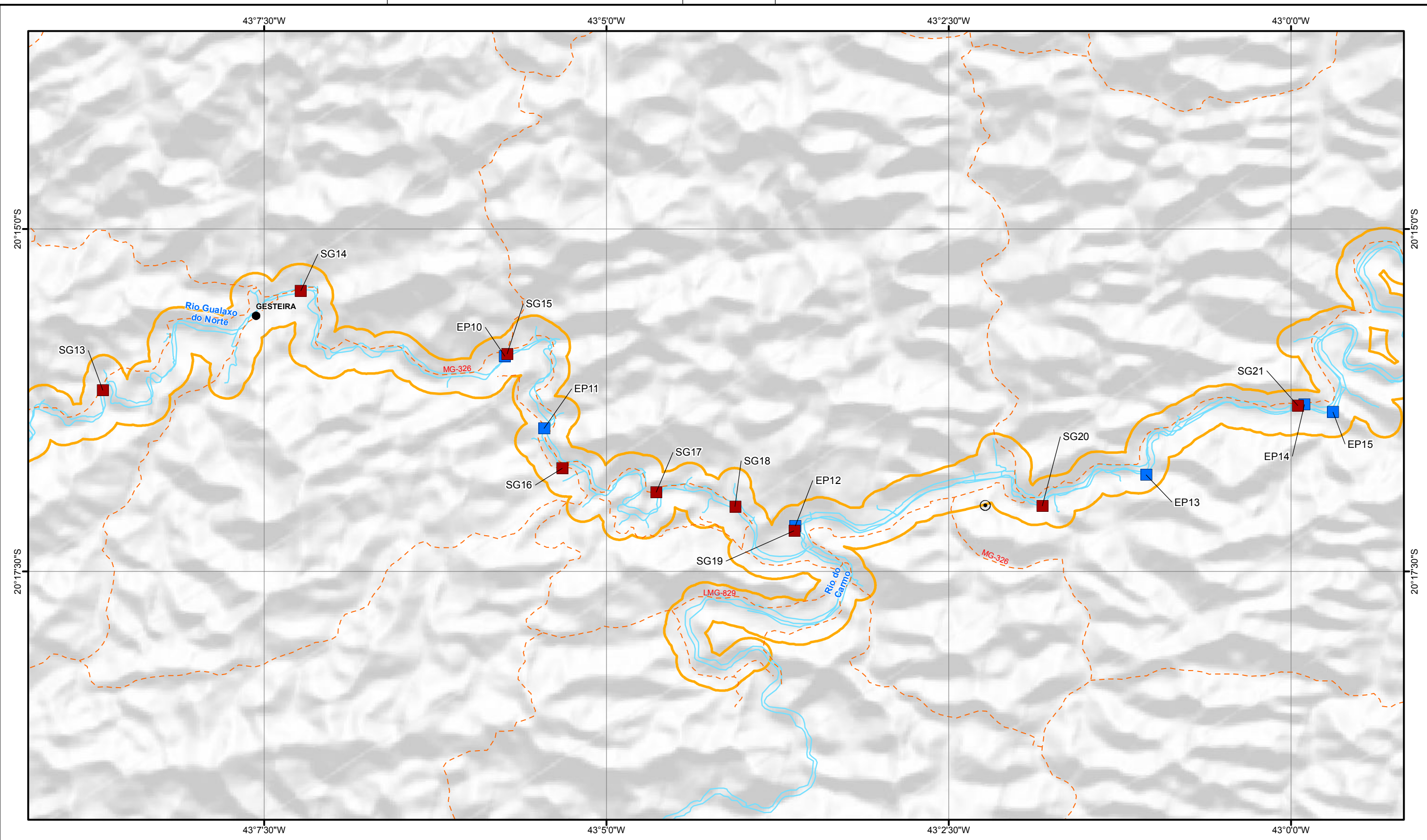
PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ESPESSURA DE REJEITO E PONTOS DE EROSÃO**

PROJETO: 169-515-2282		ESCALA: 1:50.000
GIS	NTFE	outubro/2016
REV	DC	00



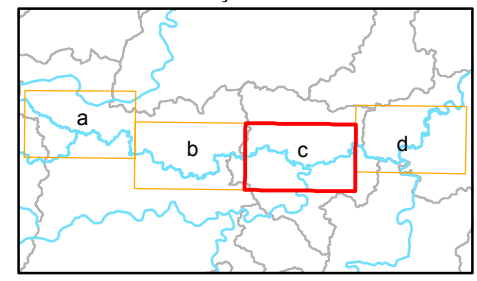
Figura 3.5.36 b



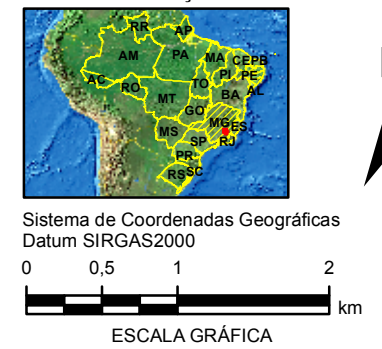
LEGENDA

- ⊙ Sede Municipal
- Distritos
- localização De Pontos de Erosão Observados nos Rios
- Localização Com Estimativa da Espessura do Rejeito
- - - Estradas de Acesso
- Curso D'Água
- Corpo D'Água
- Barragens de Rejeito
- Área de Estudo Local

ARTICULAÇÃO DAS FOLHAS



LOCALIZAÇÃO



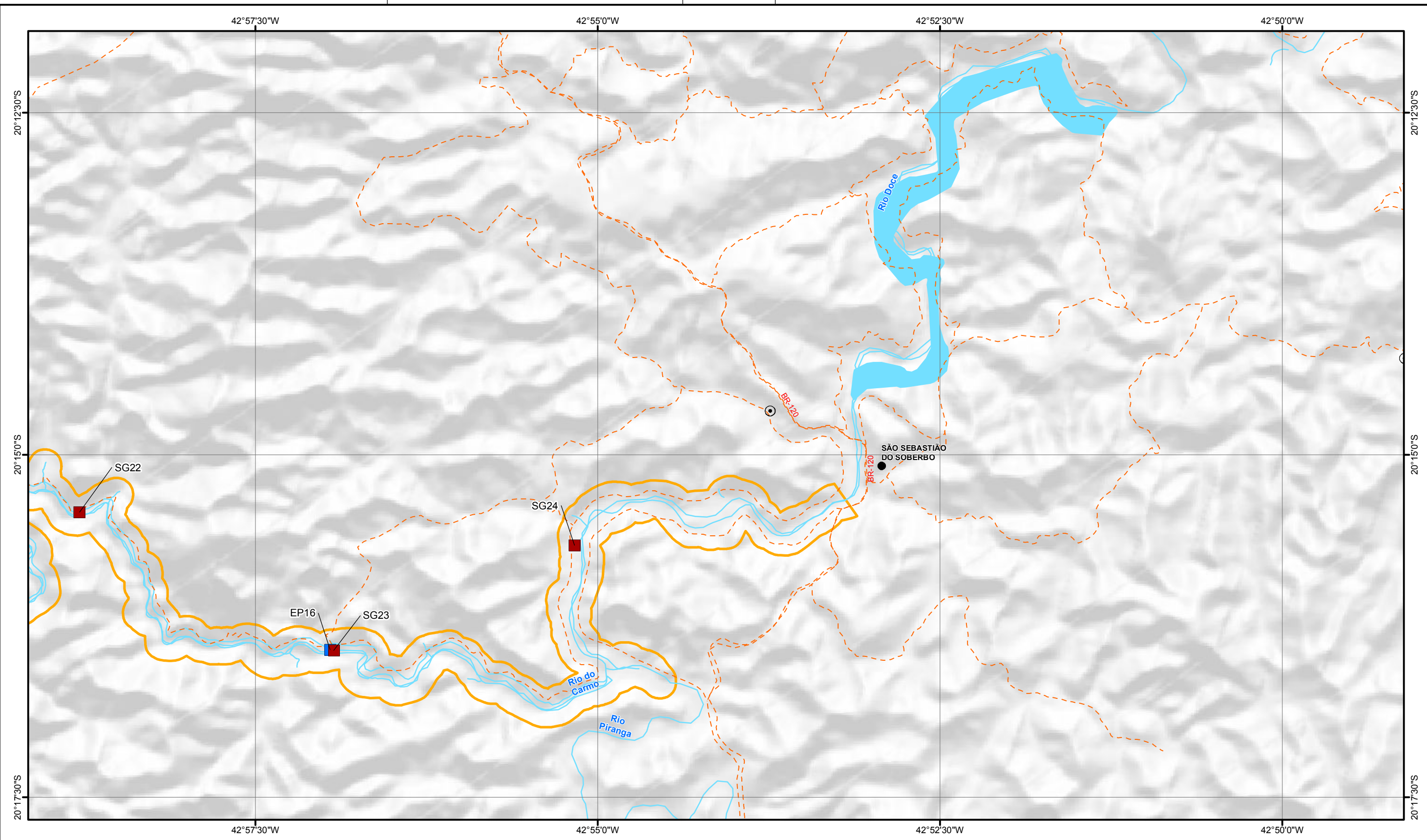
PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ESPESSURA DE REJEITO E PONTOS DE EROSIÃO**

PROJETO: 169-515-2282		ESCALA: 1:50.000
GIS	NTFE	outubro/2016
REV	DC	00



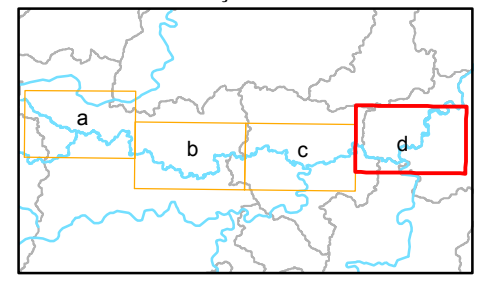
Figura 3.5.36 c



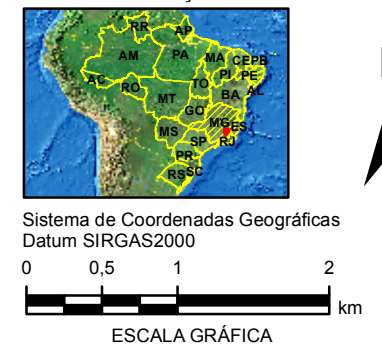
LEGENDA

- ⊙ Sede Municipal
- Distritos
- localização De Pontos de Erosão Observados nos Rios
- Localização Com Estimativa da Espessura do Rejeito
- - - Estradas de Acesso
- Curso D'Água
- Corpo D'Água
- Barragens de Rejeito
- Área de Estudo Local

ARTICULAÇÃO DAS FOLHAS



LOCALIZAÇÃO



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ESPESSURA DE REJEITO E PONTOS DE EROSÃO**

PROJETO: 169-515-2282		ESCALA: 1:50.000
GIS	NTFE	outubro/2016
REV	DC	00

Figura 3.5.36 d





AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Parte desta erosão generalizada provavelmente resultou na erosão de material sedimentar natural armazenado nas margens dos rios que foi deslocado e transportado rio abaixo pelo fluxo de detritos. Com a inexistência de dados disponíveis relativos às condições pré-rompimento das margens e planícies de inundação dos rios, foi feita uma estimativa inicial usando observações de campo e uma avaliação com base na geomorfologia fluvial levantada, de modo a dimensionar o quantitativo de carga de sedimentos naturais arrastados pelo fluxo de detritos na AEL. Adicionalmente, a disponibilidade de imagens pré rompimento está deslocada das imagens pós rompimento tornando difícil identificar áreas específicas de erosão nas margens dos rios devido ao evento de inundação por rejeitos. Esta estimativa pressupõe o seguinte:

- A erosão generalizada das margens afetou um percentual variável do comprimento do canal, dependendo da tipologia do trecho fluvial, como se segue: 20% para trechos do tipo cânion que são predominantemente rochosos, 80% para trechos do tipo confinado, 40% para trechos do tipo estreito porque exibiam deposição mais que acreção, 60% para trechos do tipo largo com planície de inundação pequena porque são canais predominantemente retos e 80% para trechos do tipo largo com planície de inundação grande porque apresentavam algum grau de desenvolvimento médio. Estes percentuais de margens experimentando erosão são comparáveis às observações de campo porque o fluxo dos canais é tipicamente reto, e, com exceção dos trechos largos de planície de inundação, não exibiam meandros com margens erosivas e barras em pontal. Ressalta-se que, em condições naturais, as margens dos trechos do tipo cânion possuem pouco ou nenhum sedimento associado, devida a presença de rochas próximas à superfície;
- A estimativa da profundidade do leito menor para um dado segmento foi considerada como sendo a altura da margem típica para aquele trecho. Como a erosão ocorre tipicamente em uma margem do rio enquanto o lado oposto é submetido a acreção, o comprimento de margem disponível para erosão foi estabelecido pelo comprimento do trecho e não em duas vezes o comprimento do trecho;
- A largura estimada da margem erosiva varia dependendo do tipo de trecho do rio, e é calibrado pelas observações de imagem e de campo, como segue:
 - 0,5 m para trechos do tipo cânion e confinado como esses trechos são tipicamente controlados por leito rochoso com pouco ou nenhum solo superficial visível nas imagens de antes do rompimento disponíveis;
 - 1 m até 2 m para trechos do tipo estreitos como esses trechos encontram-se tipicamente em linha reta e a erosão de margem resolúvel máxima com base nas imagens de antes do rompimento disponíveis era de 1 m (ver seção 3.5.4.2). Um valor de 2 m foi aplicado para trechos estreitos no Rio do Gualaxo do Norte e 1 m no rio do Carmo devido à proximidade do rompimento;
 - 2 m até 3 m para largo com pequenos trechos do tipo planície de inundação como esses trechos estavam também tipicamente em linha reta mas observou-se que no campo pareciam ter sofrido mais erosão do que trechos estreitos e uma estimativa de 2 m foi considerado razoável. Um valor de 3 m foi aplicado para trechos estreitos no Rio Gualaxo do Norte e 2 m no Rio do Carmo devido a proximidade do rompimento;
 - 3 m para largo com grandes trechos do tipo planície de inundação como esses trechos mostraram algum desenvolvimento de meandro e observou-se que no campo sofreram a maior erosão de todas. De acordo com eles, foram atribuídos o mínimo de erosão de margem resolúvel com base nas imagens de antes do rompimento (3 m, ver seção 3.5.4.2) que foi considerado com base nas observações do campo.
- Nenhum dado explícito nos graus de erosão de margem foi identificado devido medições limitadas de antes do rompimento, portanto, valores de erosão representativos foram aproximados para capturar as mudanças observadas na localização da margem do rio.

Foi feita uma estimativa do volume total de sedimentos naturais por trecho fluvial multiplicando-se o comprimento do trecho afetado pela altura de margem representativa e por uma largura de erosão de margem representativa. A **Tabela 3.5.8** mostra o volume estimado de sedimento natural erodido pelo evento de fluxo de detritos por trecho fluvial. Os resultados sugerem que a erosão de sedimentos naturais foi mínima nos



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

trechos de cânion, confinados e estreitos, com os maiores volumes de sedimentos naturais se originando dos trechos mais longos. Os trechos do tipo BFS e BFL foram aqueles que estima-se terem gerado os maiores volumes de material erodido das margens. A maior contribuição desta forma é estimada para trecho BFS_26 com um volume de aproximadamente 23.150 m³.

Tabela 3.5.8: Erosão natural das margens – Estimativas Preliminares.

Trecho	Comprimento (m)	% Afetado	Altura da Margem (m)	Largura Erodida (m)	Volume de Baixa Erosão (m ³)	Volume de Média Erosão (m ³)	Volume de Alta Erosão (m ³)
CN_02	914	20	1.4	0.5	90	130	180
CN_12	261	20	1.7	0.5	30	40	50
CN_20	533	20	2.1	0.5	90	110	130
CN_24	748	20	1.9	0.5	130	140	150
CN_28	886	20	2.3	0.5	180	200	220
CF_03	3.107	80	2.2	0.5	2,400	2,730	3,110
CF_05	4.882	80	1.7	0.5	2,820	3,320	3,910
CF_07	2.882	80	2.0	0.5	1,850	2,310	2,880
CF_16	295	80	2.5	0.5	220	300	410
CF_21	631	80	2.1	0.5	320	530	880
CF_30	516	80	2.7	0.5	510	560	620
CF_34	446	80	2.7	0.5	430	480	540
CF_36	8.507	80	2.7	0.5	8,270	9,190	10,210
CF_38	6.979	80	2.7	0.5	6,790	7,540	8,370
NR_04	2.232	40	1.0	2	720	1,790	4,460
NR_06	4.566	40	1.2	2	2,100	4,380	9,130
NR_09	3.036	40	0.8	2	770	1,940	4,860
NR_14	263	40	1.5	2	240	320	420
NR_18	214	40	2.6	2	400	450	510
NR_23	372	40	2.3	2	620	680	740
NR_25	606	40	1.7	2	460	820	1,450
NR_31	920	40	2.2	1	600	810	1,100
BFS_01	1.466	60	0.9	3	1,060	2,370	5,280
BFS_08	4.160	60	1.4	3	7,330	10,480	14,980
BFS_10	5.325	60	1.9	3	13,840	18,210	23,960
BFS_22	1.706	60	2.1	3	5,420	6,450	7,680
BFS_26	6.124	60	2.1	3	16,210	23,150	33,070
BFS_29	2.521	60	1.5	3	3,410	6,810	13,610
BFS_32	2.537	60	1.4	2	1,990	4,260	9,130
BFS_BL_33	3.773	60	2.8	2	11,840	12,680	13,580
BFS_35	6.990	60	1.6	2	7,160	13,420	25,160
BFS_37	5.971	60	2.4	2	13,760	17,200	21,500
BFL_11	5.087	80	1.1	3	4,920	13,430	36,630
BFL_13	1.518	80	1.2	3	1,750	4,370	10,930
BFL_15	1.624	80	1.7	3	3,760	6,630	11,690



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Trecho	Comprimento (m)	% Afetado	Altura da Margem (m)	Largura Erodida (m)	Volume de Baixa Erosão (m ³)	Volume de Média Erosão (m ³)	Volume de Alta Erosão (m ³)
BFL_17	2.942	80	1.3	3	3,980	9,180	21,280
BFL_19	1.403	80	1	3	1,120	3,370	10,100
BFL_27	7.414	80	1.1	3	7,170	19,570	53,380
Total			134,760		210.350		366,190

Legenda: Cânion (CN), Confinado (CF), Estreito (NR), Largo com planície de inundação pequena (BFL), Largo com planície de inundação extensa (BFS).

Nota: Os volumes de erosão foram arredondados, portanto, o volume total apresentado pode não corresponder a soma de todos os valores.

O volume total estimado de sedimentos aluviais naturais erodidos das margens do rio durante a inundação por rejeitos foi aproximadamente 210.000 m³. Uma análise de sensibilidade foi realizada aumentando a altura estimada da margem para a altura máxima de margem observada no campo em cada trecho. Somando essas estimativas foi obtida uma estimativa do maior volume de material erodido. A variância entre as estimativas médias e altas para cada trecho foi usado para estimar o menor volume. Esses valores foram reportados na **Tabela 3.5.8**. O volume total estimado de sedimentos aluviais naturais erodidos a partir das margens de rio durante o evento de rompimento varia entre cerca de 140.000 m³ e 370.000 m³. Essas estimativas sugerem que o volume de sedimentos naturais erodidos e transportados das margens do rio é da ordem de poucas centenas de milhares de metros cúbicos. Na ausência de dados de levantamentos prévios do canal o nível de acurácia destas estimativas é relativamente grosseiro, e o volume de erosão total pode variar substancialmente. Se for admitido que o comprimento completo da margem do rio foi erodido para a diferença resolúvel mínima entre imagens disponíveis (3 m) para trechos de não-cânion e a diferença resolúvel máxima entre imagens disponíveis (1 m) para trechos de cânion, em seguida, a estimativa resultante é de cerca de 560,000 m³; uma variância de quase o dobro. Essa estimativa poderia ser considerada um limite superior porque nem todos as seções de margem de rio teriam sofrido erosão (por exemplo dentro dos meandros) durante a passagem do rejeito.

O volume estimado de material mobilizado a partir da margem de rio durante o evento de fluxo de detritos, e, subsequentemente, reaterrado quando o evento de inundação por rejeitos regrediu, é apresentado na próxima seção (Seção 3.5.6.2.2).

3.5.6.2.2 Outras fontes de sedimentos por erosão

Além da erosão generalizada ao longo das margens do rio, as principais fontes localizadas de sedimento fluviais observados no campo foram (classificadas em volume) i) córregos tributários para o rio principal ii) erosão do leito maior, e iii) deslizamentos de terra.

Os tributários que deságuam no rio principal naturalmente carregam sedimentos da erosão natural contínua e processos de transporte de sedimentos dentro da bacia de drenagem. Em geral, quanto maior a área da bacia, maior o volume de sedimentos carregados. A **Figura 3.5.37** mostra um exemplo de descarga de sedimento natural de um tributário no rio principal, sendo os sedimentos depositados no canal principal como um banco lateral, ficando expostos durante a vazante. Este padrão de deposição tende a deslocar o fluxo/ talvegue no canal principal para a margem oposta.



Figura 3.5.37: Descarga de sedimento natural típica de um tributário.

Com base em observações de campo do escoamento de áreas de fundo de vale não impactadas e próximas a tributários, a drenagem superficial de áreas com uso agrícola dentro de planícies inundáveis aparenta ser uma pequena fonte pontual de sedimentos naturais quando comparado ao volume de sedimentos mobilizados durante o evento de fluxo de detritos (**Figura 3.5.38**). As áreas com uso agrícola situadas nas planícies de inundação podem contribuir para o aporte de sedimentos para o rio quando são utilizadas para o plantio de culturas. Espera-se que o escoamento de sedimentos ocorra principalmente durante as fases iniciais de desenvolvimento da cultura, quando os solos estão totalmente expostos. Durante a estação chuvosa, eventos de precipitação podem mobilizar e transportar partículas do solo para o rio. Esta contribuição não foi observada diretamente, mas pode ser inferida a partir de estimativas de rendimento de sedimento da bacia (ver Secção 3.5.7.2).



Figura 3.5.38: Área com uso agrícola em uma planície de inundação de tributário (não afetado pelo rompimento).

Com base em observações de campo e a partir da análise do conjunto de dados LiDAR de alta resolução, inferiu-se que a contribuição de deslizamentos de terra para a carga de sedimentos carregada para o rio é



desprezível e, por conseguinte, não foi considerada como uma fonte significativa de sedimentos naturais para o rio.

Observações de campo de fontes de sedimentos naturais sugeriram que tais fontes eram pequenas se comparadas com os depósitos de rejeitos observados. Não foi possível uma análise detalhada de cada fonte de sedimento dentro do escopo desta avaliação, mas inferiu-se que a contribuição integrada de fontes de sedimentos naturais durante o evento de fluxo de detritos foi significativamente menor do que a erosão mais generalizada, uma vez que a descarga de sedimentos naturais ocorre durante todo o ano. Uma estimativa da contribuição natural anual de fontes pontuais foi derivada a partir da modelagem da carga de sedimentos naturais (apresentada na Seção 3.5.7.2). Considerando-se que o evento de fluxo de detritos teve uma duração de poucos dias a poucas semanas, prevê-se que a contribuição total de fontes de sedimentos naturais tenha sido inferior a 10.000 m³, situando-se provavelmente na faixa de 1.000 m³ a 5.000 m³ (representando um volume de alguns dias a duas semanas de carga natural média de sedimentos no rio principal).

Dois deslizamentos de terras foram observados ao longo das margens do rio em agosto de 2016, fornecendo sedimentos (solo) ao rio. Esses deslizamentos de terra foram de cerca de 100 m por 100 m com profundidades principais estimadas de 2 m. Relativo ao sedimento total fornecido ao rio durante o evento de rompimento, esses volumes de deslizamento de terra são pequenos e insignificantes relativo as incertezas em estimar o volume de rejeitos armazenados no canal e no leito maior.

3.5.6.2.3 Estimativa de erosão do leito durante o rompimento

Alguns graus de erosão do leito do rio pode ser esperado de ter ocorrido durante o evento do rompimento que resultou no aumento do estresse do fluido no leito devido ao rápido escoamento da onda de detritos na parte inferior do canal. Uma simples comparação dos dados topográficos com os dados batimétricos não permite avaliar o efeito da erosão no leito do rio uma vez que, tendo passada a inundaçã, o leito menormente é repreenchido em resposta à diminuição da vazão (e.g. Ritter, 1986). A coleta de dados da geometria do rio sugere que o efeito resultante do rompimento tem sido mínimo; entretanto, dados de espessura dos rejeitos foram avaliados pelo programa de amostragem geoquímica para o canal do rio. Estes dados, apresentados na **Tabela 3.5.9** fornecem estimativas sobre a profundidade dos rejeitos no canal do rio e podem ser utilizados para inferir a profundidade induzida pela erosão durante o evento do rompimento. Sondagens localizadas para a investigação geoquímica foram realizadas em março de 2016 e são apresentadas na **Figura 3.5.39**. Não obstante estes dados estarem limitados em extensão eles permitem estimativas preliminares do volume de rejeitos armazenado dentro do canal.

Tabela 3.5.9: Dados de espessura de rejeito no canal do rio provenientes do Programa de Geoquímica.

Amostra	Leste	Norte	Elevação (m)	Área do Canal (ha)	Ponto de Dados de Espessura (m)	Volume Estimado de Baixa Erosão (m ³)	Volume Estimado (m ³)	Volume Estimado de Alta Erosão (m ³)	Volume Estimado de Média Erosão (m ³)
T167	67397 8	776105 9	594	23,3 2	0,55	65,400	128,260	193,700	153,500
T169	70279 6	775527 4	598	20,6 2	0,80	84,100	164,960	249100	135,700
T151	67110 8	775908 3	662	14,3 9	0,70	51,400	100,730	152,100	94,700
T149	66521 5	776225 5	720	2,64	0,45	6,100	11,880	17,900	17,400
T152	67678 6	775808 1	581	10,5 2	0,60	32,200	63,120	95,300	69,300



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Amostra	Leste	Norte	Elevação (m)	Área do Canal (ha)	Ponto de Dados de Espessura (m)	Volume Estimado de Baixa Erosão (m³)	Volume Estimado (m³)	Volume Estimado de Alta Erosão (m³)	Volume Estimado de Média Erosão (m³)
T153	67796 5	775757 6	573	9,22	0,55	25,900	50,710	76,600	60,700
T154	68065 8	775533 7	557	9,53	0,65	31,600	61,945	93,500	62,700
T155	68246 6	775472 7	543	7,13	0,30	10,900	21,390	32,300	46,900
T156	68434 8	775446 0	530	9,40	0,60	28,800	56,400	85,200	61,900
T157	68715 0	775449 3	516	8,70	0,70	31,100	60,900	92,000	57,300
T158	68849 2	775589 1	514	5,75	0,70	20,500	40,250	60,800	37,900
T159	68803 8	775740 8	503	7,24	0,65	24,000	47,060	71,100	47,700
T160	69104 7	775760 5	459	9,96	0,50	25,400	49,800	75,200	65,600
T161	69298 3	775735 6	426	11,0 8	0,65	36,700	72,020	108,800	72,900
T162	69549 7	775834 6	419	11,8 7	0,70	42,400	83,090	125,500	78,100
T163	69807 2	775772 0	406	14,9 2	0,60	45,700	89,520	135,200	98,200
T164	66472 4	775769 3	708	2,82	0,40	5,800	11,280	17,000	18,600
T166	70199 9	775563 2	377	10,6 1	0,70	37,900	74,270	112,200	69,800
T181	71947 9	775887 4	332	76,0 5	1,95	756,400	1,482,975	2,239,400	500,700
T177	71418 5	775686 5	351	36,1 4	1,20	221,200	433,680	654,900	237,900
T171	70581 8	775602 6	384	23,4 5	0,15	17,900	35,175	53,100	154,400
T175	70952 4	775734 5	374	22,8 2	0,65	75,700	148,330	224,000	150,200
T179	71763 1	775635 8	339	49,8 2	0,60	152,500	298,920	451,400	328,000
T173	71001 6	775846 8	363	28,6 2	0,45	65,700	128,790	194,500	188,400
Volume Total						1,895,300	3,715,455	5,610,800	2,808,500

A variância da profundidade de rejeitos medidos nesses pontos pode ser usada para inferior uma profundidade máxima potencial da erosão dentro do rio como um resultado da inundação pelos rejeitos. É provável, baseado na revisão dos córregos regionais, fotografias históricas (antes do rompimento) e mapeamento geológico que o rio antes do rompimento foi sustentado por areia e cascalho com alguma

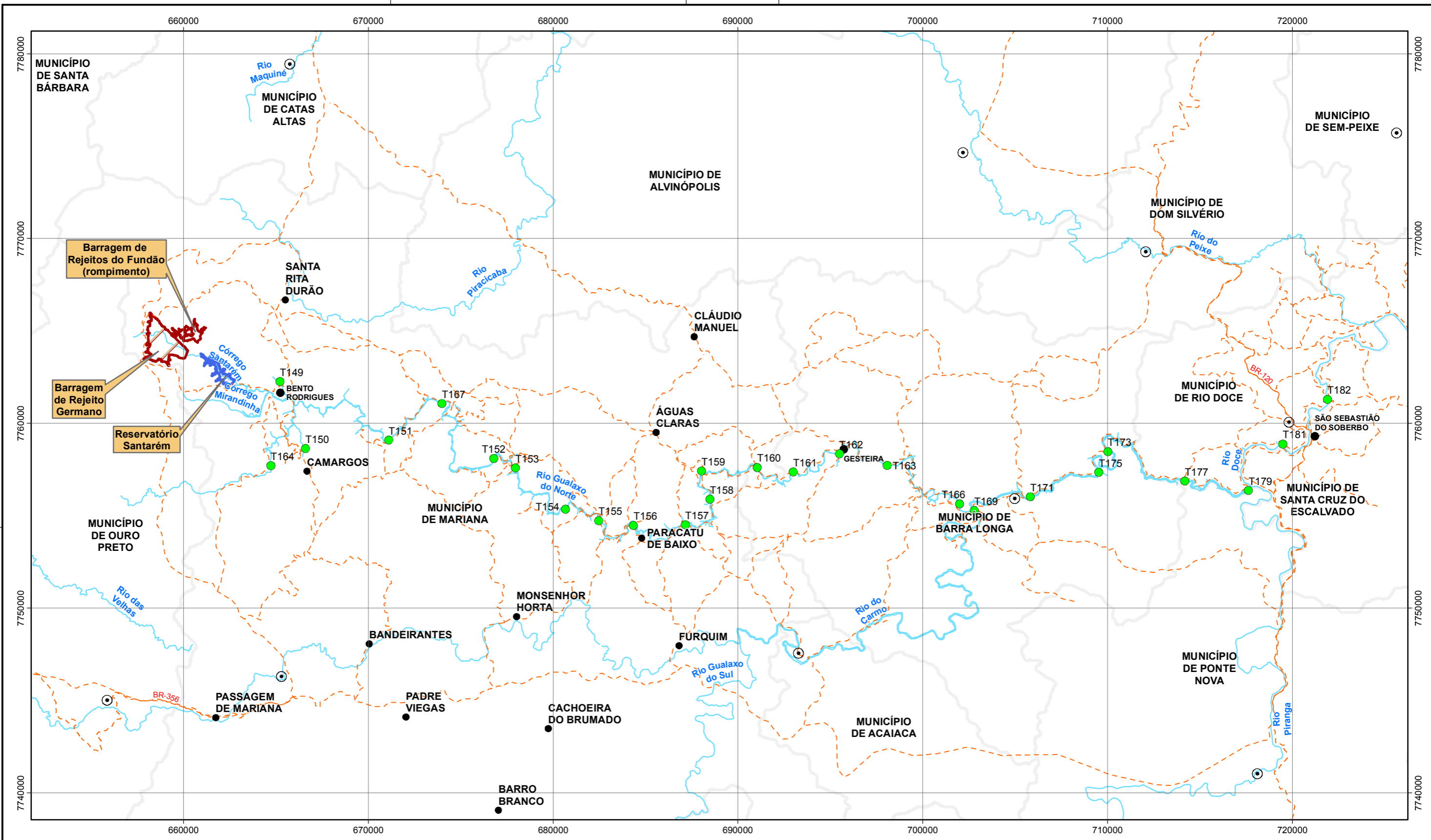


camada de seixos, formando o pavimento do leito (*lag layer*). Abaixo dessa camada, provavelmente rocha alterada ou sedimentos aluviais em trechos aluviais. A profundidade máxima de rejeitos pode registrar a profundidade máxima da erosão durante o evento de rompimento. Entretanto, os rejeitos depositados e aluviais naturais são indistinguíveis com base na granulometria junto com base na revisão estatística dos dados do programa geoquímico disponível (Golder, 2016b). Além disso, dados de observação de campo coletados em agosto indicaram que estratigraficamente os rejeitos e sedimentos da planície de inundação podiam também não ser confiavelmente diferenciadas exclusivamente pela cor. Relações estratigráficas, incluindo um contato erosivo entre rejeitos e solo nativo subjacente foram necessárias para diferenciar estes níveis.

Os dados de sondagem disponíveis são apresentados na **Tabela 3.5.9**. Na ausência de um programa de sondagem detalhado no canal o que forneceria a estratigrafia, foi proposto que os dados de sondagem disponíveis fornecessem uma estimativa mínima da profundidade de rejeitos. Foi ainda admitido que toda erosão associada com o fluxo de detritos assentou novamente na regressão da inundação com uma mistura de rejeitos e material do leito do rio erodido. A profundidade média de rejeitos medida é 0,65m com uma máxima de 1,95 m e uma mínima de 0,15 m. Essas profundidades são propostas para aproximar da profundidade da erosão. A variação padrão sobre a média nessas medições de profundidade é 0,34 m ou aproximadamente 51% do valor médio. Na ausência de outros dados as profundidades de rejeitos são inferidas como sendo a profundidade da erosão do canal durante o máximo do evento de inundação, a qual foi preenchida pelo rejeito na regressão da inundação. Alguma cautela precisa ser aplicada para esses dados já que um ponto único, T181, fornece quase 40% do valor estimado e é aplicado para uma seção do rio com 76 ha em área. Dados adicionais seriam preciso para refinar essas estimativas.

Assumindo que todo o material erodido do leito do rio foi substituído pelos rejeitos depositados e não por uma mistura de sedimentos erodidos do leito e rejeitos, uma estimativa de volume derivada a partir destes dados estarão superestimando o volume total de rejeitos, uma vez que os sedimentos do leito, compostos por cascalhos grosseiros e calhaus, normalmente se reassentam no leito antes dos rejeitos finos. No entanto, este volume de materiais erodidos e substituídos pode ser usado para fornecer um limite superior do volume de rejeitos armazenados no rio. Esta estimativa do volume associado a cada ponto de medição está incluída na última coluna da **Tabela 3.5.9**. A área do canal foi determinada com base na seleção do ponto médio entre dois locais de amostragem e atribuindo a área do canal do rio entre cada ponto médio de cada profundidade medida. Entretanto, espera-se que estas estimativas de volume, incluindo rejeitos e materiais erodidos do leito, possa resultar em um volume menor de rejeitos. Resumindo os números individuais apresentados na tabela, chega-se a uma estimativa de 3,7 milhões de m³.

Considerando que a erosão e deposição em um rio não são uniformes e que estas irão variar de acordo com o trecho e a forma em planta do rio, ao aplicar os valores medidos para as seções sem referência aos trechos, os resultados das estimativas de volume obtidos apresentarão uma larga faixa de incerteza. Além disso, não considerando que algumas partes do rio estarão sujeitas à erosão e outras à deposição (como o interior e exterior de curvas, por exemplo) o resultado será afetado. Estes aspectos da sedimentação do rio irão resultar em níveis de incerteza da ordem de $\pm 50\%$ e, possivelmente, tão elevados como $\pm 100\%$ em trechos de cânion onde a deposição de sedimentos é improvável e a inundação por detritos tenha erodido somente o material do leito rochoso. Uma abordagem global média foi, portanto, adotada para mitigar algumas das variabilidades associadas à deposição. Considerando a média de todos os valores de espessura medidos (0,65 m) e multiplicando-o pela área total do canal do rio, obtém-se uma estimativa de volume total de 2,8 milhões de m³. Supondo-se que todo este material refira-se a rejeitos e que o rio permita o armazenamento destes 2,8 milhões de m³, considerando o processo de reassentamento mencionado acima, significa que o provavelmente os rejeitos representam uma fração significativamente reduzida do material reassentado no leito do rio.



LEGENDA

- Amostragem de espessura de rejeito na calha dos cursos d'água
- Sede Municipal
- Distritos
- - - Estradas de Acesso
- Curso D'Água
- Hidrografia
- Reservatório de Água
- Barragem de Rejeito
- Limite Municipal

LOCALIZAÇÃO



Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000



ESCALA GRÁFICA



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **SONDAGENS REALIZADAS NO ESTUDO GEOQUÍMICO NAS CALHAS DOS CURSOS D'ÁGUA**



PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:200.000
GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.5.39
REV:	DC	00	



3.5.6.3 Movimento dos rejeitos

3.5.6.3.1 Mecanismos de transporte e deposição

Quando os rejeitos se moveram através do rio Gualaxo do Norte, as diferentes tipologias de trechos fluviais descritas na Seção 3.4.3, parecem ter sido fatores-chave para influenciar o transporte e deposição de rejeitos. A sequência de trechos de planícies de inundação separados por canais estrangulados parece ter criado uma série de bacias de deposição ao longo do rio principal, com a vazão de saída controlada pelo estrangulamento hidráulico do trecho mais estreito imediatamente a jusante. A passagem da onda de fluxo de detritos através destas bacias serviu para atenuar a onda de detritos, provocar um remanso nas planícies de inundação da bacia e propagar os rejeitos para áreas de deposição mais tranquilas, como descrito anteriormente.

Analisando detalhadamente uma combinação de planície de inundação e trecho de cânion, aproximadamente 1,5 km a jusante da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte, o primeiro trecho de rio confinado é o CN_02, um trecho do tipo cânion com uma declividade geral de aproximadamente 2,3%, largura de fundo do vale variando entre 6,5 m e 15 m e margens laterais quase verticais (declividade superior a 50 graus). Duas grandes calhas do tipo queda d'água, cada uma com uma queda entre 8,5 e 10 m, são encontradas neste trecho do rio. Este estrangulamento do fluxo atuou como um ponto de estrangulamento ou bloqueio do fluxo de detritos e rejeitos. Operou como uma estrutura natural de restrição do fluxo, limitando a vazão a jusante e assim forçando o fluxo de detritos e rejeitos a refluir para montante.

Além disso, este efeito de remanso impactou também o trecho do Rio Gualaxo do Norte a montante da confluência com o Córrego Santarém. O efeito de remanso percorreu mais de 5 km para montante do Rio Gualaxo do Norte e mais de 2,2 km para montante no Córrego Camargo até alcançar uma calha natural de cerca de 10 m a 15 m de altura (localizado fora da Vila Camargos). Os demais tributários menores (sem nome) do Rio Gualaxo do Norte e do Córrego Camargo sofreram o mesmo efeito de remanso.

O nível de rejeitos na área de remanso aumentou até que fosse alcançado um balanço/equilíbrio entre o influxo de rejeitos proveniente da área de drenagem do Córrego Santarém para o Rio Gualaxo do Norte e a vazão de saída do trecho de cânion CN_02. A aparência da área de remanso era similar a uma lagoa com velocidade de fluxo limitada, empurrando para a borda da área de remanso os detritos de vegetação ciliar removida durante a fase em que o fluxo se movimentava para montante. Devido às menores velocidades de fluxo na área de remanso, os rejeitos começaram a se assentar e depositar.

Uma vez que a vazão do influxo de rejeitos para o Rio Gualaxo do Norte era inferior à vazão de saída do trecho de cânion CN_02, o nível do fluxo de detritos na área de remanso começou a recuar. À medida que os níveis de fluxo de detritos e rejeitos diminuía, estes começaram a retornar ao canal natural do rio. Como já mencionado nas seções anteriores, a movimentação dos rejeitos para montante não afetou significativamente a geometria ou a configuração em planta do canal, já que sua velocidade era relativamente baixa quando comparada ao avanço da onda primária de detritos na direção do rio principal. Entretanto, a frente da onda movendo-se para montante consistia provavelmente de uma mistura mais espessa de água, rejeitos, detritos e vegetação removida das margens e das planícies de inundação.

Os rejeitos que começavam a se assentar e depositar nas áreas de remanso ainda se encontravam em um estado quase líquido e também começaram a retornar ao canal. Parte dos rejeitos permaneceu no local à medida que uma camada de rejeitos recobria a topografia subjacente do rio e planícies de inundação. Observou-se que este ciclo de transporte e armazenamento repetiu-se em cada trecho de cânion ou trecho confinado a jusante de CN_02: a restrição natural do fluxo parece ter limitado a vazão para jusante, criando uma área de remanso a montante.

3.5.6.3.2 Dinâmica de armazenamento de rejeitos ao longo do rio principal

As espessuras de rejeitos foram observadas nos locais de avaliação de campo dentro da AEL. Não foram feitas medições detalhadas ou abrangentes de espessuras de rejeitos como parte do levantamento de campo de geomorfologia. A tendência geral da espessura de rejeitos (**Figura 3.5.40** e **Tabela 3.5.9**) mostra uma redução gradual na sua espessura média em função do afastamento da fonte para todos os tipos de trechos fluviais. A espessura média de rejeitos varia com o tipo de trecho fluvial. Os trechos do tipo largo com planície de inundação grande (BFL) apresentam a maior espessura média de rejeito (aproximadamente 0,5 m),



seguidos pelos trechos do tipo largo com planície de inundação pequena (BFS) (aproximadamente 0,45 m). O acúmulo de rejeitos mais espessos nas planícies de inundação mais largas (devido as encostas mais baixas do canal, acarretando em velocidades mais baixas e uma grande área potencial de deposição disponível para receber os rejeitos) e a gradual redução da espessura de rejeitos a jusante são consistentes com o modelo conceitual de transporte e armazenamento de rejeitos apresentado anteriormente.

Os trechos do tipo cânion e confinado apresentam os menores volumes de rejeitos armazenados, o que é de se esperar em função de sua morfologia, podendo ser atribuído aos aspectos de sua declividade e velocidade do fluxo hídrico, fatores que impulsionam o transporte do fluxo de detritos para segmentos fluviais de jusante.

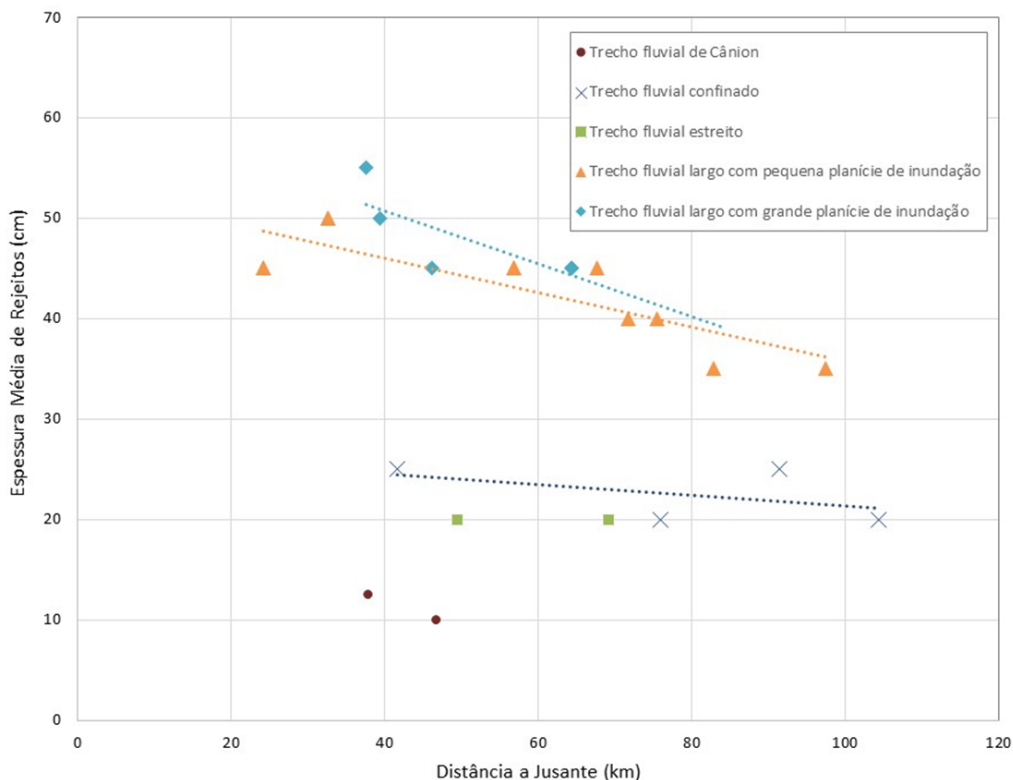


Figura 3.5.40: Espessura média de rejeitos observada, por tipo de trecho fluvial.

O volume de rejeitos armazenados na AEL foi estimado utilizando-se de três métodos separados (Métodos 1 e 2 Método 3). As estimativas foram baseadas nas áreas superficiais das zonas afetadas pela deposição dos rejeitos nas planícies de inundação, áreas estas derivadas de análises em SIG (Sistemas de Informação Geográfica) para cada trecho de rio identificado, e pela espessura dos rejeitos observados no campo durante os levantamentos geomorfológicos de campo

Método 1. O produto simples destes dois parâmetros resultou na estimativa do volume de rejeitos depositados para um determinado trecho de rio. Três valores de espessura do rejeito foram registrados para cada ponto durante os levantamentos geomorfológicos de campo, sendo um valor médio e um valor típico mínimo e máximo para um determinado trecho. Adicionalmente, uma série de dados de espessura em 101 pontos foram coletados a partir de sondagens em planícies de inundação e em trechos de rio associados às estas planícies

Método 2 (BFL_11, BFL_17, BFL_27, BFS_01, BFS_08, BFS_10, BFS_26, BFS_35, BFL-BFS_33, CF_05, CF_38, NR_04, NR_06, e Córrego Santarém). Trechos não associados às planícies de inundação (p. ex. trechos em cânion) não foram medidos nesta série de dados. Estes dados foram coletados pela Golder em



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

junho de 2016 e consistem de sondagens referentes à espessura dos rejeitos em pontos selecionados pela equipe de levantamento geomorfológico de campo (**Tabela 3.5.10**).

Método 3. Utilizou-se a espessura mínima de rejeitos observados para estimar um valor mínimo.

A **Tabela 3.5.10** apresenta a combinação dos conjuntos de dados de espessura de rejeitos e as estimativas das áreas de planície de inundação afetadas pela deposição de rejeitos em cada trecho de rio. Pode-se ver na **Tabela 3.5.10** que a maior parte da deposição e armazenamento de rejeitos ocorreu em trechos de rio com planícies de inundação, o que é um resultado esperado.

Tabela 3.5.10: Volumes estimados de rejeitos na bacia de drenagem do Córrego Santarém e em cada trecho fluvial.

Nome do Trecho	Área do Trecho (ha)	Espessura Média de Rejeito Observada na Margem do Rio (e intervalo) (m)	Método 1 Volume de Rejeito - Dados da Margem (m ³)	Média da Espessura de Rejeito nas Planícies de Inundação (m)	Método 2 Volume de Rejeito – Dados das Planícies de Inundação (m ³)	Método 3 Volume Mínimo de Rejeitos (m ³)
Rio Gualaxo Superior	93.7	0,55 (0,25 – 0,8)	520.000	1,20	1.100.000	240,000
BFS_01	16.5	0,55 (0,25 – 0,80)	91.000	1,20	200.000	41,000
CN_02	4.7	0,25 (0,10 – 0,40)	12.000	0,40	19.000	4,700
CF_03	26.3	0,35 (0,15 – 0,50)	92.000	0,50	130.000	40,000
NR_04	24.5	0,40 (0,20 – 0,60)	98.000	1,00	240.000	49,000
CF_05	49.1	0,40 (0,15 – 0,65)	200.000	0,75	370.000	74,000
NR_06	99.6	0,40 (0,20 – 0,60)	400.000	1,00	1.000.000	200,000
CF_07	19.0	0,35 (0,15 – 0,35)	66.000	0,50	95.000	28,000
BFS_08	62.9	0,45 (0,25 – 0,70)	280.000	0,80	500.000	16,000
NR_09	25.3	0,35 (0,20 – 0,50)	88.000	0,50	130.000	51,000
BFS_10	54.8	0,50 (0,20 – 0,75)	270.000	0,75	410.000	110,000
BFL_11	111.2	0,55 (0,25 – 0,80)	610.000	0,80	890.000	280,000
CN_12	1.1	0,20 (0,10 – 0,25)	2.300	0,25	2.900	1,100
BFL_13	24.7	0,50 (0,30 – 0,75)	120.000	0,75	180.000	74,000
NR_14	2.2	0,30 (0,20 – 0,45)	6.500	0,45	9.800	4,400
BFL_15	27.4	0,50 (0,30 – 0,70)	140.000	0,70	190.000	82,000
CF_16	1.5	0,25 (0,15 – 0,35)	3.600	0,35	5.100	2,100
BFL_17	60.0	0,50 (0,35 – 0,65)	300.000	1,00	600.000	210,000
NR_18	1.1	0,30 (0,20 – 0,45)	3.200	0,45	4.800	1,500
BFL_19	27.7	0,45 (0,30 – 0,65)	120.000	0,80	220.000	83,000
CN_20	2.9	0,15 (0,05 – 0,20)	4.400	0,20	5.800	1,500
CF_21	3.1	0,25 (0,15 – 0,30)	7.700	0,35	11.000	4,600
BFS_22	16.3	0,45 (0,25 – 0,60)	73.000	0,60	98.000	41,000
NR_23	2.6	0,30 (0,20 – 0,45)	7.700	0,45	12.000	5,100
CN_24	4.2	0,15 (0,05 – 0,20)	6.300	0,20	8.400	2,100
NR_25	5.5	0,30 (0,20 – 0,40)	16.000	0,70	38.000	11,000
BFS_26	59.1	0,45 (0,25 – 0,65)	270.000	0,65	380.000	150,000



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Nome do Trecho	Área do Trecho (ha)	Espessura Média de Rejeito Observada na Margem do Rio (e intervalo) (m)	Método 1 Volume de Rejeito - Dados da Margem (m³)	Média da Espessura de Rejeito nas Planícies de Inundação (m)	Método 2 Volume de Rejeito – Dados das Planícies de Inundação (m³)	Método 3 Volume Mínimo de Rejeitos (m³)
Rio Gualaxo Superior	93.7	0,55 (0,25 – 0,8)	520.000	1,20	1.100.000	240.000
BFL_27	115.1	0,45 (0,25 – 0,65)	520.000	0,80	920.000	290,000
CN_28	4.8	0,25 (0,20 – 0,40)	12.000	0,20	9.600	9,600
BFS_29	29.9	0,45 (0,25 – 0,65)	130.000	0,65	190.000	75,000
CF_30	2.2	0,20 (0,15 – 0,25)	4.400	0,25	5.500	3,300
NR_31	6.2	0,30 (0,20 – 0,40)	19.000	0,40	25.000	12,400
BFS_32	27.8	0,40 (0,20 – 0,55)	110.000	0,65	180.000	56,000
BFS_BL_33	107.4	0,40 (0,20 – 0,55)	430.000	0,65	700.000	210,000
CF_34	4.1	0,20 (0,15 – 0,30)	8.200	0,30	12.000	6,100
BFS_35	98.4	0,35 (0,20 – 0,50)	340.000	0,60	590.000	200,000
CF_36	79.7	0,25 (0,15 – 0,30)	200.000	0,55	440.000	120,000
BFS_37	77.3	0,35 (0,20 – 0,50)	270.000	0,65	500.000	150,000
CF_38	113.6	0,25 (0,10 – 0,40)	280.000	0,65	740.000	110,000
Total Volume			6,100,000		11,200,000	3,191,800

Nota: Alguns números foram arredondados para apresentação. Deste modo pode ser que o total seja diferente da soma dos valores individuais.

BFL = planície de inundação extensa; BFS = planície de inundação pequena; CF = confinado; CN = cânion; NR = estreito.

Para as seções de rio contidas na AEL a partir da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte a montante do Reservatório de Candonga, o volume estimado de rejeitos armazenados baseados nos dados de margens do rio é de aproximadamente 6,1 milhões de metros cúbicos (**Figura 3.5.41 e Tabela 3.5.10**). Considerando que o rompimento da barragem deve ter liberado aproximadamente 43,8 milhões de m³ de água e rejeitos, os depósitos estimados na AEL representam aproximadamente 15% do volume liberado. Considerando o intervalo de valores observado para cada ponto (tipicamente $\pm 50\%$ sobre a média dos valores observados), os dados das margens do rio sugerem que o intervalo dos volumes de rejeitos deve estar entre 3,2 milhões de m³ e 8,9 milhões de m³ baseados nas espessuras máximas e mínimas de rejeitos observados nestas margens. Como exemplo, no trecho de rio BFS_01 o intervalo de espessura de rejeitos observado ao longo das margens estava entre 0,25 m e 0,80 m com um valor médio de 0,55 m. O intervalo de dados observados de espessura de rejeitos depositados nas margens sugerem incertezas nos resultados, associados à ausência de dados de topografia de detalhe anterior ao rompimento.

Uma análise mais aprofundada foi realizada por meio do cálculo do volume de rejeitos depositados usando medições adicionais de espessura de rejeitos, medições estas coletadas em junho de 2016, como parte do programa de geomorfologia, em locais dentro da planície de inundação e a alguma distância do rio. Este programa incluiu um total de 101 sondagens, e seus resultados, com dados de espessura de rejeitos em cada ponto, são apresentados no **Anexo A-2**. Uma segunda estimativa da espessura de rejeitos foi elaborada para cada área de trecho de rio por meio da média dos valores mensurados em campo e por observações feitas no programa de campo de geomorfologia nestas áreas. A combinação destas bases de dados está relacionada na (**Tabela 3.5.10**) – Volumes estimados de rejeitos na bacia de drenagem do Córrego Santarém e em cada trecho fluvial. A partir do cálculo dos dados de medição nas planícies de inundação, o volume total estimado foi de 11,2 milhões de m³ (**Tabela 3.5.10**). Estes resultados sugerem que o volume total de rejeitos depositados pode ser de aproximadamente 25% do volume liberado,



Ao comparar as duas estimativas que diferem por um fator de aproximadamente 2, a menor estimativa de 6,1 milhões de m³ baseia-se em espessuras estratigráficas observadas nas camadas de rejeitos e medidas feitas em campo ao longo das margens dos rios. Espera-se que estes dados possam ser ainda menores do que as medições de profundidade tomadas no âmbito da planície de inundação, uma vez que a inclinação da margem do rio é mais acentuada do que o declive da planície de inundação. Esta mudança na inclinação tipicamente resulta em um afinamento e alongamento de um fluxo viscoso como o fluxo do rejeito depositado, portanto, este resultado é esperado. Além disso, variações nos dados de espessura dos pontos onde dados específicos da espessura de rejeitos foram derivados implica na existência de um certo grau de incerteza devido à variação da elevação do terreno nas planícies de inundação antes do rompimento e da natureza irregular da deposição sobre a planície de inundação após o rompimento. Espera-se que a espessura de rejeitos seja próxima de zero nos limites mais distantes das margens dos rios e mais raso nos terrenos mais inclinados onde a fluidez de rejeitos semi-líquidos era menor. Esta diminuição da espessura de rejeitos próxima a zero na periferia da área impactada e o afinamento da camada no sentido da margem devido a alterações no declive, sugerem que uma estimativa derivada a partir dos dados das planícies de inundação seriam um limite superior.

Dados adicionais e observações da espessura dos rejeitos no leito maior foram coletadas durante a campanha de agosto de 2016. Observações a respeito da espessura do rejeito foram coletadas de perfis erosivos não perturbados e não retrabalhados e poços abertos com cavadeira manual. Essas estimativas baseadas em 55 amostras distribuídas em 7 tipos de trechos de rio foram usadas para correlacionar a disponibilidade dos dados de rejeitos com a espessura média do rejeito em três perfis de medição. Os dados de perfil confirmaram que a espessura usada para estimar os 6,1 Mm³ foram mais representativos da espessura do rejeito observada sobre a planície de inundação. Baseado nestes dados de campo, nós adotamos 6,1 Mm³ como nossa estimativa e consideramos 11,2 Mm³ como um limite superior. A estimativa mínima para o rejeito armazenado é 3,2 Mm³ baseado nos dados disponíveis.

Estimativas preliminares do volume de rejeitos depositados na AEL foi feito pela Samarco, usando uma opção de balanço de massa que considera que o volume de rejeitos depositados deve ser igual ao volume extravasado de Fundão menos o volume armazenado no reservatório de Candonga e menos o volume estimado que transpôs Candonga. As estimativas para a mesma área de estudo (Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce) variam de 10,8 Mm³ em novembro de 2015 para 16,7 Mm³ em fevereiro de 2016 (apresentação Samarco, 20/06/2016) e considera que aproximadamente 10% do sedimento transpassou o reservatório de Candonga. A correspondência entre a estimativa inicial estimada em 10,8 M m³ e a estimativa superior derivada por este estudo de 11,2 Mm³ mostra boa correlação.

Como os rejeitos foram transportados a jusante e fora das planícies de inundação por processos naturais, espera-se que as estimativas de deposição de rejeitos possam variar, mas uma nova acumulação de rejeitos na planície é improvável de ocorrer a menos que o rio transborde além de suas margens e libere mais rejeitos para as planícies (por exemplo, por remobilização de rejeitos de fontes a jusante). Se o rio não tiver as margens inundadas, então não haverá uma via hidráulica que possa transportar os rejeitos em suspensão do rio para as planícies inundáveis.

O cenário mais provável é que o volume global de sedimentos depositados nas planícies de inundação tenha sido reduzido pela erosão promovida pelo escoamento superficial durante a estação chuvosa que se seguiu após o rompimento. Isto sugere que a revisão da estimativa de volume depositado de novembro a fevereiro deve ser tratada com certa cautela. Sugere ainda que uma redução no volume depositado nas planícies de inundação de 10,8 milhões de m³ para 6 milhões de m³ parece razoável pelo mesmo motivo. Assumindo a incerteza dos dados, a estimativa de volume de rejeitos depositadas na AEL da ordem de 6 milhões de m³ durante os levantamentos de campo, pode ter sido de 11 milhões de m³ imediatamente após o rompimento.

As estimativas de volumes calculadas neste estudo não incluem os volumes de rejeitos potencialmente depositados na bacia do Córrego Santarém, na primeira bacia na sequência desta última e os trechos de cânion a jusante e a montante da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte. Esta exclusão deve-se ao fato da bacia do Córrego Santarém não ter sido incluída no levantamento de campo da AEL. Uma estimativa do volume de rejeitos depositado na bacia do Córrego Santarém é apresentada na Seção 3.4.6.3. Este volume estimado também não inclui o volume de material que se acumulou a jusante do



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Reservatório de Candonga. A estimativa do volume de sedimentos depositado no Reservatório de Candonga é de 10,5 milhões de m³ (Samarco, 2016).

Os limites superior, inferior e médio estimados para o armazenamento de rejeitos na AEL estão apresentados na (Figura 3.5.41) em uma distribuição de bacias trecho a trecho. Pode-se ver que a taxa estimada de acúmulo de rejeitos nas planícies de inundação do rio principal decresce a jusante. A taxa de acúmulo corresponderia a uma linha reta se ela fosse constante e a uma linha côncava se ela aumentasse com a distância a jusante. A linha de acúmulo é convexa, indicando um maior acúmulo a montante e uma redução gradual do acúmulo em função da distância a jusante. A linha de acumulação é convexa, indicando maior acumulação a montante e uma gradual redução da acumulação a jusante. Do ponto de vista físico, isto faz sentido quando se considera que a maior deposição em planícies de inundação provavelmente ocorre na extremidade montante da AEL na direção do rompimento, caindo gradualmente para quase zero a jusante da AEL em direção ao oceano.

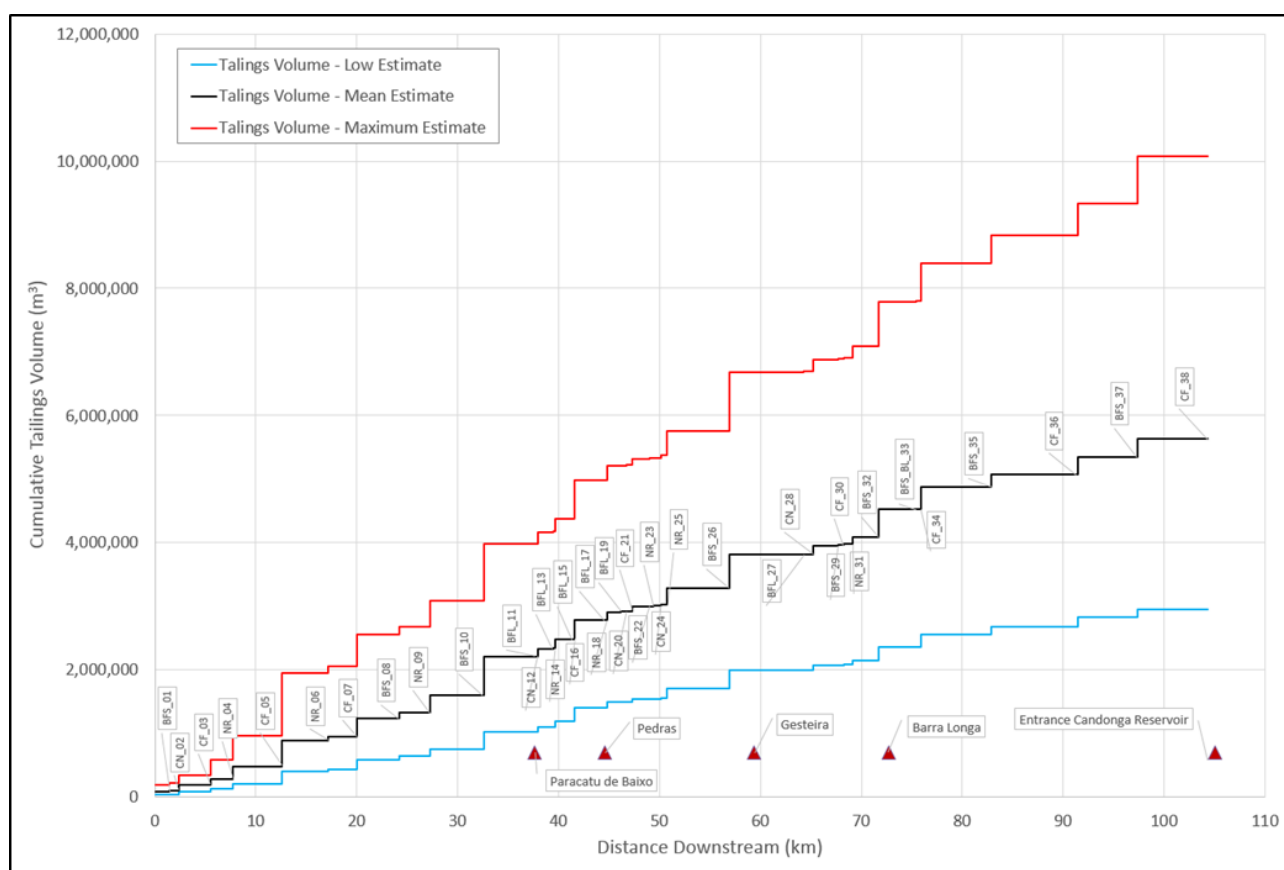


Figura 3.5.41: Volumes acumulados de rejeitos em função da distância a jusante para cada trecho fluvial a partir da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte até o Reservatório de Candonga (principais localidades mostradas em caráter referencial).

3.5.7 Carga de sedimentos

3.5.7.1 Carga de sedimentos de rejeitos a partir dos Sólidos Suspensos Totais

Pode-se derivar uma estimativa da carga de transporte de rejeitos a partir dos dados disponíveis de Sólidos Suspensos Totais (SST) e dos dados hidrométricos disponíveis para o rio principal. Durante o evento de rompimento a estação hidrométrica no Rio Gualaxo do Norte parou de funcionar, limitando assim a análise dos níveis de vazão na AEL. Na ausência de dados hidrométricos locais, foi feita uma análise da carga de sedimentos usando os dados de SST disponíveis, em conjunto com os dados de turbidez e de vazão hidrométrica disponíveis, obtidos em estações hidrométricas próximas e que fazem parte da rede hidrológica



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

da Agência Nacional de Águas (ANA).

Dados de vazão média mensal foram calculados a partir de valores diários de vazão medidos na Estação Fazenda Ocidente (Código de Estação 56337000) no Rio Gualaxo do Norte, e na Estação Acaiaca (Código de Estação 56335001) no Rio do Carmo (**Tabela 3.5.11**). Na estação hidrométrica Fazenda Ocidente, a vazão média mínima durante a estação seca (p.ex., agosto e setembro) é de aproximadamente 7,5 m³/s. Na estação chuvosa, a vazão média aumenta aproximadamente três vezes, para cerca de 22 m³/s. Na estação hidrométrica Acaiaca, a vazão média mínima durante a estação seca é de aproximadamente 18 m³/s. Na estação chuvosa, a vazão média aumenta para aproximadamente 51 m³/s.

Tabela 3.5.11: Descargas médias mensais – Estações Hidrométricas (ANA, Brasil).

Mês	Estação Fazenda Ocidente (Código da Estação: 56337000, Rio Gualaxo do Norte, Área da Bacia: 529 km ²)	Estação Acaiaca (Código da Estação: 56335001, Rio do Carmo. Área da Bacia: 1370 km ²)
	(m ³ /s)	(m ³ /s)
Janeiro	22,3	51,2
Fevereiro	18,0	48,6
Março	16,9	45,2
Abril	12,7	32,5
Mai	10,2	24,7
Junho	9,0	21,7
Julho	8,3	19,7
Agosto	7,6	18,1
Setembro	7,5	17,9
Outubro	8,7	20,5
Novembro	12,7	30,6
Dezembro	19,9	47,8

Também foram obtidas as medições de SST disponíveis nestas estações. Um subconjunto de medições disponíveis foi selecionado para esta análise (**Tabela 3.5.12**). Estes dados selecionados incluem medições no mesmo dia em um período entre 1993 e 1997. A seleção de algumas medições diárias é importante ao comparar dados de TSS devido a sua alta variabilidade. Para comparar adequadamente dados de TSS de diferentes localizações as medições precisam ser tomadas simultaneamente dentro de um curto prazo, e eles devem representar condições fluviais similares (p. ex. condições de inundação, condições de fluxo baixo, ou vazões similares).

Tabela 3.5.12: Medições de SST nas estações Fazenda Ocidente e Acaiaca (1993 a 1997).

Data	Estação Fazenda Ocidente		Estação Acaiaca	
	Hora	SST (mg/l)	Hora	SST (mg/l)
06-05-1993	11:45 AM	25	10:00 AM	85
22-09-1993	9:00 AM	95	10:30 AM	130
17-02-1994	1:00 PM	25	11:00 AM	85
06-07-1994	9:00 AM	20	11:00 AM	80
03-11-1994	1:40 PM	95	3:00 PM	170
24-05-1995	11:30 AM	6	10:00 AM	55



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Data	Estação Fazenda Ocidente		Estação Acaiaca	
	Hora	SST (mg/l)	Hora	SST (mg/l)
31-08-1995	9:00 AM	25	10:30 AM	85
08-02-1996	9:00 AM	30	10:00 AM	95
20-06-1996	11:20 AM	35	1:00 PM	80
10-10-1996	9:00 AM	35	11:00 AM	80
24-07-1997	8:50 AM	30	10:00 AM	70

Fonte: ANA, 2016a. SST = Sedimento Suspenso Total.

A correlação dos níveis de SST entre as duas estações é mostrada na **(Figura 3.5.42)**. Estes dados retratam as condições pré-rompimento. Eles indicam que as duas estações, localizadas nas bacias de drenagem vizinhas do Rio Gualaxo do Norte e do Rio do Carmo, apresentam níveis similares de SST. A análise das bacias em imagens disponíveis sugere que elas drenam paisagens de tipologias similares, estando sujeitas a eventos de precipitação similares, de modo que, em geral, se espera uma similaridade. Em condições naturais, a relação da carga de sedimentos entre as duas estações sugere que a estação Fazenda Ocidente apresente aproximadamente 85% dos valores de SST medidos na estação Acaiaca, tendo como base uma análise de tendência linear. A inclinação da linha desta relação entre as duas estações está abaixo da razão 1:1.

Não foi estabelecida uma relação de ordem superior (p.ex., exponencial, polinomial) devido ao pequeno número de medições de carga de sedimentos disponíveis para análise.

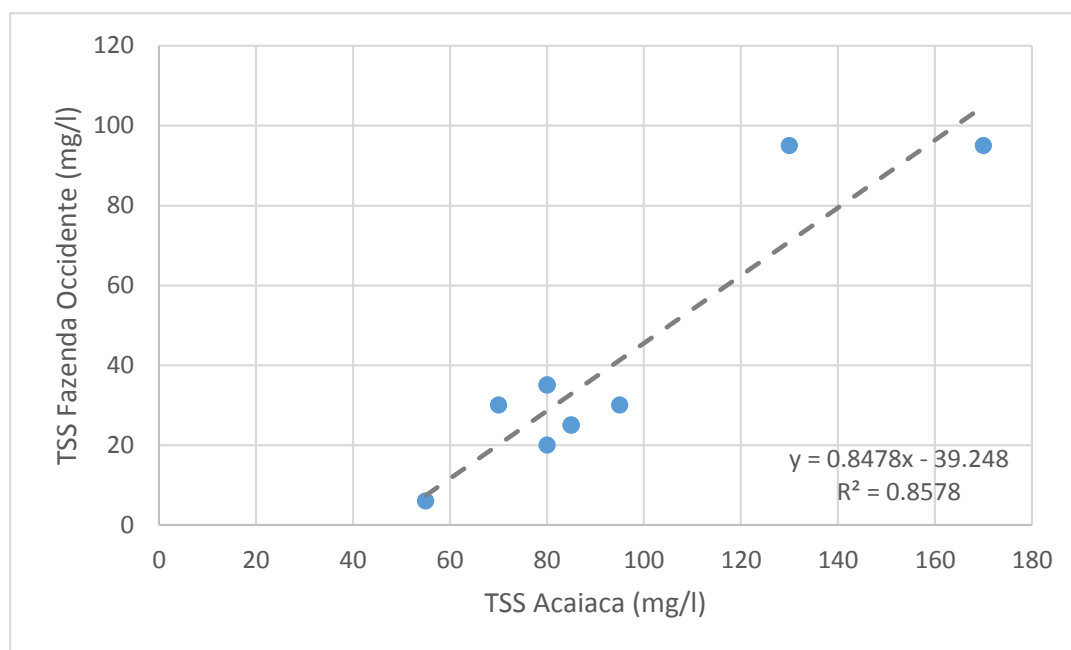


Figura 3.5.42: Correlação de medições de turbidez entre as estações Fazenda Ocidente e Acaiaca, Condições pré-rompimento.

As medições de concentração de sedimentos suspensos (SST) foram coletadas para as condições pós-rompimento nos mesmos locais e em locais adicionais dentro da AEL (**Tabela 3.5.13**); entretanto, não havia valores de vazão associados a estas medições disponíveis para análise. Estas medições de SST incluem tanto a carga de lavagem e carga suspensa, mas não a carga do leito.



Tabela 3.5.13: Medição de Carga de Sedimentos Pós-Rompimento.

Local	Ponto de Amostragem	Data	Sedimento Suspenso Total (mg/l)	
Barra Longa	Barra Longa-MG-Montante Coordenadas UTM 23 Leste: 701975 Norte: 7755676 Nota: localizado imediatamente a jusante da Estação Fazenda Ocidente	12-11-2015	579	
		19-11-2015	693	
		25-11-2015	6784	
		27-11-2015	1292	
		09-12-2015	1816	
		11-12-2015	716	
		Barra Longa-MG-Ponte do Rio Carmo Coordenadas UTM 23 Leste: 703132 Norte: 7755131 Nota: localizada a montante do Rio Gualaxo do Norte confluência com Rio Carmo, ponte da rodovia MG-326	12-11-2015	652
	19-11-2015		278	
	25-11-2015		1062	
	27-11-2015		400	
	09-12-2015		242	
	11-12-2015		114	
	Tributários		Rio do Carmo-MG-Montante Coordenadas UTM 23 Leste: 701975 Norte: 7755676 Nota: localizada na cidade de Acaiaca	01-12-2015
		08-12-2015		285
28-12-2015		11		
05-01-2016		23,5		
12-01-2016		84,5		
19-01-2016		78		

Vários fatores influenciam diretamente os níveis de SST em um rio em um determinado ponto para a mesma vazão:

- Época do ano em que a carga de sedimento é medida. Na estação chuvosa, geralmente a carga de sedimentos é maior em função das chuvas frequentes, que mantêm o solo molhado e saturado, facilitando assim a mobilização de partículas do solo pelo escoamento superficial;
- Durante eventos singulares de inundação, o momento da medição: antes ou depois do pico de vazão. A carga de sedimentos é maior durante a parte ascendente do hidrográfico e menor na sua parte descendente; isto é, o relacionamento não é linear, formando um circuito fechado;
- Erosão localizada no canal principal, o que pode aumentar a carga de sedimentos por um curto período, até que o rio alcance um novo equilíbrio.

Considerando-se os fatores acima mencionados, é importante, para fins de comparação, selecionar dados de SST que tenham sido medidos em um curto intervalo de tempo e sob condições hidrológicas e sedimentológicas similares. Uma vez que as medições em Acaiaca foram feitas em datas diferentes das medições próximas à Fazenda Ocidente em Barra Longa, a análise para as condições pós-rompimento foi realizada usando medições de SST feitas mais a jusante no Rio do Carmo, próximo a Barra Longa, para as quais se pôde estabelecer uma similaridade maior nas épocas de amostragem.

A correlação de SST entre as duas estações para as condições pós-rompimento (**Figura 3.5.43**) indica que a carga de sedimentos (combinada carga de lavagem e carga suspensa) medida na estação Fazenda Ocidente corresponde a aproximadamente 660% dos valores medidos na estação Acaiaca. Isto representa um aumento de aproximadamente sete vezes quando comparado com as condições pré-rompimento (660% vs 85%), A inclinação da linha da relação entre as duas estações está acima da razão 1:1 (**Figura 3.5.44**).



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

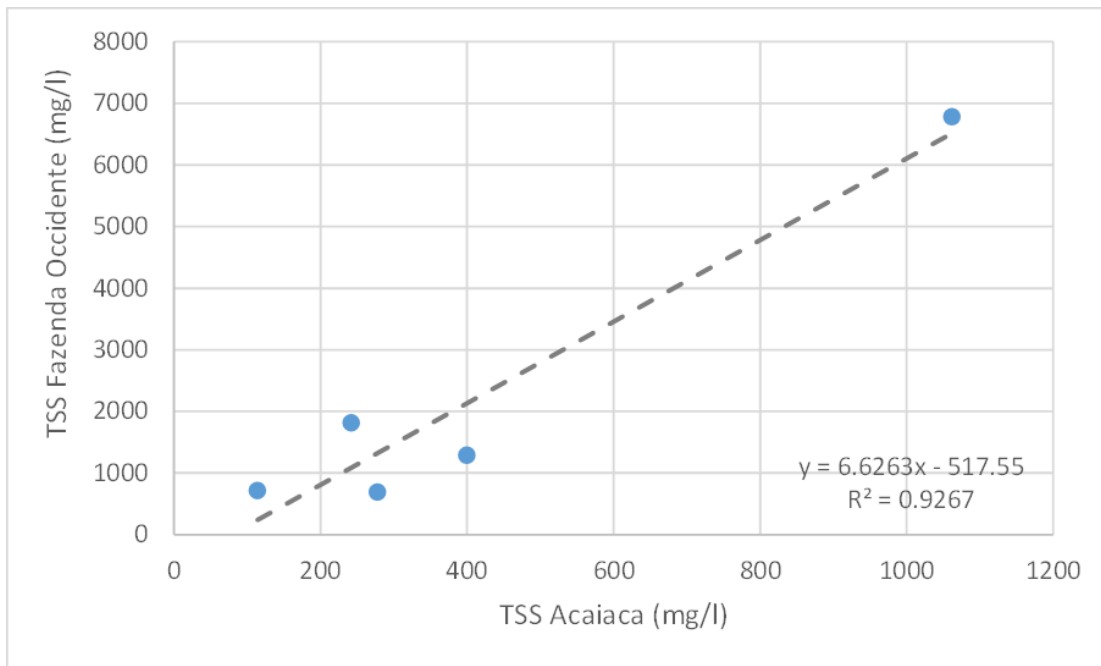


Figura 3.5.43: Correlação de medições de turbidez entre as estações Fazenda Ocidente e Acaiaca, Condições pós-rompimento. Legenda: SST = Sedimento Suspenso Total.

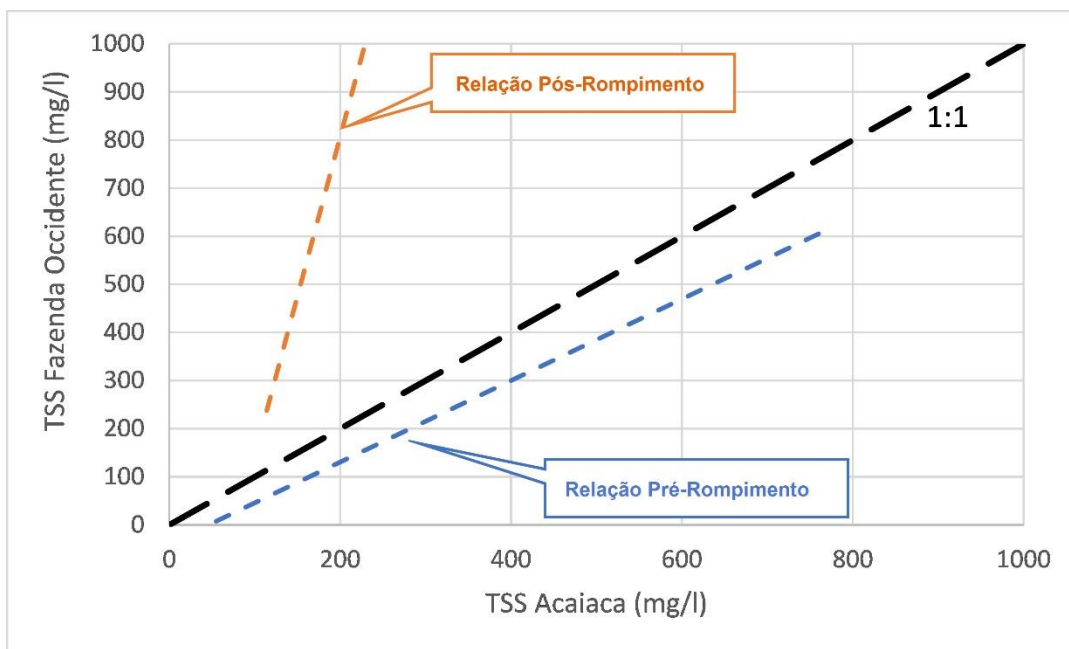


Figura 3.5.44: Relação da carga de sedimentos antes e após o rompimento entre as estações Fazenda Ocidente e Acaiaca. Legenda: SST = Sedimento Suspenso Total.

A análise dos dados de SST é um indicativo de que as cargas suspensas no rio principal na AEL aumentaram em relação às condições pré-rompimento. O aumento estimado de sete vezes nos níveis de SST pode ser usado para estimar um aumento na carga em suspensão em relação às condições de referência naturais usando a modelagem baseada no tamanho da bacia apresentada na Seção 3.5.7.1. Aplicando-se a estimativa do valor da carga em suspensão natural de 280.000 toneladas/ano (Seção 3.4.7.2; Tabela 3.5.11) e uma



densidade de 2,5 toneladas/m³, então um aumento de sete vezes na carga em suspensão seria de aproximadamente 780.000 m³/ano.

3.5.7.2 Carga de sedimento regional

Foi feita uma estimativa da carga de sedimento natural regional usando o modelo de transporte de sedimentos BQART de Syvitski e Milliman (2007), que foi desenvolvido para bacias hidrográficas ao redor do globo. O modelo BQART deriva uma estimativa da geração de sedimento anual na bacia hidrográfica com base em uma combinação de vazão anual média (Q), área da bacia de drenagem (A), relevo da bacia de drenagem (relação entre ponto mais elevado e ponto mais baixo, R) e a temperatura média anual (T). O parâmetro “B” é um termo empírico derivado de uma combinação de geologia do leito rochoso, extensão de glaciação (se houver, 0 se não houver geleiras nas proximidades), mudanças no uso da terra e a presença de reservatórios como áreas de armazenamento de sedimentos. A fórmula para o modelo BQART é:

$$\text{Carga Anual de Sedimentos (t/yr)} = B \cdot Q \cdot A \cdot R \cdot T$$

Os valores selecionados para cada um dos parâmetros geológicos e de uso da terra no modelo são resumidos na **Tabela 3.5.14**.

Tabela 3.5.14: Resumo dos parâmetros do modelo BQART representando a geologia e o uso da terra.

Parâmetro	Valor	Notas
B	Variável	Derivado de $B = IL(1-Te)Eh$
I	Variável	Derivado de $1+0,09Ag$
Ag	0	Área glacial igual a 0 porque não existe tais áreas na área de estudo
L	1	Materiais de leito rochoso vulcânico e carbonatos combinados, valor derivado da classificação de Syvitski e Milliman (2007)
Te	0	Eficiência de captura dos reservatórios = 0 (não há nenhum na AEL)
Eh	1	Uso misto da terra, valor derivado da classificação de Syvitski e Milliman (2007)

Uma estimativa BQART de carga de sedimentos foi calculada para três locais na AEL: (1) no limite superior da AEL (na confluência do Córrego Santarém e Rio Gualaxo do Norte), (2) na extremidade inferior de NR_09 e (3) na confluência do rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo próximo a Barra Longa a jusante de BFS_32. Os parâmetros de entrada e saída para a análise do modelo BQART são apresentados na **Tabela 3.5.15**.

Tabela 3.5.15: Parâmetros do Modelo BQART.

TAXASParâmetro	Montante da AEL	Jusante de NR_09	Jusante de BFS_32	Reservatório Candonga
B (fatores geológicos e humanos)	1	1	1	1
Q (descarga fluvial, km ³ /ano)	0,1577	0,2523	0,4037	4.43
A (área da bacia de drenagem, km ²)	169,0	266,8	561,7	8917
R (diferença em elevação, km)	0,976	1,122	1,292	1.375
T (temperatura média anual, °C)	20,0	22,5	22,5	22.5
w (constante para unidades de MT)	0,0006	0,0006	0,0006	0.0006
BQART (carga do leito e suspensão, tonelada/ano)	86.000	160.000	310.000	2,800,000
BQART (somente carga	1	1	1	1



TAXASParâmetro	Montante da AEL	Jusante de NR_09	Jusante de BFS_32	Reservatório Candonga
suspensa, t./ano)				
BQART Anual (somente carga suspensa, t/ha	4.43	4.43	4.43	4.43
BQART carga re-calibrada tonelada/ano	8917	8917	8917	8917

Os resultados do modelo BQART mostram a carga total de sedimento natural, incluindo a carga em suspensão e a carga no leito. Para esta análise, pressupôs-se que 90% da carga de sedimento total estarão em suspensão e, por conseguinte, calculou-se uma estimativa de carga suspensa tomando 90% da carga total prevista pelo modelo BQART.

Os resultados mostram que o volume total de carga de sedimentos naturais liberados em um ano aumenta com a área da bacia e com a distância a jusante, de 86.000 t/ano em Bento Rodrigues para 310.000 t/ano na foz do Rio Gualaxo do Norte. Trabalhos anteriores realizados por CPRM (2016) sugerem que a carga total em Candonga é de 1,2 milhões de t/ano. Uma estimativa da carga de sedimento usando BQART foi feita no rio em Candonga a fim de fornecer um ponto de calibração na carga de sedimentos dos rios brasileiros. A estimativa de 2,8 Mta derivado do modelo BQART pode ser empregada a partir deste ponto. Se a classificação litológica é reduzida a 0,5 no lugar de 1, então o resultado predito é 1,4 Mta de carga total e 1,2 Mta de sólidos suspensos, o que mostra bastante similaridade com a estimativa de CPRM. A estimativa da carga de sedimentos revisada usando o modelo BQART calibrado encontra-se na **Tabela 3.5.15**. Essas estimativas deveriam ainda ser tratadas com alguma cautela já que a calibração está em um único ponto. Pontos de calibração adicionais seriam requeridos para avaliar se há uma variação com a área de drenagem, uso do solo e outros fatores. De toda forma, como uma primeira aproximação, o modelo parece ser razoável para estimar a carga de sedimento da AEL.

3.5.7.3 Carga estimada de rejeitos das planícies de inundação

Na ausência de medições diretas da potencial erosão dos sedimentos dos rejeitos expostos, uma estimativa da descarga anual de rejeitos no rio principal a partir de depósitos em áreas de planície de inundação foi calculada usando a Equação Universal Revisada de Perda de Solo (RUSLE2). A equação de perda de solo é geralmente usada para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas. Tendo em vista que os depósitos de rejeitos recobrem uma extensa área que foram devegetados em função da passagem dos rejeitos e tem espessura de 0,3 m ou mais, o fornecimento de rejeitos para a proposta de erosão pela chuva foi considerado ilimitado na análise. Portanto, o volume atual de perdas de rejeito poderia se esperado a aproximar-se de perdas potenciais estimados, e os resultados de RUSLE2 poderia ser considerado conservador.

Baseando-se na granulometria dos depósitos de rejeitos (Golder 2016g), o rejeito depositado na planície de inundação tem granulometria similar aos solos aluviais nativos da planície. A partir desta similaridade, os rejeitos podem ser considerados similares aos solos agrícolas frente à chuva. Levando-se em conta as observações de campo em relação aos sulcos desenvolvidos na superfície do rejeito, eles serão facilmente erodidos se expostos à precipitação.

A aplicação de RUSLE2 fornece parametrização do fator K (erosividade do solo) para solos desde argilas-coloidais até areias não coloidais. A gradação do rejeito se encaixa na mais fina granulometria do intervalo de aplicação. A média anual de perda de solo é dada pela seguinte equação:

$$\text{Média Anual de Perda de Solo (t/ha/ano)} = R * K * L * S * C * P$$

Portanto, os parâmetros no modelo RUSLE2 foram selecionados como se segue:

- Fator R – derivado da estimativa de precipitação anual para a região (Cooper, 2001; Golder, 2016c);



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

- Fator K – derivado de estimativas do fator K para siltes não coloidais (Renard et al, 1997) baseado na avaliação dos dados de tamanho dos grãos dos rejeitos;
- Fator LS – derivado de medições GIS do comprimento do declive da planície de inundação (Renard et al, 1997);
- Fator C – derivado de estimativas da efetividade da cobertura (Haan et al, 1994); e,
- Fator P – Um valor entre 0 e 1 para descrever o efeito das práticas de uso da terra para reduzir a erosão, um valor de 1 representa nenhuma redução na erosão (Renard et al, 1997).

As estimativas de precipitação anual para a região foram obtidas a partir de relatórios hidrológicos disponíveis (Golder, 2016c). A precipitação é espacialmente variável em toda a região, dependendo da proximidade com as cabeceiras de drenagem da bacia. Os valores atribuídos aos fatores K e C foram obtidos a partir de valores publicados para a equação RUSLE2 (Haan et al. 1994; Renard et al. 1997; Cooper 2001). A partir dos dados disponíveis, foram desenvolvidas as estimativas RUSLE2 de volumes anuais de rejeitos erodidos. Estas estimativas são apresentadas na **Tabela 3.5.16**. Para fins de estimativa a carga anual de rejeitos no rio, considerou-se que todo o volume de material estimado como passível de erosão na planície de inundação chegaria ao rio.

Tabela 3.5.16: Taxas estimadas de erosão de rejeitos para a bacia de drenagem Santarém e para cada trecho de rio.

Nome do Trecho	Fator R	Fator K	Fator LS	Fator C			Fator P	Taxa de Erosão (t/ha/ano)		
				Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas		Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas
Santarém	370	0,4	0,60	1,0	0,013	0,003	1,0	219,4	2,9	0,7
Rio Gualaxo do Norte Superior	370	0,4	0,62	1,0	0,013	0,003	1,0	226,6	2,9	0,7
BFS_01	370	0,4	0,62	1,0	0,013	0,003	1,0	226,6	2,9	0,7
CN_02	370	0,4	0,63	1,0	0,013	0,003	1,0	230,2	3,0	0,7
CF_03	370	0,4	1,15	1,0	0,013	0,003	1,0	420,2	5,5	1,3
NR_04	370	0,4	1,10	1,0	0,013	0,003	1,0	402,0	5,2	1,2
CF_05	370	0,4	1,40	1,0	0,013	0,003	1,0	511,6	6,7	1,5
NR_06	370	0,4	0,58	1,0	0,013	0,003	1,0	211,9	2,8	0,6
CF_07	370	0,4	1,00	1,0	0,013	0,003	1,0	365,4	4,8	1,1
BFS_08	370	0,4	0,91	1,0	0,013	0,003	1,0	332,5	4,3	1,0
NR_09	370	0,4	0,55	1,0	0,013	0,003	1,0	201,0	2,6	0,6
BFS_10	370	0,4	1,00	1,0	0,013	0,003	1,0	365,4	4,8	1,1
BFL_11	277	0,4	0,75	1,0	0,013	0,003	1,0	205,3	2,7	0,6
CN_12	277	0,4	1,47	1,0	0,013	0,003	1,0	402,3	5,2	1,2
BFL_13	277	0,4	0,72	1,0	0,013	0,003	1,0	197,0	2,6	0,6
NR_14	277	0,4	1,40	1,0	0,013	0,003	1,0	383,1	5,0	1,1
BFL_15	277	0,4	1,24	1,0	0,013	0,003	1,0	339,4	4,4	1,0
CF_16	277	0,4	1,25	1,0	0,013	0,003	1,0	342,1	4,4	1,0
BFL_17	277	0,4	0,75	1,0	0,013	0,003	1,0	205,3	2,7	0,6
NR_18	277	0,4	2,19	1,0	0,013	0,003	1,0	599,3	7,8	1,8



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Nome do Trecho	Fator R	Fator K	Fator LS	Fator C			Fator P	Taxa de Erosão (t/ha/ano)		
				Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas		Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas
BFL_19	277	0,4	0,58	1,0	0,013	0,003	1,0	158,7	2,1	0,5
CN_20	277	0,4	1,80	1,0	0,013	0,003	1,0	492,6	6,4	1,5
CF_21	277	0,4	1,07	1,0	0,013	0,003	1,0	292,8	3,8	0,9
BFS_22	277	0,4	1,50	1,0	0,013	0,003	1,0	410,5	5,3	1,2
NR_23	277	0,4	1,30	1,0	0,013	0,003	1,0	355,8	4,6	1,1
CN_24	277	0,4	2,20	1,0	0,013	0,003	1,0	602,1	7,8	1,8
NR_25	277	0,4	0,78	1,0	0,013	0,003	1,0	213,5	2,8	0,6
BFS_26	277	0,4	0,87	1,0	0,013	0,003	1,0	238,1	3,1	0,7
BFL_27	277	0,4	0,57	1,0	0,013	0,003	1,0	156,0	2,0	0,5
CN_28	277	0,4	1,27	1,0	0,013	0,003	1,0	347,6	4,5	1,0
BFS_29	277	0,4	0,72	1,0	0,013	0,003	1,0	197,0	2,6	0,6
CF_30	277	0,4	1,65	1,0	0,013	0,003	1,0	451,6	5,9	1,4
NR_31	277	0,4	1,75	1,0	0,013	0,003	1,0	478,9	6,2	1,4
BFS_32	277	0,4	1,00	1,0	0,013	0,003	1,0	273,7	3,6	0,8
BFS_BL_33	277	0,4	0,88	1,0	0,013	0,003	1,0	240,8	3,1	0,7
CF_34	277	0,4	1,15	1,0	0,013	0,003	1,0	314,7	4,1	0,9
BFS_35	277	0,4	1,05	1,0	0,013	0,003	1,0	287,4	3,7	0,9
CF_36	277	0,4	1,16	1,0	0,013	0,003	1,0	317,5	4,1	1,0
BFS_37	277	0,4	0,85	1,0	0,013	0,003	1,0	232,6	3,0	0,7
CF_38	277	0,4	0,90	1,0	0,013	0,003	1,0	246,3	3,2	0,7

BFL = largo com planície de inundação grande; BFS = largo com pequena planície de inundação; CF = confinado; CN = cânion; NR = estreito.

A **Tabela 3.5.16** mostra que pode haver uma redução significativa na descarga de rejeitos das planícies de inundação para o rio mediante a recuperação da vegetação nas planícies de inundação. O fator de redução, uma vez que a cobertura florestal seja recuperada, é de aproximadamente 300 vezes quando comparado com solos expostos. Se a cobertura de gramíneas puder ser reestabelecida, a redução é de aproximadamente 100 vezes quando comparado com solos expostos. Enquanto esses dados estão baseados em situações idealizadas e fatores de entrada no modelo que não foram inteiramente calibrados às condições locais e regionais específicas, os resultados indicam que a revegetação do rejeito pode reduzir significativamente a produção de sólidos em suspensão do leito maior impactado.

Usando a taxa de erosão estimada para cada trecho fluvial, derivou-se um volume anual de erosão usando as áreas calculadas de cada trecho (**Tabela 3.5.17**). Os dados indicam que os trechos com maiores volumes anuais de erosão estão localizados no segmento superior da AEL, desde o trecho BFS_01 até o trecho BFL_11, e nos trechos localizados a jusante de Barra Longa.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tabela 3.5.17: Taxas estimadas de erosão de rejeitos para a bacia de drenagem Santarém, para cada trecho de rio.

Nome do Trecho	Área do Trecho (m ²)	Taxa de Erosão (t/ha/ano)			Taxa de Erosão (m ³ /ano)		
		Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas	Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas
Santarém	796.695	219,4	2,9	0,7	17,482	227	52
Rio Gualaxo do Norte Superior	937.473	226,6	2,9	0,7	21.240	276	64
BFS_01	165.000	226,6	2,9	0,7	3.738	49	11
CN_02	47.396	230,2	3,0	0,7	1,091	14	3
CF_03	262.586	420,2	5,5	1,3	11.035	143	33
NR_04	244.616	402,0	5,2	1,2	9.833	128	29
CF_05	490.898	511,6	6,7	1,5	25.114	326	75
NR_06	996.296	211,9	2,8	0,6	21.116	275	63
CF_07	189.781	365,4	4,8	1,1	6.935	90	21
BFS_08	628.765	332,5	4,3	1,0	20.909	272	63
NR_09	252.698	201,0	2,6	0,6	5.079	66	15
BFS_10	548.485	365,4	4,8	1,1	20.043	261	60
BFL_11	1.112.322	205,3	2,7	0,6	22.831	297	68
CN_12	11.485	402,3	5,2	1,2	462	6	1
BFL_13	246.585	197,0	2,6	0,6	4.859	63	15
NR_14	21.738	383,1	5,0	1,1	833	11	2
BFL_15	273.769	339,4	4,4	1,0	9.290	121	28
CF_16	14.545	342,1	4,4	1,0	498	6	1
BFL_17	599.986	205,3	2,7	0,6	12.315	160	37
NR_18	10.608	599,3	7,8	1,8	636	8	2
BFL_19	276.961	158,7	2,1	0,5	4.396	57	13
CN_20	29.176	492,6	6,4	1,5	1.437	19	4
CF_21	30.646	292,8	3,8	0,9	897	12	3
BFS_22	162.694	410,5	5,3	1,2	6.679	87	20
NR_23	25.790	355,8	4,6	1,1	918	12	3
CN_24	42.109	602,1	7,8	1,8	2.535	33	8
NR_25	54.783	213,5	2,8	0,6	1.169	15	4
BFS_26	591.029	238,1	3,1	0,7	14.072	183	42
BFL_27	1.151.445	156,0	2,0	0,5	17.962	234	54
CN_28	47.819	347,6	4,5	1,0	1.662	22	5
BFS_29	299.386	197,0	2,6	0,6	5.899	77	18
CF_30	22.160	451,6	5,9	1,4	1.001	13	3
NR_31	62.060	478,9	6,2	1,4	2.972	39	9
BFS_32	277.863	273,7	3,6	0,8	7.604	99	23



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Nome do Trecho	Área do Trecho (m ²)	Taxa de Erosão (t/ha/ano)			Taxa de Erosão (m ³ /ano)		
		Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas	Terra Nua	Pastagens e Campos	Florestas
BFS_BL_33	1.073.628	240,8	3,1	0,7	25.856	336	78
CF_34	40.784	314,7	4,1	0,9	1.284	17	4
BFS_35	984.037	287,4	3,7	0,9	28.277	368	85
CF_36	797.353	317,5	4,1	1,0	25.313	329	76
BFS_37	773.285	232,6	3,0	0,7	17.988	234	54
CF_38	1.135.558	246,3	3,2	0,7	27.969	364	84
Total Volume					411.228	5.346	1.234

Nota: Alguns valores foram arredondados para fins de apresentação. Portanto, pode aparecer que os totais não são iguais à soma dos valores individuais.

t/ha-ano = toneladas por hectare ao ano.

BFL = largo com planície de inundação grande; BFS = largo com pequena planície de inundação; CF = confinado; CN = cânion; NR = estreito.

O efeito da revegetação das planícies de inundação reduz a carga anual de rejeitos para o rio de aproximadamente 410.000 m³/ano (261 t/ha) a 5.300 m³/ano (3,4 t/ha) para cobertura de gramíneas e 1.200 m³/ano (0,8 t/ha) para cobertura florestal. Foi elaborada uma estimativa da carga de sedimentos provenientes de pastagens naturais e florestas e nas condições de vegetação. Para estes cálculos, o fator K foi alterado para representar silte aluvial e areias finas (0,25). Os demais parâmetros permaneceram constantes. Uma vez que a equação RUSLE2 é multiplicativa, a alteração do fator K essencialmente reduz o volume de sedimento para um determinado trecho por um fator de aproximadamente 1,6. Assim, pode-se considerar cargas naturais ao longo do rio principal da ordem de 257.000 m³/ano (163 t/ha) para toda a terra nua, 3.300 m³/ano (2,1 t/ha) para toda a cobertura de gramínea e 770 m³/ano (0,5 t/ha) para toda a cobertura florestal.

Uma estimativa de erosão natural de sedimento para esta região do Brasil é de 1,6 t/ha/ano, com base em dados experimentais disponíveis (ANA, 2016b). Usando este valor estimado para erosão natural, pode-se fazer uma estimativa da taxa de erosão natural das planícies de inundação na AEL. A estimativa pressupõe que esta taxa de erosão é constante nas planícies de inundação da AEL. O somatório de todas as áreas de trechos fluviais de planícies de inundação na AEL, onde a planície de inundação foi afetada pelos rejeitos, resulta em uma área de aproximadamente 1.493 ha. Pressupondo-se uma densidade de sedimento de 2,5 t/m³ para sedimentos naturais de planície de inundação, então a estimativa do volume anual total de sedimentos naturais carregados para o rio é de aproximadamente 955 m³/ano. Este valor é comparável com o valor de 750 m³/ano mencionado no parágrafo anterior para pastagens naturais e floresta. Essa análise ilustra que a revegetação do rejeito tem o potencial para reduzir em muito a fonte de sedimentos do rejeito exposto (163 t/ha-a), descendo para alguma coisa similar à produção de sedimentos regional apenas com a cobertura de gramíneas (2,1 t/ha-a versus 1,6 t/ha-a). O reestabelecimento de floresta tem o potencial de reduzir a produção de sedimentos abaixo da estimativa regional.

No caso dos trechos dos rios localizados no segmento superior da AEL, a causa provável do elevado volume de deposição de rejeitos é o efeito da inferida condição de remanso a montante da primeira seção de cânion, resultando no represamento de água e rejeito rio acima. Este represamento resultou, relativamente, em altas taxas de deposição comparadas a outros trechos de rio, conduzindo geralmente a camadas mais espessas de rejeito nos trechos a montante do primeiro trecho de cânion (CN-02). Para aqueles trechos a jusante de Barra Longa, onde grandes volumes de depósitos de rejeitos ocorrem parecem estar atribuídos a mais extensos trechos de canal e geralmente planícies mais amplas de tal forma que camadas de rejeitos mais finas resultam em grandes volumes de rejeito. Este resultado é esperado com a mudança no tamanho do rio



e área de drenagem (por exemplo, maior a jusante) e dos observados controles morfológicos de comprimento e largura, resultando em alcances mais longos e planícies inundáveis mais amplas. O gráfico cumulativo apresentado na (Figura 3.5.41) dá suporte a esta interpretação.

3.5.8 Bacia do Córrego Santarém

Uma análise preliminar da bacia de drenagem do Córrego Santarém, entre o dique S3 e a confluência com o Rio Gualaxo do Norte, foi realizada em ambiente de escritório, pois, embora esta área esteja contida na AEL, ela foi incluída na área de estudo somente após a realização dos levantamentos de campo. Esta área se situa imediatamente a montante da AEL e da AER. Nesta área o canal do Córrego Santarém foi delineado para as condições pré e pós-rompimento para avaliar as mudanças no canal após o fluxo de rejeitos e para considerar os efeitos potenciais na AEL dos impactos do fluxo de detritos e rejeitos sobre o Córrego Santarém. A delimitação do canal ativo pré e pós-rompimento está apresentado no **Anexo A-4**.

3.5.8.1 Migração do canal

Foram extraídos três perfis de seção transversal para o Córrego Santarém dentro da área da bacia de drenagem do Córrego Santarém (Figura 3.5.45) e a geometria do canal principal (a largura do leito menor) foi avaliada para as condições pré e pós-rompimento (Tabela 3.5.18). O delineamento do canal ativo pré-rompimento e pós-rompimento são apresentados no **Anexo A-4**.

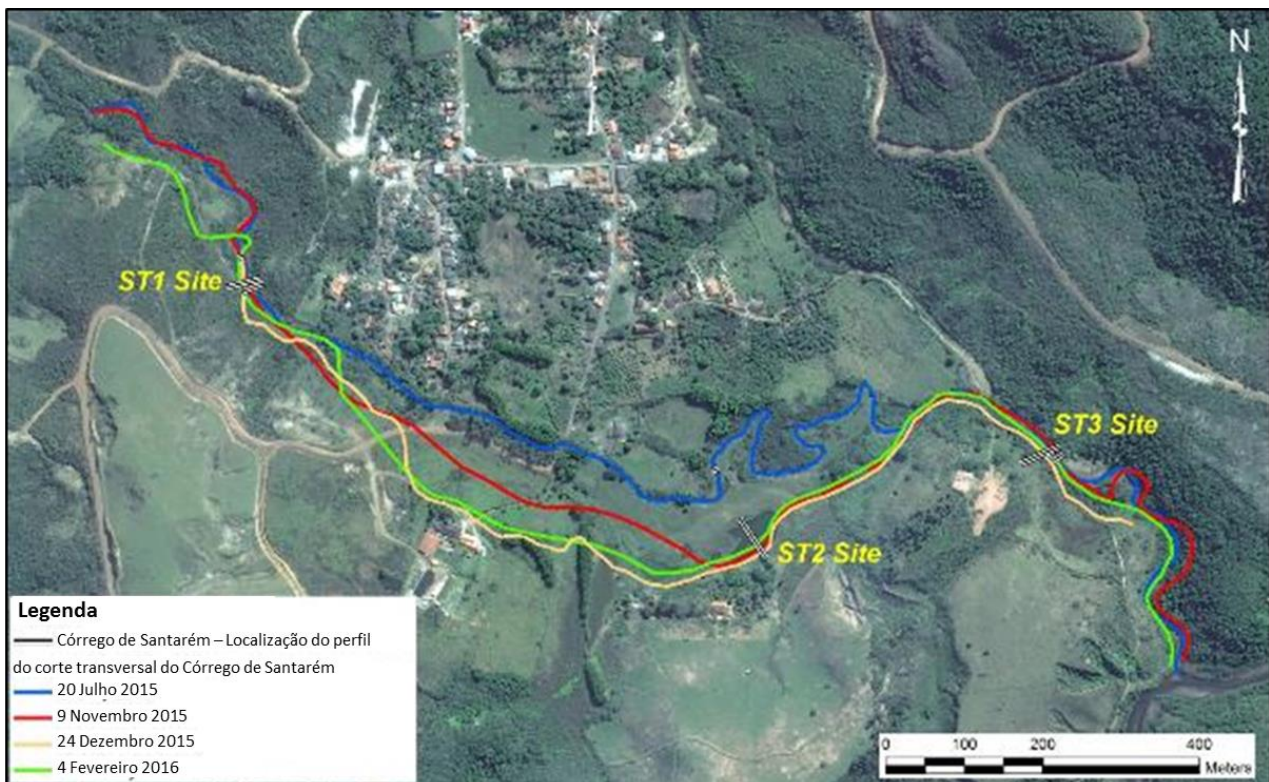


Figura 3.5.45: Localização dos perfis de seções transversais na bacia de drenagem do Córrego Santarém.

Antes do rompimento da barragem de rejeitos, o Córrego Santarém fluía por uma planície de inundação relativamente larga, com largura entre 140 e 180 m, tendo como base imagens pré-rompimento. Inferiu-se a extensão da planície de inundação a partir de uma combinação de renderização 3-D da topografia e de



mudanças na textura e cor da vegetação em imagens disponíveis. Nesta planície de inundação, o córrego apresentava uma grande sinuosidade, que se caracteriza pela razão entre o comprimento do canal e o comprimento do vale. O coeficiente de sinuosidade pré-rompimento era de aproximadamente 2. A largura do leito menor variava entre 7 m e 9 m a montante da confluência de Ouro Fino, e aproximadamente 12 m a jusante da confluência. As margens pareciam conter vegetação ciliar ao longo de todo o comprimento.

Tabela 3.5.18: Larguras de Leito menor do Córrego Santarém.

Localização	Área ID	Largura do Leito menor (20 Julho 2015 ^a)	Largura do Leito menor 9 de Novembro de 2015 ^b	Largura do Leito menor 4 de Fevereiro de 2016 ^c
Córrego Santarém a jusante do dique S3	ST1	7,1 m	Canal natural destruído pelo fluxo de detritos e rejeitos, O novo canal é mais largo e se desenvolveu em materiais de rejeito, com uma largura do leito menor de 29,6 m e uma largura molhada de 15 m.	O canal evoluiu nos materiais de rejeito para uma largura do leito menor de 32,2 m e uma largura molhada de 15 m.
Córrego Santarém ao sul de Bento Rodrigues	ST2	8,8 m	Canal natural destruído pelo fluxo de detritos e rejeitos, O novo canal é mais largo, com uma largura do leito menor de 58,7 m e uma largura molhada de 15,5 m.	O canal evoluiu nos materiais de rejeito para uma largura do leito menor de 34,6 m e uma largura molhada de aproximadamente 14,5 m.
Córrego Santarém a jusante da confluência Ouro Fino	ST3	11,8 m	Canal natural destruído pelo fluxo de detritos e rejeitos. O novo canal é mais largo, com uma largura do leito menor/ largura molhada de 14,3 m.	O canal evoluiu nos materiais de rejeito para uma largura do leito menor de 29 m e uma largura molhada de 17,3 m.

Nota: a) Largura do leito menor medida a partir de imagens de satélite para as condições pré-rompimento.

b) Largura do leito menor medida a partir de imagens de satélite para as condições pós-rompimento.

c) Largura do leito menor medida a partir do modelo digital de elevação LIDAR, levantada em 4 de fevereiro de 2016.

Após o rompimento, o canal natural desapareceu e a planície de inundação ficou coberta de rejeitos. Um novo canal se desenvolveu nos rejeitos na planície de inundação, mais provavelmente em uma área consistente com a planície de inundação original, porém erodido em áreas cobertas pelos rejeitos. O novo canal está atualmente 80 m a 100 m afastado do alinhamento anterior (**Figura 3.5.45**) e, tendo como base as imagens disponíveis à época da avaliação, ainda está se deslocando e apresenta instabilidade devido à natureza dos materiais não consolidados que formam suas margens. A nova largura do leito menor do canal representa uma mudança significativa (**Figura 3.5.46**), tendo aumentado mais de duas vezes quando comparada com a largura molhada inferida a partir das imagens disponíveis. O canal não foi visitado pela equipe de campo e as estimativas relativas ao novo canal foram feitas usando imagens de dezembro de 2015, quando o novo canal ainda apresentava mobilidade e criava seu próprio novo talvegue. Uma comparação entre a (**Figura 3.5.47**) e a (**Figura 3.5.48**) mostra que impacto do fluxo de detritos sobre o Córrego Santarém resultou em um alargamento do canal significativamente maior quando comparado com os dados de largura do leito menor da AEL. Isto era esperado, uma vez que o Córrego Santarém provavelmente sofreu uma descarga de detritos menos atenuada do que os trechos do rio principal dentro da AEL.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

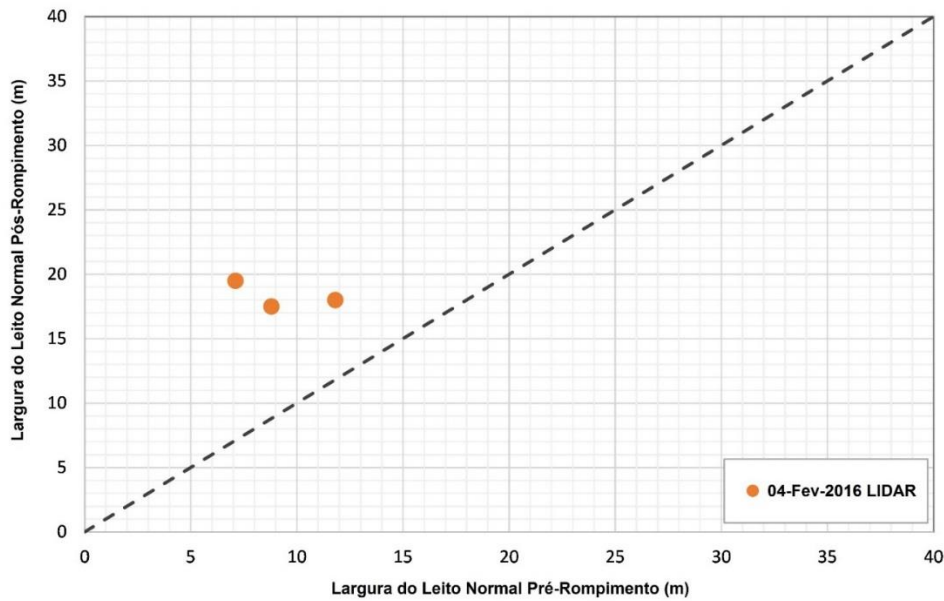


Figura 3.5.46: Variações na Largura do Leito menor do Córrego Santarém antes e após o rompimento.

A **Figura 3.5.47** e a **Figura 3.5.48** mostram o alinhamento do canal nas condições pré-rompimento e nas condições pós-rompimento para diferentes datas, tendo como base as imagens disponíveis.

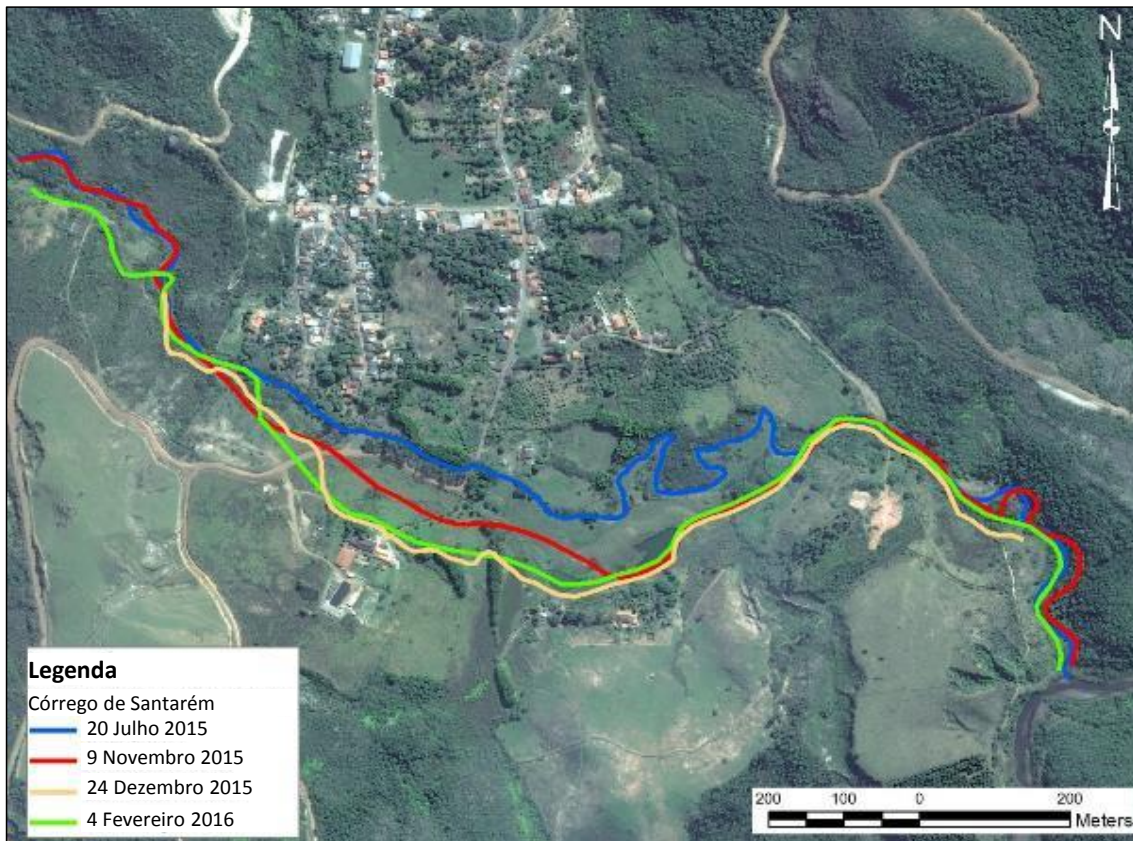


Figura 3.5.47: Delimitação do eixo do canal do Córrego Santarém nas condições pré-rompimento.

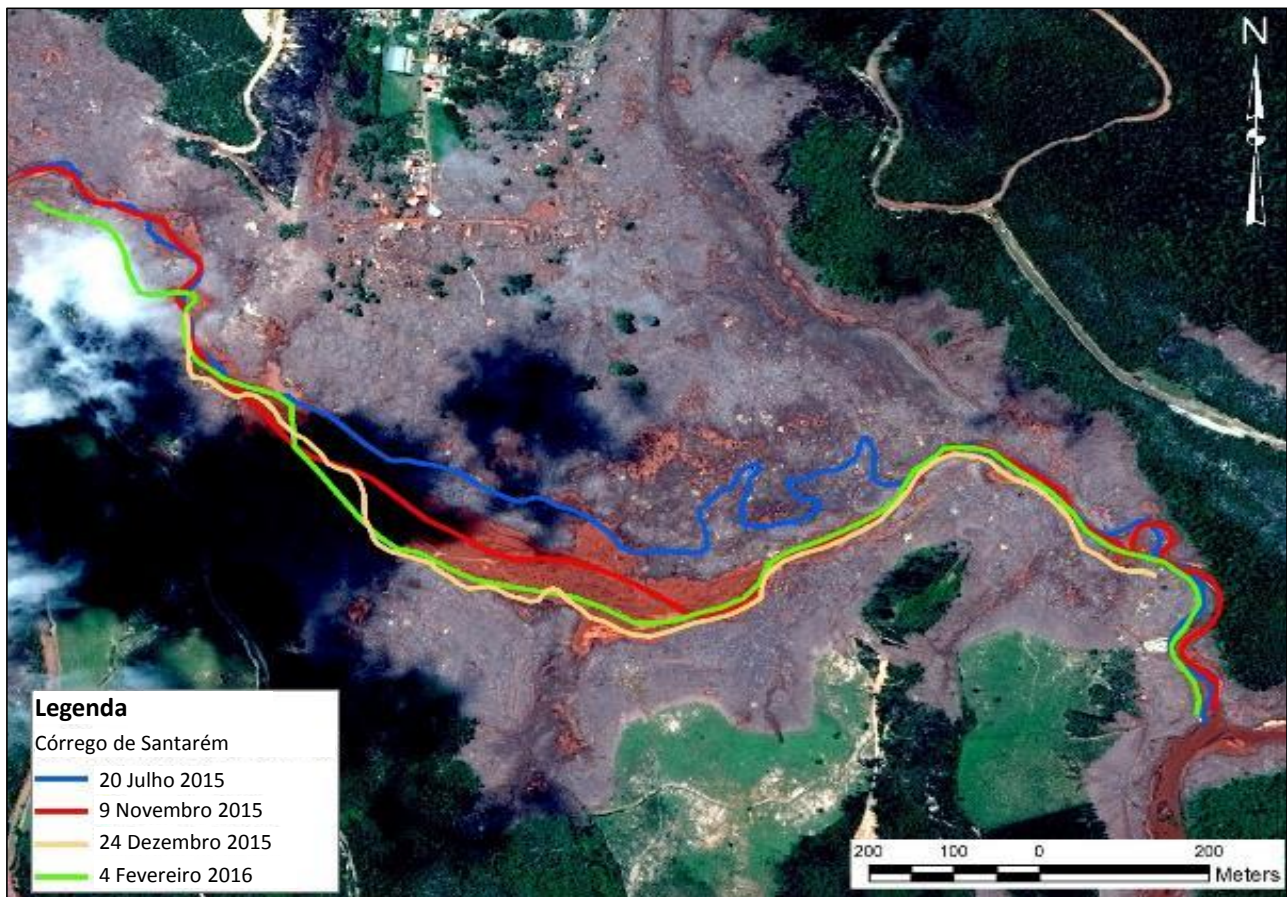


Figura 3.5.48: Delimitação do eixo do canal do Córrego Santarém nas condições pós-rompimento.

A variação na localização do canal pode ser claramente vista nestas figuras. Note-se que a localização do canal é mais estável no trecho com mais cânions do Córrego Santarém se aproximando da confluência com o Rio Gualaxo do Norte.

Um exemplo das condições no Córrego Santarém pós-rompimento é mostrado em uma renderização 3D na **Figura 3.5.49**. O modelo digital de elevação LIDAR detalhado foi usado como referência. A figura mostra a planície de inundação do canal natural anterior. A forma do canal natural não mais é visível, estando coberta por rejeitos.

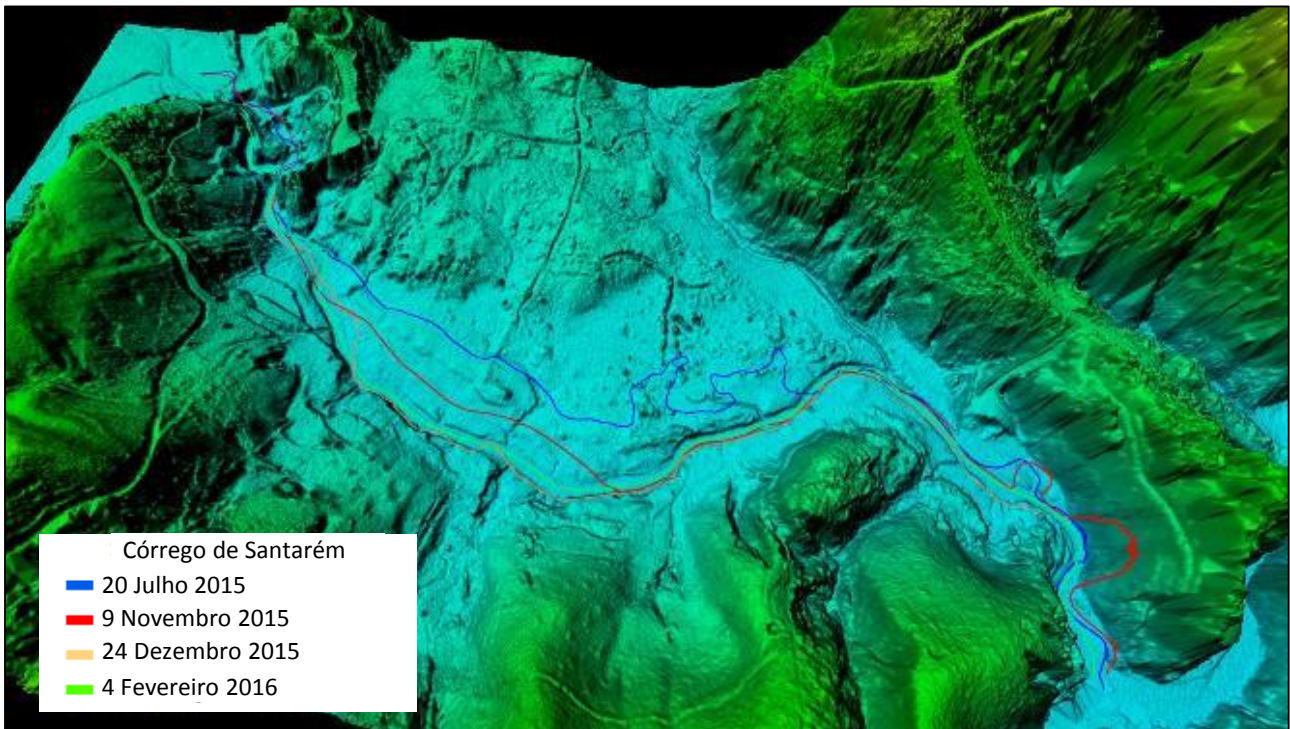


Figura 3.5.49: Renderização 3D da delimitação do eixo do canal do Córrego Santarém nas condições pós-rompimento a partir de LIDAR em 4 de fevereiro de 2016.

Os perfis de seções transversais abaixo (**Figura 3.5.50** a **Figura 3.5.52**) representam as condições pós-rompimento e mostram que uma nova geometria de canal foi criada pelo fluxo de detritos e rejeitos na planície de inundação do Córrego Santarém. O formato do novo canal muda com a localização da seção transversal, mostrando uma largura do leito menor estimada que varia entre 17,5 m e 19 m. A profundidade do leito menor também foi estimada a partir de dados de seção transversal, apresentando valores entre 1 m e 4 m.

Na ausência de dados de geometria do canal pré-rompimento, as imagens disponíveis foram usadas para estimar a largura do leito menor do canal para o Córrego Santarém antes do rompimento. A correlação entre as condições pré e pós-rompimento (**Figura 3.5.46**) mostra que o novo canal ficou duas vezes mais largo após o rompimento.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

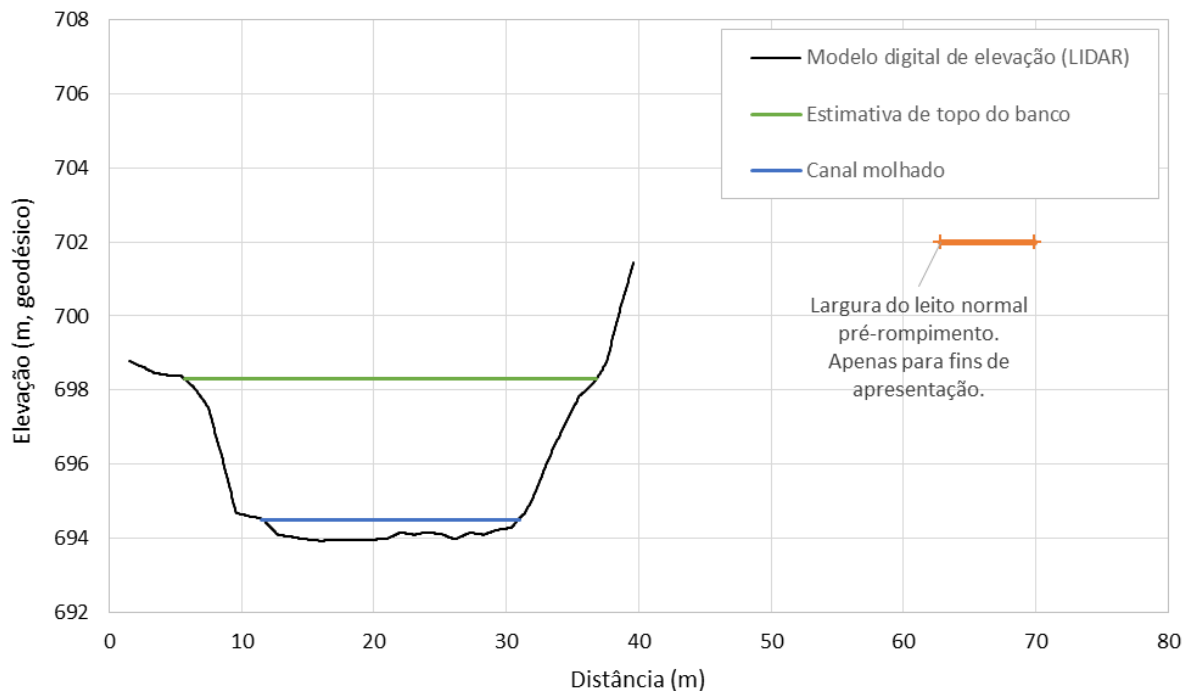


Figura 3.5.50: Seção transversal do canal do Córrego Santarém no ponto ST1, pós-rompimento. Largura do leito menor pré-rompimento é mostrado apenas para fins de comparação; elevação meramente ilustrativa.

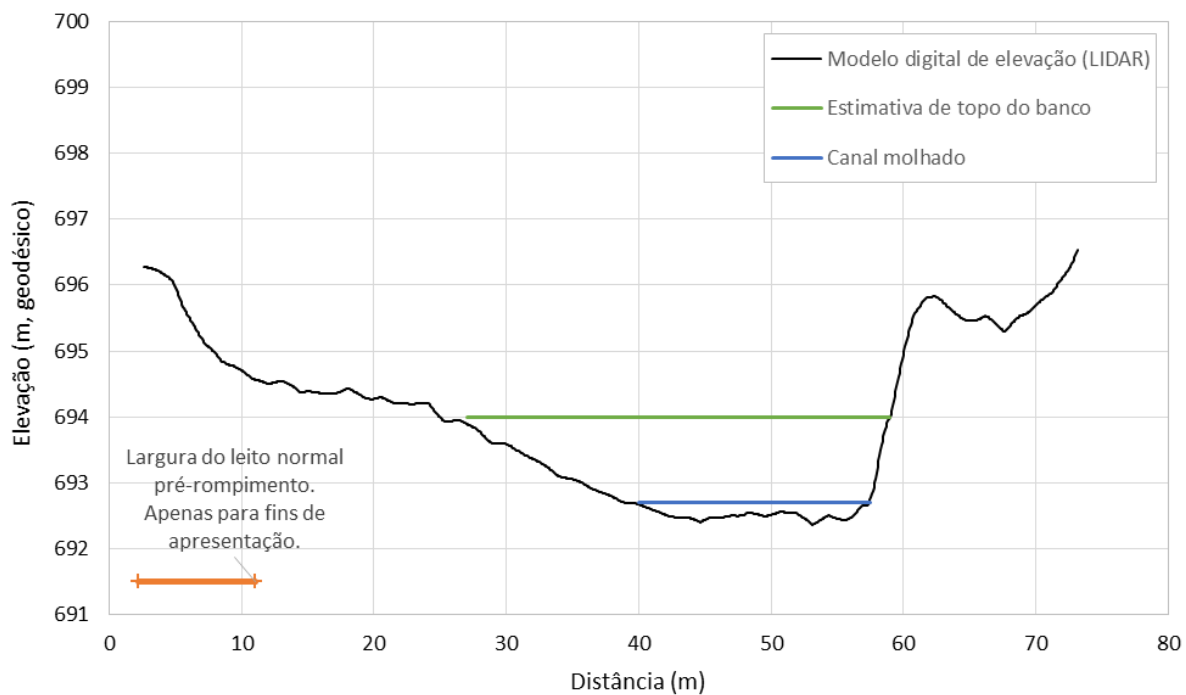


Figura 3.5.51: Seção transversal do canal do Córrego Santarém no ponto ST2, pós-rompimento. Largura do leito menor pré-rompimento é mostrado apenas para fins de comparação; elevação meramente ilustrativa.

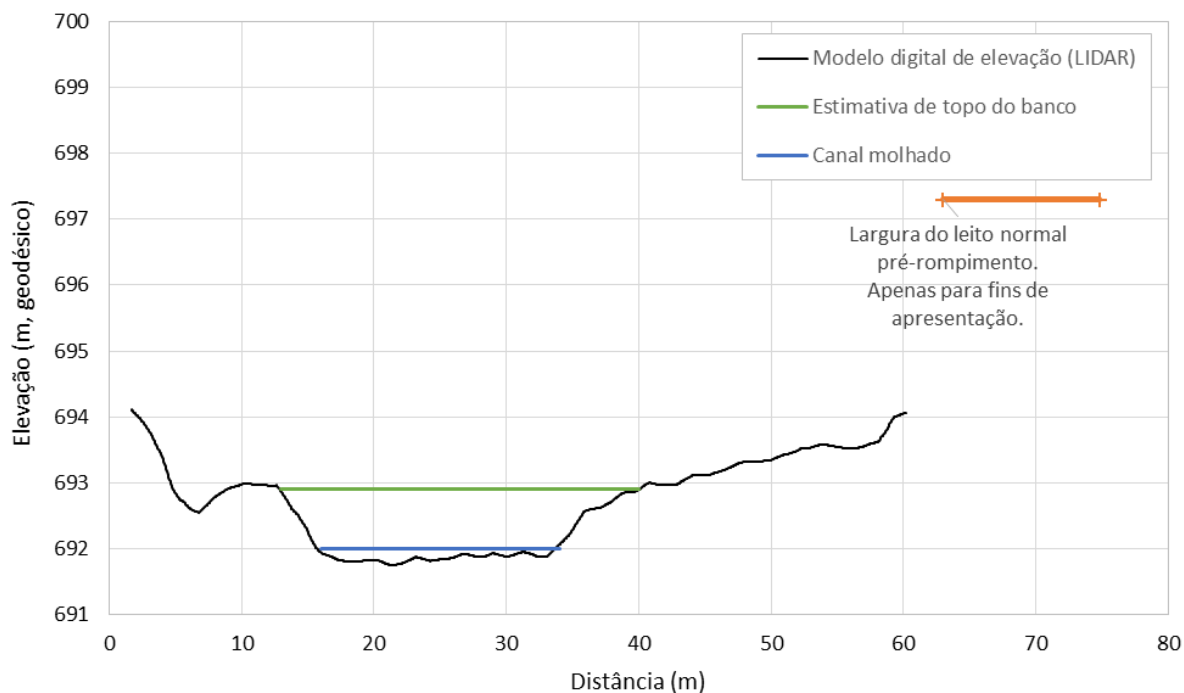


Figura 3.5.52: Seção transversal do canal do Córrego Santarém no ponto ST3, pós-rompimento. Largura do leito menor pré-rompimento é mostrado apenas para fins de comparação; elevação meramente ilustrativa.

3.5.8.2 Comparação de migração do canal em Barra Longa

Uma comparação similar de migração de canal foi feita para a área de Barra Longa (**Figura 3.5.52** e **Figura 3.5.53**). As duas figuras mostram que a migração do canal em Barra Longa foi relativamente limitada e contida dentro daquelas áreas em que o rio já mostrava sinais de erosão das margens e migração do canal. Esta comparação de mudanças de canal entre o Córrego Santarém e os trechos fluviais a jusante é um indicador de que os efeitos físicos do fluxo de detritos sobre a morfologia dos trechos fluviais dentro da AEL são menos significativos no Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce. A redução em significância do impacto físico é uma combinação da atenuação da onda de rejeitos pelos trechos estrangulados e a fusão da descarga da inundação com rios que drenam bacias cada vez maiores. Assim, a bacia de drenagem do Córrego Santarém, estando mais próxima do ponto de origem da descarga de rejeitos, foi a mais afetada.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

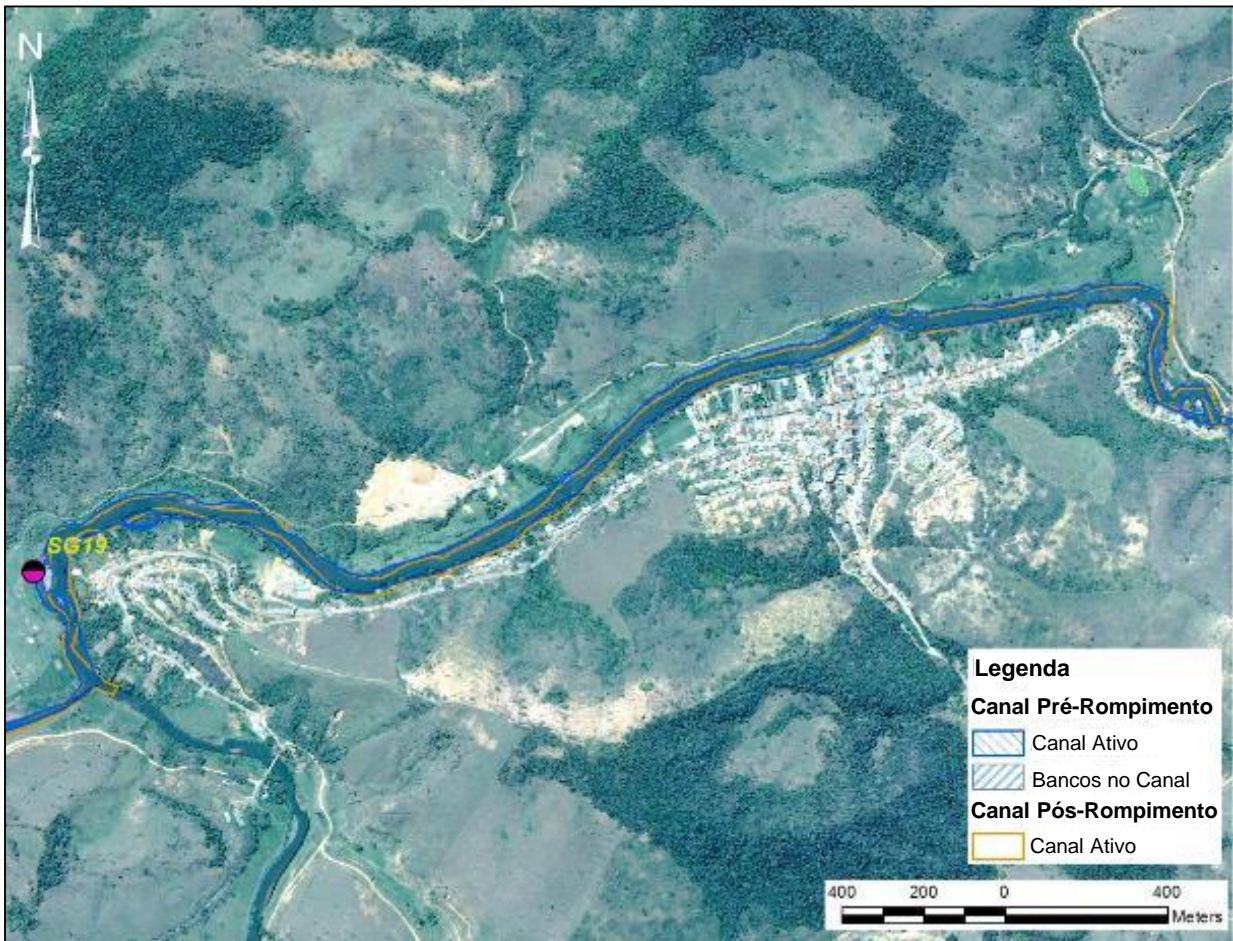


Figura 3.5.53: Delimitação do canal próximo a Barra Longa para as condições pré-rompimento.



Figura 3.5.54: Delimitação do canal próximo a Barra Longa para as condições pós-rompimento.

3.5.8.3 Volume de rejeitos na bacia do Córrego Santarém

As espessuras de rejeitos foram medidas em vários locais na bacia do Córrego Santarém, levando em consideração a segurança da equipe de campo (**Figura 3.5.54**). A espessura mínima medida foi de 0,6 m e a máxima foi de aproximadamente 2,1 m **Anexo A-2**. Considerando a área coberta com rejeitos (aproximadamente 95 hectares) e pressupondo uma profundidade média de rejeitos de aproximadamente 0,9 m, o volume total de rejeitos na bacia do Córrego Santarém foi estimado em aproximadamente 0,9 Mm³, em um intervalo que pode variar de 0,8-1,2Mm³.

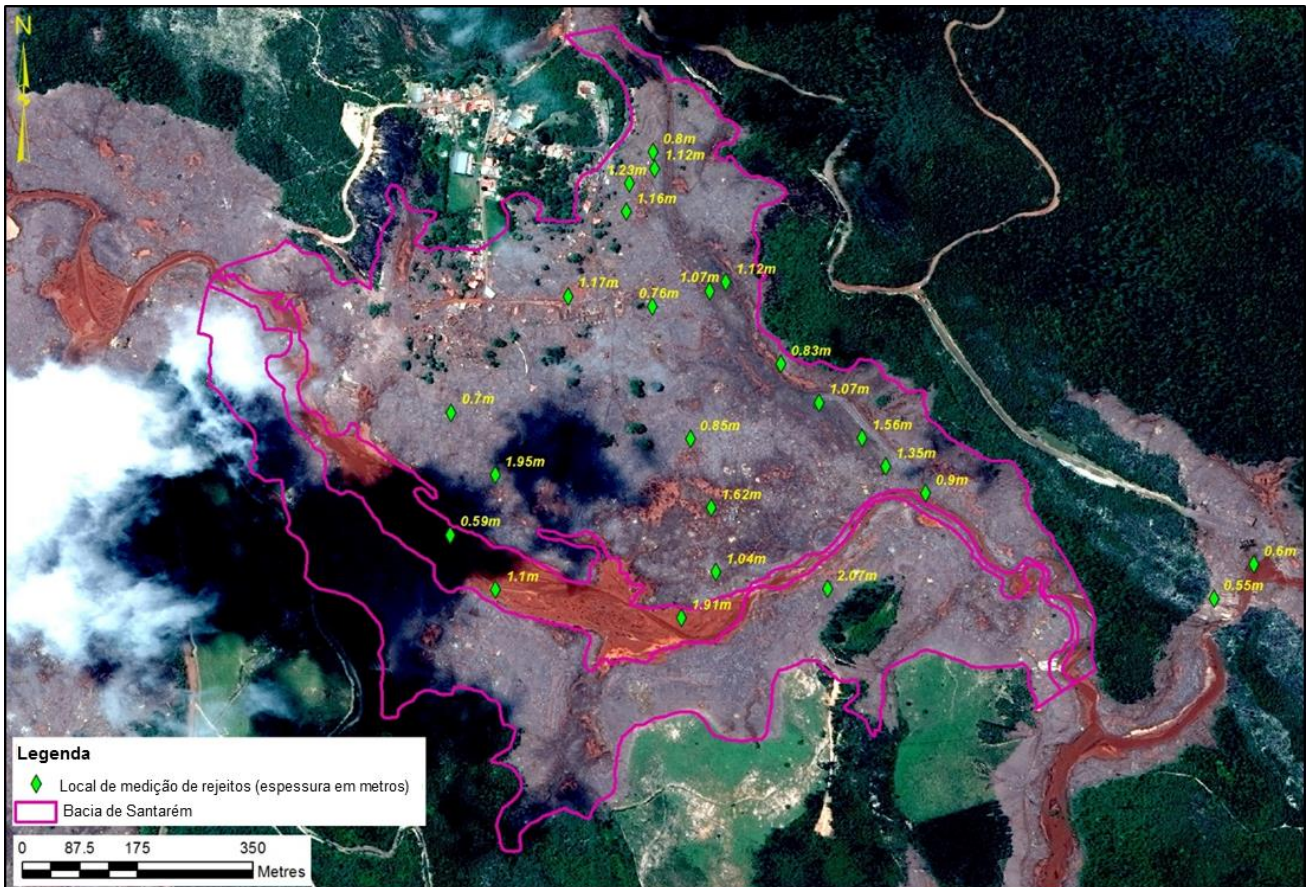


Figura 3.5.55: Pontos de medição de espessura de rejeito na Bacia do Córrego Santarém.

3.5.9 Reservatório de Candonga e áreas a jusante

O Reservatório de Candonga constitui o limite inferior da AEL. A avaliação e análise do transporte de sedimentos e dos impactos geomorfológicos do fluxo de detritos não faziam parte do escopo desta avaliação. As análises iniciais do evento de fluxo de detritos sugeriram que a onda de detritos ficou predominantemente contida dentro das margens do rio a jusante do Reservatório de Candonga devido à atenuação da descarga pela morfologia do rio principal, à introdução de área adicional de drenagem levando a um canal maior para receber a onda de inundação e ao efeito de retenção do Reservatório de Candonga. Entretanto, reconheceu-se que os impactos potenciais do transporte de sedimentos pelo fluxo de detritos se estenderam desde o reservatório até chegar ao oceano. Estes impactos potenciais podem demandar estudo adicional, o que não se enquadra no escopo desta avaliação.

3.6 Priorização para Reabilitação

Os trechos afetados do sistema fluvial do Córrego Santarém ao Rio Doce foram impactados pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão e pelo evento de inundação por detritos que se sucedeu, através do transporte de grandes volumes de rejeitos finos e água. Os rejeitos parecem ter sido depositados como uma camada (p.ex., com espessura de mais de 1 metro) ou uma lâmina (p.ex., com espessura de menos de 1 metro) de material que recobriu o vale subjacente do rio antes do rompimento. Observações iniciais indicam que o canal do Córrego Santarém antes do rompimento foi soterrado ou completamente erodido, enquanto os canais do Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce parecem ter permanecido relativamente intactos, porém soterrados pelos rejeitos. Em algumas áreas, observou-se que a vegetação ciliar já está se recuperando a partir das raízes remanescentes ao longo das margens dos rios.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Resultados de investigações geoquímicas dos rejeitos indicaram que os rejeitos são quimicamente comparáveis aos solos nativos (Golder 2016g). Níveis elevados de metais pesados e outros contaminantes de interesse não foram identificados nos rejeitos depositados. A diferença primária entre os solos nativos e os rejeitos é que os rejeitos têm uma menor concentração de arsênio (Golder, 2016g). Esses dados sugeririam que os rejeitos são quimicamente inertes em relação aos solos do entorno.

Ao longo dos vales afetados em que os sedimentos de granulometria fina (rejeitos) permanecem sem vegetação, observa-se uma rápida erosão superficial causada pela chuva. Esta erosão superficial rápida leva à liberação de rejeitos finos ao rio. A descarga de sedimentos finos nos canais de córregos e rios resulta em um aumento na suspensão de sedimentos finos, nos sólidos suspensos totais e na turbidez. Assim, quando chove, pode-se esperar que a turbidez aumente (ou apresente um pico) em resposta ao escoamento superficial e à erosão dos rejeitos das planícies de inundação, bem como ao aumento da vazão do rio. À medida que a vegetação seja recomposta nas planícies de inundação, esta contribuição de rejeitos finos através do escoamento superficial diminuirá.

Em áreas em que as planícies de inundação permanecem sem vegetação e os sedimentos superficiais consistem de rejeitos finos, ocorre o processo de formação de sulcos (erosão superficial) sob a ação da chuva. Os rejeitos finos recobrem os solos subjacentes das planícies de inundação pré-rompimento. Esta ausência de vegetação sobre rejeitos depositados nas planícies de inundação e expostos, bem como o desenvolvimento de sulcos, gera condições em que um grande volume de sedimento fino pode ser rapidamente carregado para o canal. Esta contribuição direta de sedimentos finos provavelmente resultará em um aumento na turbidez, em vista da disponibilidade abundante de rejeitos finos.

Conceitualmente, o efeito global da revegetação de planícies de inundação afetadas, controlando o escoamento superficial em áreas de depósitos de rejeitos expostos, conduzindo um programa adequado de adição de floculantes à água turva e reduzindo a descarga de sedimentos através do Córrego Santarém desde a barragem rompida, reduzirá a disponibilidade de sedimentos finos no Rio Gualaxo do Norte, Rio do Carmo e Rio Doce. Sedimentos finos armazenados nas áreas de planície de inundação estão sendo fixados pela recuperação da vegetação. Tributários que cruzam depósitos de rejeitos espessos estão sendo reconstruídos e revestidos para minimizar a erosão. Sedimentos finos atualmente armazenados nos canais ativos de rios e córregos a jusante de Santarém estão sendo dragados, onde viável, e a variação natural da vazão dos rios está transportando parte do material para áreas de armazenagem a jusante (p.ex., fluxo de águas lentas, como em reservatórios) durante eventos de grande descarga. Adicionalmente a essas atividades, Golder entende que Samarco pretende construir três diques temporários (GD1, GD2 e GD3) no Rio Gualaxo do Norte para controlar a migração de rejeitos dentro do canal. Os volumes de armazenamento propostos para esses diques são 0,2Mm³, 0,5Mm³ e 0,1Mm³, respectivamente³, é pequeno comparado ao volume estimado de rejeitos armazenado dentro do canal (2,8Mm³), leito maior (6,1Mm³) e a capacidade de armazenamento do reservatório de Candonga (10,5Mm³ quando completamente dragado⁴). Esses diques propostos irão controlar o movimento do rejeito, ao passo que eles também irão afetar o movimento natural do sedimento dos rios e podem impactar significativamente a geomorfologia fluvial. A avaliação relativa aos impactos geomorfológicos desses diques precisaria ser feita, no entanto, excede o escopo deste relatório.

Independentemente de qualquer ação os rejeitos no canal gradualmente serão lavados pelo fluxo do rio e os materiais finos transportados a jusante. O processo hidrológico natural do rio gradualmente e eventualmente nivelará o canal de drenagem dos rejeitos acumulados e atingirá um nível natural de equilíbrio similar às condições antecedentes ao rompimento. Um leito de cascalho-areia será reestabelecido no rio recobrando os depósitos de rejeitos mais profundos e os níveis de turbidez associados à liberação dos rejeitos devem diminuir. Este processo já foi observado em canais tributários que foram recuperados.

A estabilização dos rejeitos depositados nas margens através de uma combinação de revestimento, escavação, remoção e revegetação reduzirá a fonte potencial de rejeitos que podem ser reintroduzidos nos rios. A recuperação das planícies de inundação promoverá o armazenamento de longo prazo de rejeitos depositados no leito maior e os manterá, em grandes volumes, fora dos canais dos rios durante as maiores

³ Apresentação feita pela Samarco ao IBAMA em 17/08/2016.

⁴ Durante a redação deste relatório trabalhos de dragagem foram conduzidos no Reservatório de Candonga para remover uma porção de toda capacidade de armazenamento do reservatório. O exato volume de armazenamento que estará disponível no futuro é ainda indeterminado.



tempestades. Durante inundações futuras onde o rio se eleva ao leito maior, normalmente com frequência de ocorrência de menos de 0,1 em qualquer ano (p.ex. 1 evento em 10 anos ou eventos maiores), há o potencial de erosão localizada e remobilização do rejeito do leito maior. Este potencial é relativamente maior durante os primeiros anos seguintes a revegetação, já que a cobertura vegetal não está plenamente desenvolvida ou não atingiu a maturidade. Sob estas condições de desenvolvimento vegetativo, a resistência das planícies de inundação (e, por conseguinte, rejeitos depositados a partir da inundação) quanto ao fluxo de água e erosão tenderá a ser mais baixa permitindo alguma erosão. Durante eventos de inundação, quando a vegetação for reestabelecida no leito maior a água tende a ter velocidade menor em geral e comumente deposita uma camada de sedimentos sobre o solo existente. Esta deposição pode resultar na gradual sedimentação dos rejeitos em longo prazo. Em algumas áreas, aspectos hidráulicos pontuais podem resultar em processos erosivos do leito e mobilização de rejeitos em áreas revegetadas. Uma análise mais detalhada do potencial de erosão pontual não é o escopo do presente estudo.

Os diques construídos no Córrego Santarém inicialmente conterão o suprimento de sedimentos finos, mas reduzirão também a descarga de sedimentos do leito fluvial para os rios a jusante. Isto pode resultar em mudanças significativas no longo prazo nas características do leito fluvial, pelo menos até depois da confluência dos Rios Gualaxo do Norte e Paciência. A revegetação das planícies de inundação do Rio Gualaxo do Norte e Rio Doce, nos pontos em que elas foram impactadas pela deposição de rejeitos, reduzirá a disponibilidade de rejeitos finos que podem ser mobilizados por escoamento superficial, reduzindo assim a turbidez geral ao longo do tempo.

3.6.1 Princípios orientadores para reabilitação

Para estabelecer uma classificação de prioridade para áreas afetadas, um conjunto de princípios orientadores foram desenvolvidos para permitir esta classificação. Em geral, esses princípios são os seguintes:

1. Minimizar as contribuições adicionais de rejeitos – isso incluiria as áreas fontes (e.g. Barragem de Fundão e a bacia de Córrego de Santarém) a montante da área de estudo.
2. Minimizar o potencial para erosão superficial de rejeitos depositados – isso inclui as áreas do leito maior dentro da área de estudo.
3. Minimizar o potencial de erosão da água – isso inclui as áreas dos tributários e curso principal dentro da área de estudo.
4. Minimizar sedimentos em suspensão em águas superficiais – isso inclui controlar SST (p.ex. pela adição de floculantes para ajudar na decantação do material em suspensão, ou criar novas bacias de decantação).

Adaptando esses princípios orientadores para a área de estudo para estabelecer uma classificação de prioridade para os locais de restauração e para as atividades de controle dos rejeitos, e assim SST, com foco nos princípios 2 e 3. O princípio 1 não foi incluído porque as áreas fontes (p.ex. Barragem de Fundão e bacia do Córrego Santarém) estão situados a jusante da área de estudo e são gerenciadas pela Samarco em programas específicos. O princípio 4 não foi incluído porque controlar sedimentos em 100 km de rio através da construção de estruturas de armazenamento para o material disponível não é exequível. Além disso, os diques do Gualaxo propostos foram excluídos porque eles representam um volume de armazenamento combinado de menos de 10% do volume de rejeitos estimado dentro da área de estudo (0,8 Mm³ versus 8,9 Mm³, leito maior e menor combinados). Golder entende que Samarco está gerenciando as águas superficiais no vale do Córrego Santarém pela adição de agentes floculantes para controlar SST e favorecer a decantação.

Minimizar o potencial de erosão de rejeitos no leito maior e no canal pode ser alcançado por i) tratamento *in situ* (p.ex. re-vegetação, cobertura, mistura e aterramento) ou ii) remoção e transporte para uma instalação de armazenamento adequada para tratamento (Madejon, et al., 2009). Já que os rejeitos são quimicamente indistinguíveis dos horizontes naturais e apresentam uma distribuição granulométrica similar aos sedimentos aluviais (Golder, 2016g), não há justificativa para remoção dos rejeitos. Além disso, instalações de



armazenamento precisariam ser identificadas para receber grandes quantidades de rejeitos depositados. Portanto, tratamento *in situ* parece ser mais razoável.

Seguindo em frente, um quadro para reabilitação dos rios pode ser baseado em:

- A recuperação da bacia para controle da erosão e do sedimento deve ser realizada de montante para jusante, de modo que obras executadas não sejam impactadas pelo contínuo fluxo excessivo de sedimentos provenientes de pontos a montante (Atkins et al., 2001, BC Environment, 2015). Além disso, no Gualaxo do Norte, observou-se que os impactos geomorfológicos diminuem a jusante, assim coloca-se mais coloca-se com prioridade de recuperação as áreas mais impactadas.
- Atenção a mecânica de erosão e transporte de rejeitos que gera altos níveis de sólidos prevenindo assim a causa dos sólidos suspensos totais (Alberta Environment, 2011). Atividades visando reduzir a contínua erosão excessiva de rejeitos podem ser avaliadas em ordem de prioridade como:
 - Manter os rejeitos no leito maior evitando sua remobilização e retorno para o canal;
 - Remover os rejeitos do contato direto com fluxo de água superficial; e
 - Proteger os rejeitos do contato direto com fluxo de água superficial.
- O trabalho deve focar nos:
 - Trechos do rio com maiores volumes estimados de rejeitos estocados (fonte potencial, ver **Tabela 3.5.10**);
 - Trechos do rio com maiores taxas potenciais estimadas de perda de solo (transporte potencial, ver **Tabela 3.5.17**);
 - Trechos do rio com comprimentos mais longos que forneçam um maior ponto potencial de contato entre o leito maior e o canal principal (ver **Tabela 3.5.7**);
 - Além disso, trabalhos deveriam ser priorizados com distância da fonte de montante a jusante, considerando o acesso atualmente disponível, e considerando o regime de transporte de cada trecho do rio.
- Capacidade de estocar rejeitos adicionais em áreas represadas existentes deveria ser considerada para fornecer um tampão para eventos futuros, dependendo do nível de progresso na abordagem de áreas prioritárias.
- Trabalho deve ser implantado dentro dos próximos seis meses antes da próxima estação chuvosa.

3.6.2 Classificação dos trechos de rio

Segue abaixo uma classificação dos trechos realizada:

- Montante para jusante – máximo de 20 pontos, calculados pela relação da distância a jusante da fonte. Ponderada para abordar o princípio orientador de trabalho de montante a jusante e abordar maiores trechos impactados primeiro;
- Comprimento de canal – máximo 10 pontos, calculado pela razão entre o comprimento de trecho e o maior comprimento de trecho observado. Ponderada para abordar os pontos de contato potencial para rejeitos estocados para acessar o rio;
- Regime fluvial – máximo 5 pontos, atribuído com base nas observações de campo com 5 atribuído para trechos de armazenamento de rejeitos e 0 para trechos erodidos em rocha;
- Acesso – máximo 5 pontos, atribuído com base em 5 pontos próximos a uma comunidade, 1 ponto com acesso rodoviário, 0 pontos para sem acesso;



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

- Potencial de erosão – máximo 5 pontos, calculado pela razão entre a erosão potencial estimada do solo e a maior erosão potencial em um acesso pelo trecho da bacia;
- Volume da fonte – máximo 5 pontos, calculado pela razão entre os rejeitos estocados estimados e os maiores estoques de rejeitos estimados.

O resultado da classificação de prioridade é apresentado na **Tabela 3.6.1**. Com base nesses critérios, os canais do rio foram classificados de acordo com valores apresentados abaixo. Essas diretrizes foram aplicadas da seguinte forma:

Tabela 3.6.1: Classificação de trechos do rio para reabilitação.

ID do trecho	Pontuação a jusante	Pontuação comprimento	Pontuação regime	Pontuação acesso	Pontuação potencial de erosão	Pontuação volume da fonte	Pontuação total classificação
BFS_01	20	2	5	0	0.5	2	29.5
CN_02	20	1	0	0	0	0	21
CF_03	20	5	0	0	2	1	28
NR_04	20	3	5	1	1.5	1	31.5
CF_05	20	8	1	1	4.5	3	37.5
NR_06	18	7	5	1	3.5	5	39.5
CF_07	16	4	1	0	1	1	23
BFS_08	15	6	5	1	3.5	3	33.5
NR_09	14	4	5	0	1	1	25
BFS_10	13	8	5	1	3.5	3	33.5
BFL_11	12	8	5	5	4	5	39
CN_12	11	0	0	0	0	0	11
BFL_13	11	2	5	1	1	1	21
NR_14	10	0	0	0	0	0	10
BFL_15	10	2	5	1	1.5	1	20.5
CF_16	9	0	1	1	0	0	11
BFL_17	9	4	5	5	2	4	29
NR_18	8	0	5	1	0	0	14
BFL_19	8	2	5	1	1	2	19
CN_20	8	0	0	1	0.5	0	9.5
CF_21	7	1	0	1	0	0	9
BFS_22	7	2	5	1	1	1	17
NR_23	7	0	5	1	0	0	13
CN_24	6	1	0	1	0.5	0	8.5
NR_25	6	0	1	1	0	0	8
BFS_26	6	10	5	1	2.5	3	27.5
BFL_27	6	10	5	5	3	5	34
CN_28	6	1	0	1	0.5	0	8.5
BFS_29	5	4	5	1	1	2	18
CF_30	5	0	0	0	0	0	5
NR_31	5	1	5	1	0.5	0	12.5
BFS_32	5	4	5	5	1.5	1	21.5



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

BFS_BFL_33	5	6	5	5	4.5	5	30.5
CF_34	5	0	1	5	0	0	11
BFS_35	5	10	5	1	5	5	31
CF_36	4	10	1	0	4.5	3	22.5
BFS_37	4	9	1	1	3	4	22
CF_38	4	10	0	1	5	3	23
Reservatório de Candonga	4	10	5	5	0	5	29
Córrego Santarém Superior	20	8	5	1	0	0	34
Córrego Santarém	20	2	5	5	3	5	40
Córrego Mirandinha	20	3	5	1	0	4	33
Rio Gualaxo do Norte Superior	20	9	5	1	4	4	43
Córrego Camargo	20	3	5	1	0	1	30

Observação: BFL = larga com grande planície de inundação; BFS = larga com pequena planície de inundação; CF = confinado; CN = cânion; NR = estreito.

3.6.3 Áreas prioritárias recomendadas

O que se segue é uma recomendação de prioridade de recuperação, tendo como base os resultados das análises geomorfológicas, hidrológicas e hidrosedimentológicas e usando os princípios orientadores apresentados na Seção 3.6.1. e a classificação resumida na **Tabela 3.6.1**.

Com base na revisão das classificações, o trecho do Córrego Santarém deve ser abordado porque é o trecho mais a montante e tem uma ampla planície de inundação. O trecho do Córrego Mirandinha deve ser abordado em seguida porque é um córrego tributário na extremidade a montante que tem uma ampla planície de inundação que foi impactada pelos rejeitos. Depois desses o trecho a montante do Rio Gualaxo do Norte que é mais como um tributário do fluxo dos rejeitos, e em seguida, Rio Carmo que é mais como um tributário do Rio Gualaxo do Norte deve ser abordado. Em ambos casos as planícies de inundação desses rios possuem ampla áreas impactadas com armazenamento de sedimento significativo. Restauração desses trechos trataria o fornecimento contínuo de rejeitos para trechos a jusante.

Após essas quatro primeiras áreas, em geral, as planícies de inundação no Rio Gualaxo do Norte são tratadas de montante para jusante e com base no volume de rejeitos estocados dentro da planície de inundação, o potencial para erosão e o comprimento de conectividade entre áreas do leito maior e o canal. Isso resulta na identificação e priorização das dez áreas seguintes. Incluído dentro desses locais de restauração, está o trecho canalizado do Córrego Santarém imediatamente a jusante de S3. Identificou-se esse trecho como uma prioridade para reabilitação a fim de minimizar o potencial para remobilização contínua de rejeitos estocados e o impacto adicional para trechos de canal restaurados a jusante. No evento que o dique S3 proposto foi construído, esse trecho poderia ser substituído por outro trecho baseado nas classificações da **Tabela 3.6.1**, por exemplo BFS 35 ou BFS 37 na extremidade jusante do estudo da área. Por fim, identificou-se o reservatório de Candonga porque é uma grande bacia hidrográfica para rejeitos derivados das áreas a jusante e serviria para limitar transporte adicional a montante se um armazenamento adicional pudesse ser desenvolvido no reservatório e os diques de Gualaxo pospostos não foram construídos ou revelaram-se insuficiente para interceptar rejeitos mobilizados.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

A distribuição espacial dessas áreas se encontra na **Figura 3.6.1**. Exemplos de atividades de restauração são listados para cada área prioritária na **Tabela 3.6.2** para indicar que atividades seriam mais prováveis de atingir uma redução benéfica na carga de rejeitos para o rio. Para fins de referência, os números de locais de tributário (formato TG#) são fornecidos para facilitar a orientação.

Essas áreas prioritárias são listadas na **Tabela 3.6.2** e sua distribuição espacial áreas é mostrada na **Figura 3.6.1**. Para fins de referenciamento, os números das áreas afluentes (formato TG#) são fornecidos para facilitar a orientação.

Tabela 3.6.2: Áreas prioritárias recomendadas e atividades de recuperação.

Número Prioritário	Áreas Prioritárias	Atividades de recuperação recomendadas
1	Canal e planície de inundação do Córrego Santarém, próximo a Bento Rodrigues	<ul style="list-style-type: none">■ Reestabelecer canal do Córrego Santarém pelo fluxo reverso de rejeitos a partir da área do canal e construir um canal pavimentado com largura e profundidades de leito adequados. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens do rio e dos rejeitos estocados.■ Reconformar a planície de inundação para gerenciar o escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para o rio principal, e revegetar a planície de inundação do Córrego Santarém. Reconformar serve para reduzir velocidade de escoamento da água superficial pela diminuição do gradiente de declive da planície de inundação e permite o roteamento de água a ser gerenciado para favorecer a infiltração local.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
2	Canal e planície de inundação do Córrego Mirandinha	<ul style="list-style-type: none">■ Reestabelecer canal do Córrego Mirandinha pelo fluxo reverso de rejeitos a partir da área do canal e construir um canal pavimentado com largura e profundidades de leito adequados. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens do rio e dos rejeitos estocados.■ Reconformar a planície de inundação para gerenciar o escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para o rio principal, e revegetar a planície de inundação do Córrego Mirandinha. Reconformar serve para reduzir velocidade de escoamento da água superficial pela diminuição do gradiente de declive da planície de inundação e permite o roteamento de água a ser gerenciado para favorecer a infiltração local.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Número Prioritário	Áreas Prioritárias	Atividades de recuperação recomendadas
3	Canal e planície de inundação do alto Rio Gualaxo do Norte (Tributários dentro de: TG1, TG2, TG3 e TG5)	<ul style="list-style-type: none">■ Reestabelecer canal do Rio Gualaxo do Norte Superior pelo fluxo reverso de rejeitos a partir da área do canal e construir um canal pavimentado com largura e profundidade adequadas do leito. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens do rio e dos rejeitos estocados.■ Estabilizar a montante frente a área de impacto da inundação de detritos e vincular o canal em montante ao canal não afetado■ Reconformar a planície de inundação para gerenciar o escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para o rio principal, e revegetar a planície de inundação do Rio Gualaxo do Norte Superior. Reconformar serve para reduzir velocidade de escoamento da água superficial pela diminuição do gradiente de declive da planície de inundação e permite o roteamento de água a ser gerenciado para favorecer a infiltração local.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
4	Canal e planície de inundação do Rio Camargo (locais tributários dentro: TG4)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar a planície de inundação para gerenciar o escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação e encostas dos vales.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
5	Planície de inundação BFL-11 do Rio Gualaxo do Norte (locais tributários dentro: do TG28 ao TG32)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para a corrente principal.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Número Prioritário	Áreas Prioritárias	Atividades de recuperação recomendadas
		<ul style="list-style-type: none">■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
6	Planície de inundação BFL-27 do Rio Gualaxo do Norte (locais tributários dentro: do TG48 ao TG51)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para a corrente principal.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
7	Planície de inundação BFL-17 do Rio Gualaxo do Norte (locais tributários dentro: do TG36 ao TG40)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para a corrente principal.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
8	Planície de inundação BFS-10 do Rio Gualaxo do Norte (locais tributários dentro: do TG22 ao TG28)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
9	Planície de inundação BFS-26 do Rio Gualaxo do	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

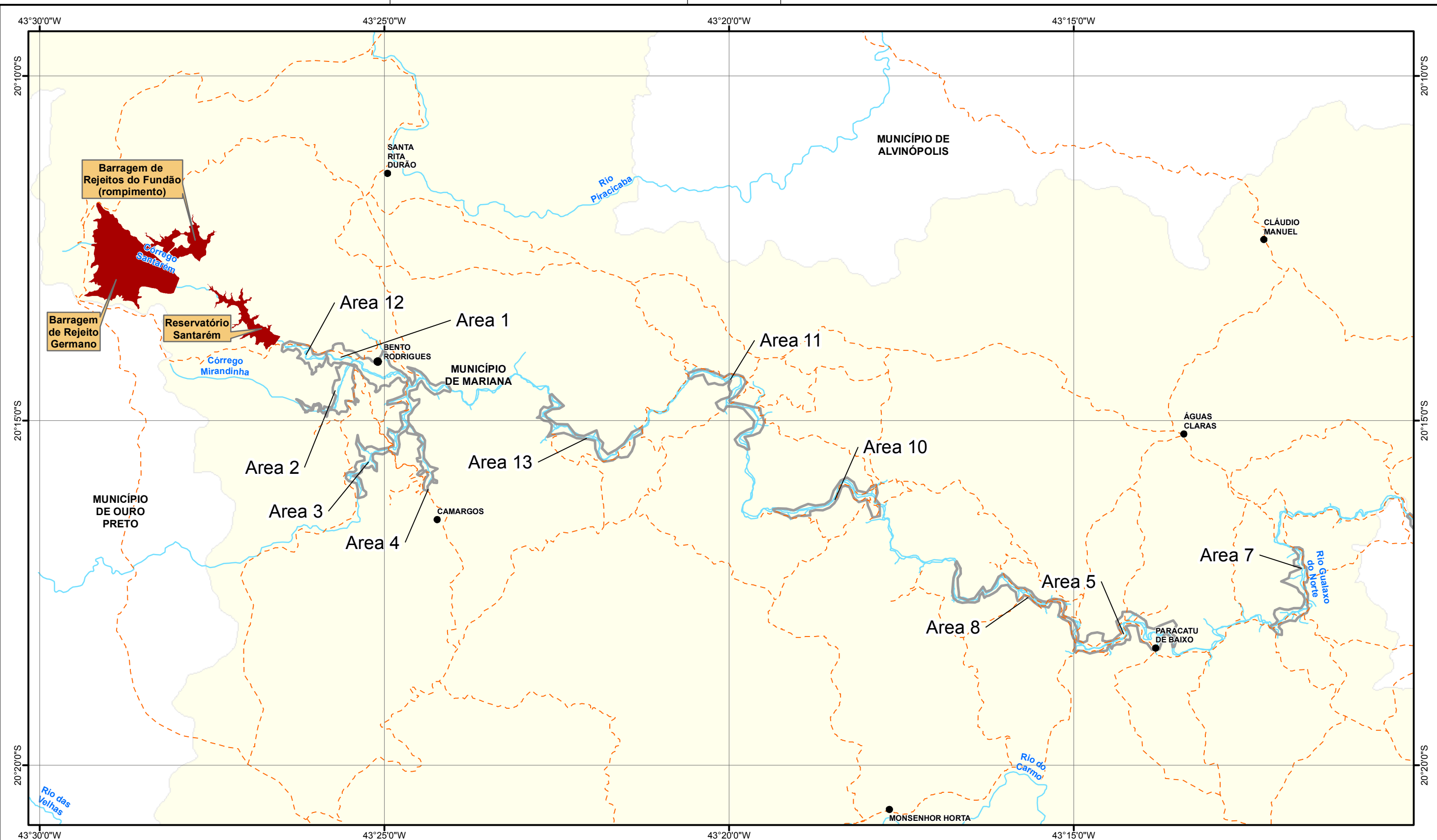
Número Prioritário	Áreas Prioritárias	Atividades de recuperação recomendadas
	Norte (locais tributários dentro: do TG45 ao TG47)	<p>transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.</p> <ul style="list-style-type: none">■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
10	Planície de inundação BFS-08 do Rio Gualaxo do Norte (locais tributários dentro: do 3,5km a jusante de TG18 a TG19)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
11	Planície de inundação NR-06 do Rio Gualaxo do Norte (locais tributários dentro: do TG14 ao TG17)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Pavimentar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.
12	Canal e áreas dos vales do alto Córrego Santarém	<ul style="list-style-type: none">■ Revegetar as encostas do vale do canal do Córrego Santarém.■ Reestabelecer canal onde é necessário.
13	Planícies de inundação NR-04 e CF-05 do Rio Gualaxo do Norte (locais tributários dentro: do TG10 ao TG13)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e revegetar a planície de inundação e encostas do vale.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Blindar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Número Prioritário	Áreas Prioritárias	Atividades de recuperação recomendadas
		<ul style="list-style-type: none">■ Reestabelecer e pavimentar canal através das instalações da hidroelétrica impactada.
14	Planície de inundação a montante do Rio Carmo	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para a corrente principal.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Blindar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.■ Estabilizar montante em frente ao impacto da inundação de detritos sobre o rio onde é requerido.
15	Planície de inundação BFS-BFL-33 do Rio Carmo (locais tributários dentro: do TG01 ao TG06)	<ul style="list-style-type: none">■ Arrastar de volta rejeitos do rio e planície de inundação, reconformar planície de inundação para gerenciar escoamento superficial e transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.■ Instalar controle de erosão superficial e lagoas de sedimentação na planície de inundação para controlar escoamento reverso superficial para a corrente principal.■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro onde erosão ocorreu. Blindar o canal reduzirá erosão a longo prazo das margens de rio e rejeitos estocados.■ Reestabelecer tributários e canais tributários pavimentados ao longo das planícies impactadas pelo rejeito.■ Remover rejeitos dos locais da cidade e restaurar cidade e planície de inundação ao redor de Barra Longa.
16	Reservatório de Candonga	<ul style="list-style-type: none">■ Gerir armazenamento de rejeitos e criar armazenamento adicional onde é viável para sedimentos de montante trazidos para baixo.

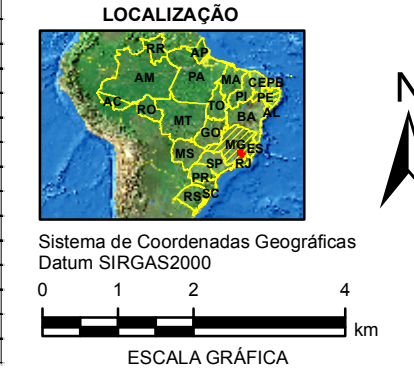
BFL = largo com grande planície de inundação; BFS = largo com pequena planície de inundação; CF = confinado; CN = cânion; NR = estreito.



LEGENDA

- Distritos
- Estradas de Acesso
- Curso D'Água
- Corpo D'Água
- Barragens de Rejeito
- Município de Mariana
- Limite Municipal
- Áreas prioritárias

Nome	Descrição	Área (ha)
Área 1	Canal e planície de inundação Santarém, próximo a Bento Rodrigues	98
Área 2	Canal e planície de inundação Mirandinha	64
Área 3	Canal e planície de inundação montante Gualaxo do Norte	115
Área 4	Canal e planície de inundação Camargo	29
Área 5	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-11	119
Área 6	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-27	163
Área 7	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-17	68
Área 8	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-10	62
Área 9	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-26	94
Área 10	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-08	70
Área 11	Planície de inundação Gualaxo do Norte NR-06	89
Área 12	Canal superior e vales laterais Santarém	36
Área 13	Planície de inundação Gualaxo do Norte NR-04 e CF-05	76
Área 14	Planície de inundação montante Rio do Carmo	52
Área 15	Planície de inundação montante Rio do Carmo BFS-BFL-33	237
Área 16	Gerenciamento de armazenagem de rejeitos no reservatório Candonga	310



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ÁREAS PRIORITÁRIAS**

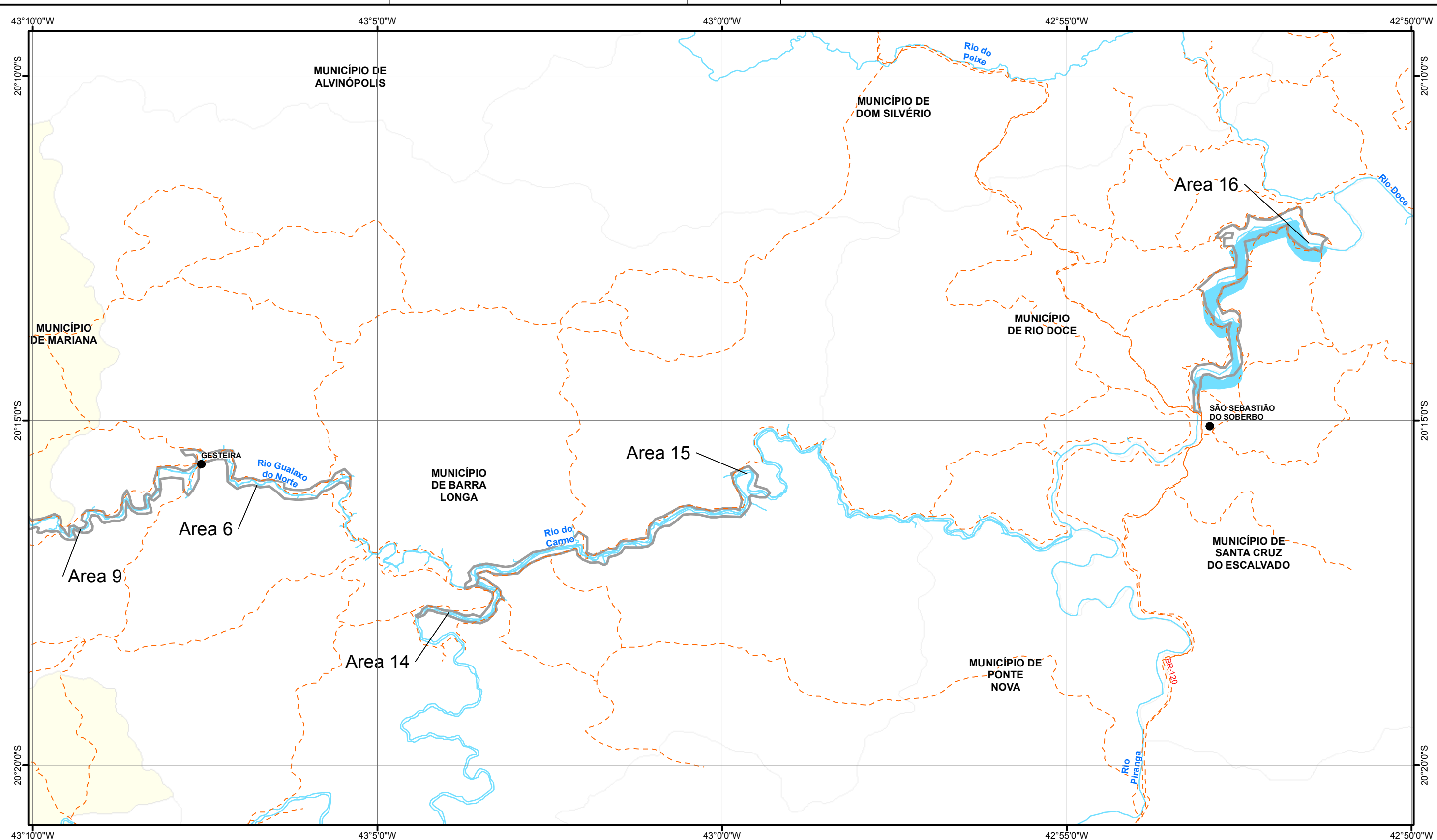
PROJETO: 169-515-2282 ESCALA: 1:100.000

GIS: NTFE outubro/2016

REV: DC 00

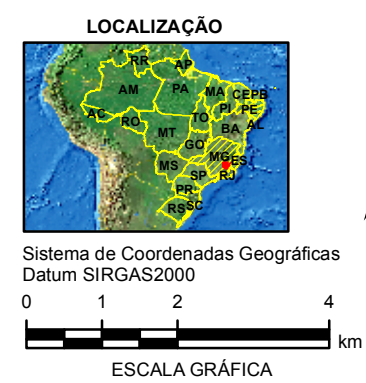
Figura 3.6.1 a

Document Path: S:\Sig\20152_Meio_Ambiente\159_515_2282\3_Produto\1_Originals\geomorfologia\PT\fig3_5_1_areas_prioritarias_A3.mxd



- LEGENDA**
- Distritos
 - Áreas prioritárias
 - - - Estradas de Acesso
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Município de Mariana
 - Limite Municipal

Nome	Descrição	Área (ha)
Área 1	Canal e planície de inundação Santarém, próximo a Bento Rodrigues	98
Área 2	Canal e planície de inundação Mirandinha	64
Área 3	Canal e planície de inundação montante Gualaxo do Norte	115
Área 4	Canal e planície de inundação Camargo	29
Área 5	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-11	119
Área 6	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-27	163
Área 7	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-17	68
Área 8	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-10	62
Área 9	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-26	94
Área 10	Planície de inundação Gualaxo do Norte BFL-08	70
Área 11	Planície de inundação Gualaxo do Norte NR-06	89
Área 12	Canal superior e vales laterais Santarém	36
Área 13	Planície de inundação Gualaxo do Norte NR-04 e CF-05	76
Área 14	Planície de inundação montante Rio do Carmo	52
Área 15	Planície de inundação montante Rio do Carmo BFS-BFL-33	237
Área 16	Gerenciamento de armazenagem de rejeitos no reservatório Candonga	310



PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

TÍTULO: **ÁREAS PRIORITÁRIAS**

PROJETO: 169-515-2282 ESCALA: 1:100.000

GIS: NTFE outubro/2016

REV: DC 00

Figura 3.6.1 b



3.7 Resumo das Estimativas de Carga de Sedimentos

As estimativas de carga de sedimentos derivadas a partir deste estudo indicam que aproximadamente 35% da carga de rejeitos liberada estão contidos dentro da AEL considerando a deposição de rejeitos dentro do canal, nas planícies de inundação a jusante do dique S3 até o Reservatório de Candonga, mas excluindo o reservatório. Incluindo o reservatório os percentuais aumentam para aproximadamente 60%. Um resumo das estimativas da carga de sedimentos é apresentado na **Tabela 3.7.1**.

Tabela 3.7.1: Resumo das Estimativas de Carga de Sedimentos.

Estimativa da Carga de Sedimentos	Volume (milhões m ³)	Fonte de dados
Rompimento da barragem de rejeitos	43,7	Samarco
Carga anual de sedimentos naturais (em Candonga)	1.4	Este estudo
Contribuição de sedimentos naturais durante o rompimento (em Candonga)	<0.01	Este estudo
Rejeitos depositados em Santarém	0.9 (faixa de 0.8 to 1.2)	Este estudo
Sedimentos e rejeitos armazenados no Reservatório de Candonga	10.5	Este estudo
Sedimento natural erodido da AEL durante o rompimento	0.21 (faixa de 0.13 a 0.37)	Este estudo
Carga de sedimento no rio principal com base em dados de TSS reais	0.8	Este estudo
Rejeitos armazenados nas planícies de inundação na AEL	6.1 (faixa de 3.1 a 11.2)	Este estudo
Rejeitos armazenados no canal na AEL	2.8 (faixa de 1.9 a 5.6)	Este estudo
Descarga anual de rejeitos estimada proveniente de terrenos transportados nus dentro da AEL (sedimentos naturais, para comparação)	~0.4	Este estudo
Descarga anual de rejeitos estimada proveniente de áreas transbordadas revegetadas (gramíneas) dentro da AEL (natural)	~0.005	Este estudo
Descarga anual de rejeitos estimada proveniente de áreas transbordadas revegetadas (floresta) dentro da AEL (natural)	~0.001	Este estudo

O que se pode depreender deste resumo é que um programa de revegetação das planícies de inundação pode trazer as cargas de sedimento pós-rompimento de volta a níveis compatíveis com os níveis de referência naturais.

Considerando os dados apresentados na **Tabela 3.7.1** e os valores apresentados no cálculo do balanço de massa dos rejeitos liberados, preparado pela Samarco, uma estimativa do balanço de massa revisada pode ser desenvolvida para estimar a distribuição de rejeito a jusante de Fundão e estimar o volume perdido para além de Candonga como residual. A **Tabela 3.7.2** apresenta esse procedimento de cálculo.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Tabela 3.7.2: Resumo das estimativas de volumes de rejeitos depositados até a barragem de Candonga.

Componente	Volumes (Mm ³)			Descrição	Fonte de Informação
	Nov/2015 (antes do rompimento)	Jun/ 2016	Diferença (liberado ou acumulado)		
Barragem do Fundão	56,6	12,9	-43,7	Material perdido pelo rompimento e perdas subsequentes	Samarco (batimetria)
Barragem de Santarém	7,8	10,8	3,0	Deposição	Samarco (batimetria)
Deposição em Santarém a montante de S2	0,0	0,2	0,2	Deposição	Samarco (batimetria)
Deposição em Santarém a montante de S3	0,0	1,3	1,3	Deposição	Samarco (batimetria)
Área de Bento Rodrigues	0,0	0,9 (faixa de 0,8 a 1,2)	0,9 (faixa de 0,8 a 1,2)	Deposição	Golder (sondagens e dados de campo desse estudo)
Planícies de inundação do Rio Gualaxo do Norte até o Rio Doce	0,0	6,1 (faixa de 3,1 a 11,2)	6,1 (faixa de 3,1 a 11,2)	Deposição em planícies de inundação	Golder (sondagens e dados de campo desse estudo)
Canais do Rio Gualaxo do Norte até o Rio Doce	0,0	2,8 (faixa de 1,9 a 5,6)	(faixa de 1,9 a 5,6)	Deposição no canal	Golder (sondagens e dados de campo desse estudo)
Reservatório de Candonga	0,0	10,5	10,5	Deposição atrás do barramento	Samarco (batimetria)

Os dados entregues por Samarco estão atualizados de acordo com a reunião com o IBAMA em Belo Horizonte na data de 17/08/2016. Nestes dados permanecem incertezas nos volumes de armazenamento e transporte de rejeitos a montante de Candonga. É recomendável que este balanço de massa seja reavaliado tão logo dados novos estejam disponíveis.

3.8 Resumo dos Impactos Geomorfológicos

Os impactos geomorfológicos do rompimento da barragem de rejeitos e o posterior fluxo de detritos no rio principal dentro da AEL foram os seguintes:

- Os impactos geomorfológicos no rio principal são específicos de cada tipo de trecho de canal, sendo os trechos do tipo cânion (CN), confinados (CF) e estreitos (NR) menos impactados do que os trechos largos com planícies de inundação (BFS e BFL).
- A atenuação do fluxo de detritos parece ter ocorrido como um resultado do estrangulamento do fluxo condicionado pelos trechos de cânion e canal confinado. O primeiro trecho de cânion, CN-02 a jusante da confluência do Córrego Santarém e do Rio Gualaxo do Norte provavelmente ampliaram a onda remontante do fluxo no Rio Gualaxo do Norte criando um remanso nesta área.



- O alargamento do canal a jusante do trecho de cânion CN-02 após o rompimento é relativamente pequeno, com larguras do leito menor similares às condições pré-rompimento;
- Pontos de erosão pós-rompimento foram geralmente observados em locais onde já havia erosão natural ativa das margens. O volume total de sedimentos naturais erodidos durante o fluxo de detritos e rejeitos foi baixo quando comparado com o volume de rejeitos descarregado durante o evento;
- Erosões estão presentes nas paredes dos trechos de cânion e confinado, onde as camadas de solo foram removidas. Mínima erosão dos leitos foi observada no canal principal da maioria dos trechos. A profundidade da erosão do canal durante o evento do fluxo de detritos parece ser da ordem de 0,5 a 1,0 m;
- Observou-se a perda de vegetação ciliar ao longo de margens de rio e paredes de vales, embora o enraizamento da vegetação tenha permanecido intacto em muitas áreas. A perda de mata ciliar tende a diminuir de montante para jusante, com a progressiva atenuação da onda devida ao fluxo de detritos neste sentido.
- Os rejeitos estão depositados predominantemente nas planícies de inundação do rio principal, com uma espessura variável, geralmente inferior a 1 metro;
- O fluxo de rejeitos também penetrou e subiu nos tributários do rio principal, depositando-se em suas planícies de inundação;
- A armazenagem e as taxas de acumulação de rejeitos indicam uma maior acumulação a montante e uma gradual redução da acumulação à medida que aumenta a distância a jusante;
- Estimou-se que a carga de sedimentos pós-rompimento no rio principal aumentou aproximadamente sete vezes na comparação com as condições pré-rompimento;
- Os rejeitos, expostos ou com diferentes tipos de cobertura, tendem a erodir a taxas aproximadamente 1,6 vezes mais rápidas quando comparadas com solo natural nas mesmas condições;
- As taxas de erosão dos rejeitos podem ser reduzidas mediante obras de recuperação em um fator de 100 vezes ou maior (vide **Tabela 3.5.16**) que sigam as melhores práticas para controle de erosão de sedimentos, particularmente com relação ao restabelecimento da vegetação e à estabilização de trechos de rio significativamente impactados;
- Os mais importantes impactos geomorfológicos parecem ter ocorrido no Córrego Santarém, a montante do Rio Gualaxo do Norte. Estes impactos incluem avulsão do canal, alargamento do canal, erosão e aterramento do canal, e significativa a total remoção da mata ciliar;
- O transporte de sedimentos naturais carregou rejeitos e capturou sedimentos naturais em trechos de rio a jusante da área de estudo desta avaliação.

3.9 Limitações do Estudo

Várias limitações encontradas durante o programa de campo e a fase de análise precisam ser levadas em consideração para este estudo:

3.9.1 Geral

O relatório é baseado em dados limitados, e inspeções de campo limitadas como descrito no texto. Recomenda-se a continuidade do trabalho para abordar assuntos específicos, e outros temas onde o escopo foi necessariamente limitado.

O escopo de estudo da Golder foi limitado para avaliar dados após o rompimento coletados e reportados por outros programas em andamento e dados geomorfológicos coletados no programa de campo ao longo de 2



semanas em março de 2016. Observações adicionais, relevante para uma análise geomorfológica, coletados por outros membros do time de projeto foram incluídos, se disponíveis, no momento da redação deste relatório. A data de corte foi definida em 17 de julho de 2016 na versão de língua inglesa deste relatório.

3.9.2 Acessos

Enquanto um voo de reconhecimento em helicóptero foi realizado em 25 de agosto de 2016, depois que a minuta do relatório estava completa, o acesso terrestre a alguns trechos em março de 2016 estava limitado. Alguns trechos do rio não podiam ser visitados por causa da falta de acesso. Alguns locais com acesso não podiam ser atravessados a pé em março de 2016 por causa de sedimentos moles. A maioria das margens do rio estavam ainda coberta com sedimentos moles que criaram condições inseguras para equipe de pesquisa de campo para acessar as margens do rio. Para essas localizações, os dados de campo foram coletados das margens, em uma distância segura. Os trechos do rio com vales do tipo confinado ou cânion foram visitados apenas se o acesso rodoviário se encontrava disponível e apenas em uma distância segura da margem. Portanto, algumas medições de campo foram estimadas a distância.

3.9.3 Dados

O escopo da geomorfologia foi limitado por dados de antes do rompimento disponíveis. Apenas dados limitados de topografia, imagens, morfologia do rio, sedimento e hidrologia de antes do rompimento foram identificados. Nenhum estudo prévio geomorfológico foi disponibilizado. Nenhum dado geométrico para os canais em condições de antes do rompimento foram disponibilizados. Não foram disponibilizadas medições de SST combinados e dados de fluxo associado para estimar a carga de sedimento dos rios.

3.9.4 Área de estudo

A área de estudo para análise da geomorfologia limitou-se aos rios a jusante da confluência do Córrego Santarém e do Rio Gualaxo do Norte, e a montante do reservatório de Candonga. A área de estudo não incluiu a seção de rio principal impactada pela Barragem de fundão até a confluência do córrego Santarém e rio Gualaxo do Norte. Golder reconheceu que Samarco estava prontamente encarregada em direcionar e gerenciar esse trecho do rio a montante da área de estudo sob outros programas.

Seguindo o levantamento de campo, e a pedido da Samarco, o trecho do rio do Córrego Santarém entre S3 e a foz foi adicionado ao escopo de trabalho. Essa adição desse trecho foi requerida para fornecer uma revisão técnica de impactos geomorfológicos, sedimentação e volumes de rejeitos para suportar as avaliações desse trecho de Santarém sendo realizado concorrentemente sob seus outros programas. O Córrego de Santarém foi avaliado com base em uma revisão da área de trabalho de dados e imagens disponíveis e nenhuma avaliação de campo foi conduzida nesse trecho do rio.

Embora a área de estudo incluía as localizações dos diques do Gualaxo propostos (GD1, GD2 e GD3), a consideração desses foi excluída do escopo técnico a fim de fornecer uma avaliação do rio a partir da foz do Córrego Santarém a jusante até o reservatório de Candonga. Deste modo, dados do rio que seriam coletados poderiam ser usados em uma data posterior para avaliar os efeitos potenciais dos diques na morfologia do rio além de seus efeitos na estocagem de rejeitos. A avaliação dos diques, portanto, não faziam parte do escopo da avaliação.

3.10 Recomendações para estudos futuros

Os dados apresentados nesse relatório limitam-se para a área de estudo de aproximadamente 100 km de comprimento. Dados adicionais precisariam ser coletados para refinar a análises e estimativas apresentadas aqui.



As estimativas de volumes de rejeitos estocados dentro do canal do rio e do vale fluvial do rio Gualaxo do Norte da confluência com Córrego Santarém a jusante até o reservatório de Candonga baseiam-se nos dados limitados. As limitações dos dados levam para um grande grau de incerteza. Dados adicionais de espessuras de rejeitos devem ser coletados para reduzir a incerteza. Os dados adicionais forneceriam um plano de amostragem detalhado incluindo perfis de seções transversais de espessuras de rejeitos com base no poço de teste ou dados essenciais para manter os dados estratigráficos.

O grau de atenuação desse evento de fluxo de detritos a jusante no vale é desconhecido para a maioria da AEL. Modelagem numérica do evento de rompimento com base em linhas de lama pesquisadas para se obter avaliação do estágio da água devem ser realizadas para compreensão futura da faixa em que o evento de detritos foi atenuado pela morfologia do vale fluvial.

A taxa de remobilização dos rejeitos das áreas do leito maior é desconhecida. Um programa de monitoramento deve ser estabelecido para juntar dados de remobilização de rejeitos no leito maior. No leito maior parcelas experimentais de monitoramento da erosão devem ser estabelecidas e acompanhadas durante anos. Essas parcelas devem ser instaladas em locais tratados e não tratados (p.ex. replantado, ressemeado, lavrado e plantado, reclassificado e misturado com solos nativos) para avaliar a taxa a longo prazo de liberação de rejeitos.

A taxa de remobilização de rejeitos em barras de sedimentos e áreas de armazenamento dentro do canal é desconhecida. Um programa de monitoramento deve ser estabelecido para juntar dados sobre a taxa de remobilização de rejeitos no canal. Nas áreas no canal, dados sedimentológicos e estratigráficos deviam ser coletados por meios de sondagem do canal durante um período de muitos anos para avaliar a resposta do leito de canal ao regime hidrológico natural. Em barras de sedimentos dentro do canal, medições a varejão devem ser estabelecidas para medir a profundidade de limpeza em rejeitos estocados e dados geotécnicos devem ser coletados para avaliar as mudanças físicas em rejeitos estocados (e.g. compactação, desidratação e força de cisalhamento).

O efeito geomorfológico dos diques de Gualaxo propostos (GD1, GD2 e GD3) devem ser avaliados. Esses diques propostos afetarão o movimento de sedimento fluvial natural bem como rejeitos de controle. Os impactos geomorfológicos são desconhecidos, mas podem incluir correnteza de canal a jusante dos diques, levando a perda de material. Trabalhos futuros sobre o efeito físico dos diques no canal do rio devem ser realizados.

Encerramento

Nós confiamos que esse relatório atende suas expectativas. Entre em contato com o abaixo-assinado se você tiver alguma dúvida sobre este relatório.

3.11 Referências Bibliográficas

Alberta Environment. 2011. Erosion and Sediment Control Manual. Government of Alberta, 444pp.

ANA - Agência Nacional de Águas. ANA Brazil. Dados hidrométricos. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acessado em: Maio de 2016. 2016a.

ANA - Agência Nacional de Águas. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações Para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce. Disponível em: http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Doce/CBH/relatorios/PIRH_Doce_Volume_I.pdf. Acessado em: Julho de 2016. 2016b

ATKINS. R. LESLIE, D. POLSTER, D. WISE, M. AND R. WONG. Hillslope Restoration Best Management Practices. Watershed Restoration Technical Circular #3. BC Ministry of Forests and Ministry of Environment. 2001.

BC Environment. 2015. Developing a Mining Erosion and Sediment Control Plan, Version 1.0. Environmental Protection Division. 25 pp.



- Buffington, J.M., Montgomery, D.R., 2001. Reply to comments on “Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers” and “Effects of sediment supply on surface textures of gravel-bed rivers” by John M. Buffington and David R. Montgomery. *Water Resources Research* 37, 1529–1533.
- Buffington M. 2013. Geomorphic classification of rivers. Buffington, J.M., Montgomery, D.R. 2016. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 9, *Fluvial Geomorphology*, pp. 730–767
- Cantalice, J.R.B, da Silva Souza, W.L., Bezerra Silva, Y.J.A., Guerra, S.M.S., Araújo, A.M., Cavalcante, D.M. and C.M.C.A Cruz Silva. 2015. Chapter 2, Bedload and Suspended Sediment of Watershed Impacted by Dams. *In Effects of Sediment Transport of Hydraulic Structures*, p. 19-36.
- Church M., 1992. Channel Morphology and typology. In *The rivers handbook: Hydrological and ecological principles*. Callow, C. and Petts, G. Oxford: Basil Blackwell, p. 126–143.
- Church, M., 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47, p. 541–557
- Church M., 2006. Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial River. *Church M. Annual Review of Earth and Planetary Science*, 16 January 2006, p. 325–354.
- COOPER Evaluation of the relationships between RUSLE R-factor and mean anual precipitation Kurt Cooper. 2011. Available at: http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/linkfiles/Cooper%20R-factor-Final.pdf. Accessed June 10, 2016. 2001.
- CPRM. 2016. CPRM's Action in the Special Monitoring of the Basin of the Rio Doce. Presentation January 14, 2016, slide 26 of 49.
- Dorr J V N, 1969 Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero Minas Gerais, Brazil. USGS Paper 641-A, 117 pp.
- Douglas B. 2016. Blair Douglas BHP Billiton. Tailings volumes, telephone conversation, Rowland Atkins, Geomorphologist, Golder Associates. 14 June 2016.
- Eaton, B, and T. Giles. 2009. Assessing the effect of vegetation-related bank strength on channel morphology and stability in gravel-bed streams using numerical models. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34 712-723.
- Golder (Golder Associates). 2016a. Fundão Tailings Dam Breach, Environmental Rehabilitation Plan. Submitted to IBAMA. February 2016.
- Golder (Golder Associates). 2016b. Hydrodynamic Study at Barra Longa, Presentation to Samarco on 12 May 2016, Golder Associates and Tec3 Geotecnia e Recursos Hídricos.
- Golder (Golder Associates). 2016c. Flow calculations for Serviços De Recuperação Ambiental De Tributários. MT-011-_159-515-5582_00-B. 3 March 2016.
- Golder (Golder Associates). 2016d. Design Basis Memorandum for Serviços De Recuperação Ambiental De Tributários – Work in Progress.
- Golder (Golder Associates). 2016e. Alivação do use de rip rap de solo cimento na recuperação ambiental de tributários.
- Golder (Golder Associates). 2016f. Plano de Recuperação Ambiental. RT-002_159-515-2282-02-J. July 2016.
- Golder (Golder Associates). 2016g. Tailings, Soils and Sediments Geochemical Characterization Program – Final Report. RT-015_159-515-2282_02-J. July 2016.
- HAAN, C.T., B.J. BARFIELD, J.C. HAYES. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. 1994.
- Iverson, 1997. The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics*, 35, 3, 245-296.



AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

- Julien, P.Y. and S.C.A. Leon. 2000. Mud floods, Mudflows and Debris Flows – Classification, Rheology and Structural Design. International Workshop on Debris Flow Disaster of December 1999 in Venezuela, Caracas
- Leopold. B.L. 1995. Fluvial Processes in Geomorphology. Luna B. Leopold. Dover Publications 1995, p. 544.
- Madejon, E., Madejon, P., Burgos, P., Dominguez, M.T., Pérez de Mora, A., Marañón, T., Murillo, J.M., and F. Cabrera. Restoration strategies in the Guadiamar area of southern Spain: evaluation of success ten years after Aznalcóllar accident. In 10th Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Mexico, 3pp.
- Nanson, G.C., Croke, J.C., 1992. A genetic classification of floodplains. Geomorphology 4, p. 459–486.
- RENARD *et al.* Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook 703. 382pp. 1997.
- Ritter. 1986. Process Geomorphology, 2nd Edition, Ritter, D.F., Wm. C. Brown Publ. p. 486-490.
- Schumm, S.A., 1977. The Fluvial System. Blackburn Press, Caldwell, NJ, p. 338.
- SYVITSKI & MILLIMAN. Geology, Geography and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean. The Journal of Geology, 2007. Volume 115. p. 1–19. 2007.
- TEC3. 2016. Estudo Hidrodinâmico em Barra Longa. Presentation to Samarco. 16 May 2016.
- WILLIAMS, G.P. Bank-full Discharge of Rivers. Water Resources Research. 14(6). P. 1141-1153. 1978.



ANEXO 2 – Relatório Técnico: Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Relatório Final – Rev. 03



FUNDAÇÃO
renova

**MAPEAMENTO DE HABITATS FÍSICOS NOS TRECHOS T06 À T11
E DEFINIÇÃO DA CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA
RELATÓRIO FINAL**

Revisão 03
Agosto/2022

**MAPEAMENTO DE HABITATS FÍSICOS NOS TRECHOS T06 À T11 E
DEFINIÇÃO DA CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA**

RELATÓRIO FINAL

Revisão 03

São Paulo / 2022

NOTIFICAÇÃO

Este documento foi preparado pela NHC Brasil Consultores Ltda. (NHCB) e Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (NHCL) – doravante conjuntamente denominadas de NHC – para uso exclusivo e benefício da Fundação Renova para quem foi elaborado e para aplicação específica dos estudos do programa de Manejo de Rejeitos que possuem relação com o estudo de “Mapeamento de Habitats Físicos nos Trechos T06 à T11 e definição da condição de referência”. Não é feita qualquer outra garantia, seja ela expressa ou implícita. As informações e dados contidos aqui representam as melhores práticas de engenharia e geociências, como também das legislações vigentes.

Exceto conforme exigido por lei, este relatório e as informações e dados aqui contidos devem ser tratados como confidenciais e podem ser usados e confiados apenas pela Fundação Renova e seus funcionários. A NHC nega qualquer responsabilidade a outras partes que possam obter acesso a este relatório por qualquer perda ou dano sofrido por tais partes decorrentes do uso ou dependência deste relatório ou de qualquer de seu conteúdo.

Citação

NHC. 2022. Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Relatório Final – Revisão 03. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo, 2022.

Preparado por: Thaís Nogueira de Rezende, M.Sc. | Eng. Civil
Isabela Burattini Freire | Eng. Ambiental
Marcus Vinícius Estigoni, PhD | Eng. Ambiental (Líder Técnico)
Andrew Nelson, M.Sc., L.G (WA, USA) | Geomorfologista
Barry Chilibeck, M.Sc., P. Eng. (BC, CANADA) | Diretor, Eng. Civil

Revisado por: Marcus Vinícius Estigoni, PhD | Eng. Ambiental (Líder Técnico)
Guilherme de Lima, Ph.D. | Diretor, Eng. Civil

RESUMO

Nos trechos da parte superior da bacia do rio Doce, no rio Gualaxo do Norte (T06 à T09) e na porção atingida do rio Carmo (T10) e do rio Doce a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves, popularmente conhecida como Candonga (T11), a onda oriunda do rompimento da barragem gerou uma vazão muito superior a capacidade do leito menor do rio. Isto ocasionou erosão do leito e margens, seguida de deposição de material transportado pela onda de detritos no canal fluvial e margens dos cursos d'água (uma mistura de rejeitos com sedimentos naturais), alterando o padrão da morfologia fluvial. Logo após o rompimento a morfologia destes locais ficou caracterizada pela predominância 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).

As características físicas de um rio (sumarizadas pelo parâmetro habitat físico) possuem forte relação com o funcionamento do sistema fluvial, sendo a complexidade dos habitats fluviais um fator de grande importância para a recuperação ambiental de rios que sofreram impactos de natureza física (como o caso da área de estudo). Do ponto de vista estrutural, a complexidades de habitats está associada à sua diversidade, que por sua vez está associada a presença de áreas com diferentes velocidades de fluxos e profundidades. A qualidade dos habitats está relacionada à composição do canal, que envolve a granulometria do material de leito, presença de barras de sedimentos e outros materiais modificadores (matações, leitos rochosos, pedaços de madeira, por exemplo).

Com o passar do tempo e com a ocorrência de processos físicos de transporte de material pelas águas dos rios, o canal fluvial que se encontrava com grande homogeneidade após o rompimento tem passado por transformações buscando recompor suas características, incluindo a formação e diversificação de habitats físicos.

Habitats físicos são definidos como áreas contínuas que possuem características morfológicas (material predominante na camada ativa do leito e geometria do canal) e características hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento) distintas. Diferente de parâmetros de qualidade de água que são efêmeros e altamente influenciados pela variação de vazão (i.e., turbidez ou concentração de sedimentos), as características físicas de um rio correspondem a uma espécie de registro histórico, sendo definidas de maneira cumulativa pelos

processos físicos de transporte de sedimentos, que por sua vez são definidos pelo regime hidráulico e hidrológico.

O presente estudo foi elaborado em atendimento a Nota Técnica da Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) Nº 10/2021 e a Deliberação CIF Nº 516/2021, resultantes do consenso entre as partes sobre a exclusão deste indicador – diversidade de habitats físicos - da lista dos indicadores fim do Programa Manejo de Rejeitos da Fundação Renova.

O objetivo geral do estudo é avaliar e mapear os habitats físicos para condição de referência (pretéritos ao evento e de rios não impactados da região) e em dois momentos após o rompimento (anos de 2019 e 2021), para 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 a T11), e identificar as respostas do sistema fluvial a perturbação causada pelo rompimento da barragem de Fundão.

A área de estudo principal corresponde à área impactada do Rio Gualaxo do Norte, do Rio do Carmo e do Rio Doce – a montante do reservatório de Candonga, trechos T06 ao T11 conforme divisão proposta pelo Plano de Manejo de Rejeitos – PMR, com uma extensão total aproximada de 110 km. Também fizeram parte do estudo trechos selecionados de rios da região utilizados para estimar a condição de referência para o rio Gualaxo do Norte¹, incluindo trechos nos municípios de Itabira, Nova Era, Santa Bárbara, Alvinópolis, Mariana, Barra Longa, Rio Doce, Lamim, Cipotânea, Senador Firmino, Alto Rio Doce e Canãa, no estado de Minas Gerais.

Ao longo da área de estudo principal, a combinação entre a erosão do leito, margem e planícies de inundação dos rios seguida de deposição do material majoritariamente composto por rejeitos oriundos da barragem de Fundão, criou uma característica de predominância de habitat da classe rápidos e de material de leito fino. Deste modo, a identificação de habitats das classes corredeiras e remansos é um fator importante na avaliação da recuperação das características físicas dos rios, bem como qualquer identificação de material mais grosseiro (areias, cascalho, pedra de mão, ou maior). Sendo essas as principais métricas avaliadas.

¹ O rio Gualaxo do Norte possui calha mais confinada, antes do rompimento possuía vegetação ciliar que obstruía a visualização do leito do rio, e as imagens históricas existentes não são de alta resolução (pixel > 0,30 cm), sendo necessário utilizar rios da região para definir um valor de referência para presença de habitats no rio Gualaxo do Norte (abordagem tipo *space-for-time substitution*).

Considerando o difícil acesso por terra em parte do trecho a ser estudado, em especial ao longo do rio Gualaxo do Norte, foi utilizada uma abordagem baseada em imagens aéreas de alta resolução obtidas com drone em sobrevoo de baixa altitude. É válido ressaltar que as imagens registradas permitem eventual reavaliação dos resultados, mesmo após mudanças das condições de campo (i.e., após a ocorrência de evento de cheia).

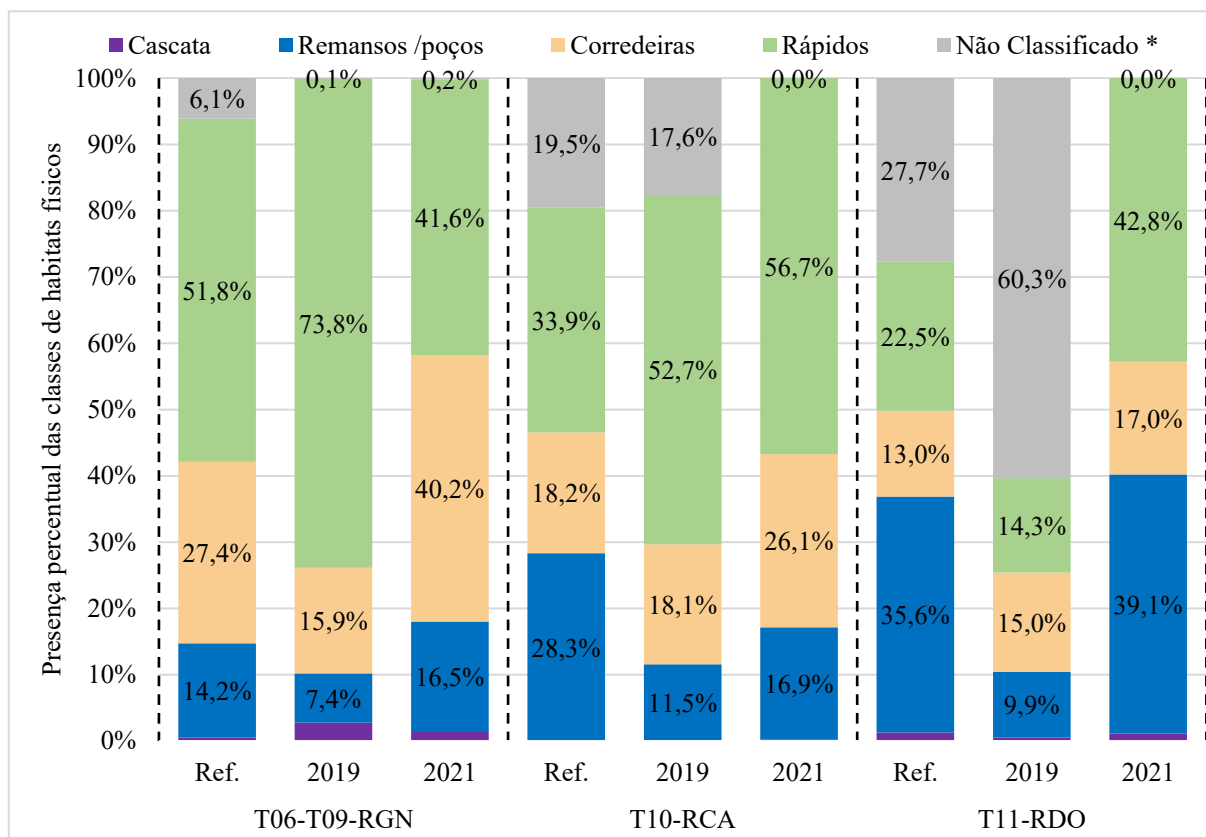
Foram considerados três diferentes cenários para a avaliação da evolução da presença de habitats:

- **Cenário de referência:** condição representativa da situação de presença de habitats nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce à montante;
 - Rio Gualaxo do Norte (T06 à T09): baseado em informações levantadas de rios da região com características similares ao Gualaxo do Norte durante a estação seca de 2021 (levantadas no âmbito do presente estudo) e seleção de imagens anteriores ao rompimento, ano de 2014, para o trecho T09;
 - Rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11): baseado em informações anteriores ao rompimento, ano de 2014;
- **Cenário 2019:** situação da presença de habitats durante a estação seca de 2019 (imagens obtidas de outros estudos);
- **Cenário 2021:** situação da presença de habitats durante a estação seca de 2021 (imagens levantadas no âmbito do presente estudo).

A quantidade de trechos de rios a região utilizados foi definida com base em critérios estatísticos, visando assegurar robustez estatística nas análises de comparação, e a seleção de deles foi feita tomando como base a similaridade de características como área de drenagem, declividade, regime pluviométrico, uso e ocupação do solo da área de drenagem, tipo de solo, características geomorfológicas de confinamento.

Um resumo dos resultados da presença de habitats é apresentado na Figura i, a seguir. De 2019 para 2021 é observado aumento da presença percentual de corredeiras e de poços/remansos é observada nos três rios principais. Estes resultados corroboram a hipótese de que as características físicas dos rios estariam passando por mudanças devido aos processos de transporte de sedimentos (formados principalmente por processos de erosão seletiva do material fino do leito), e que estariam rumando a uma situação de maior diversidade de características físicas, incluindo a presença e diversidade de habitats.

Figura i – Presença percentual dos habitats físicos nos rios analisados (cenário de referência, 2019, e 2021). No rio Gualaxo do Norte e respectivas referências a áreas consideradas como “Não Classificado” correspondem a locais em que a cobertura vegetal do canal ou seu sombreamento impedem a classificação. Nos rios do Carmo e Doce não há áreas em que a vegetação ciliar ou seu sombreamento impedem a classificação.



Para o cenário de 2021, em geral, as duas métricas avaliadas para presença e diversidade de habitats (presença de corredeiras mais poços/remansos; e presença de corredeiras) apresentam valores similares ou superiores a referência, o que pode ser interpretado como um forte indício de recuperação dos rios e similaridade com as características físicas do momento anterior ao rompimento.

A comparação direta do valor médio da referência com os valores do rio Gualaxo do Norte indicam, no geral, que em 2019 havia menor diversidade de habitats e em 2021 havia maior diversidade de habitats no rio afetado pelo rompimento do que nos rios da região. Estes resultados são observados tanto para o rio como um todo quanto ao se analisar os trechos do PMR individualmente. Por se tratar de uma comparação entre dois grupos amostrais distintos (rio Gualaxo do Norte e trechos de rios da também foram realizadas análises estatísticas (teste de poder *a posteriori*) para dar maior robustez as conclusões. De maneira simplista, a análise realizada estima a probabilidade de se estar certo ao afirmar que uma amostra é ou maior, ou menor ou igual a outra. As análises estatísticas realizadas corroboram os resultados da

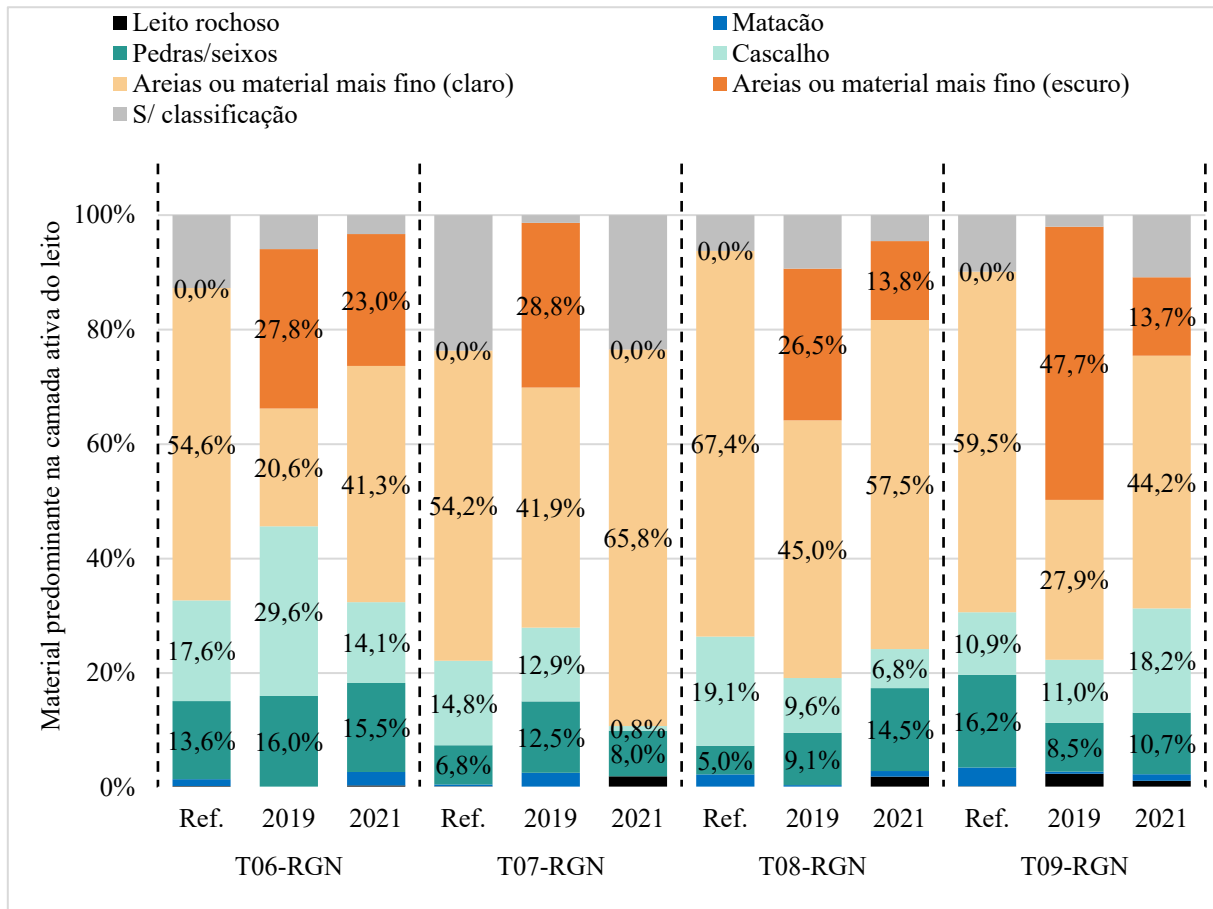
comparação direta quando se avalia o rio Gualaxo do Norte como um todo e o T09. Em relação a avaliação individual dos trechos T06, T07 e T08, os resultados das análises estatísticas indicam que, ainda que em média possuam maior diversidade de habitats que a referência, há uma probabilidade que não pode ser desprezada de que algum pequeno segmento apresente diversidade de habitats menor que a referência.

Em relação ao rio do Carmo e rio Doce, já em 2019, os rios apresentavam valores de presença de corredeiras similares à referência, o que poderia ser possivelmente caracterizado como uma situação melhor que a apresentada no rio Gualaxo do Norte. É interessante ressaltar que essa inferência está em concordância com as informações do monitoramento intracalha que indicam situações bem distintas das amostras de testemunhos coletadas no rio do Carmo e Doce das amostras coletadas no rio Gualaxo do Norte. Os resultados de 2021 apresentam aumento da presença de habitats tipo corredeiras e remansos. Para o rio Doce as duas métricas avaliadas quanto a diversidade de habitats se encontravam similares ou superiores a referência. Para o rio do Carmo é observado que a presença de poços/remansos ainda é menor que a referência. Adicionalmente a avaliação dos habitats, pela condição de referência ser definida por imagens históricas optou-se por se realizar uma comparação direta das imagens aéreas avaliando outros tipos de feições geomorfológicas. Foi identificado que, no geral, estruturas como bancos de sedimentos, áreas rasas e ilhas se encontravam presentes nos rios em momento anterior ao rompimento foram restabelecidas nos mesmos locais, em mesma quantidade, e em tamanho/abrangência similares.

Os resultados principais da análise do material predominante na camada ativa do leito do rio Gualaxo do Norte são apresentados na Figura ii. Ressalta-se que a classificação realizada da composição predominante na camada ativa do leito foi comparada com dados de amostras de campo coletadas na estação seca de 2021 no âmbito do monitoramento intracalha, apresentando boa assertividade na identificação de grosseiros e finos.

Os resultados mostram que em 2019 todos os trechos do PMR do rio Gualaxo do Norte apresentavam pelo menos 25% do leito ocupado predominantemente por material fino escuro, sendo que o T09 tinha quase metade de sua área com predominância desta classe. No geral quase 70 % do rio Gualaxo do Norte era ocupado por material predominantemente fino em 2019. Inclusive em 2021 se tenha maior presença de finos, esse é majoritariamente formado por material da classe “Areias ou material mais fino (claros)”, que provavelmente corresponde à sedimentos originados em áreas não impactadas da bacia (majoritariamente).

Figura ii – Participação da composição do material predominante na camada ativa do leito nos trechos do rio Gualaxo do Norte (cenário de referência, 2019, e 2021).



Em adição a área ocupada predominantemente por um tipo de material, foi avaliada a quantidade de material grosseiro (Obs.: essa métrica é diferente da área ocupada predominantemente por um tipo de material, pois é comum que mesmo em habitats predominantemente formado por material grosseiro apresentem pequenas áreas de material fino, especialmente junto as margens, ou a ocorrência pontual de material mais grosseiro ao longo de um habitat predominantemente ocupado por finos).

Apesar de a comparação direta das médias apresentar uma diferença pequena entre a condição do rio Gualaxo do Norte em 2021 e a referência, sendo a presença de grosseiros maior na referência, mesmo ao se considerar um intervalo de 10% da distribuição ao redor da média², a análise estatística indica grande confiança ao afirmar que o rio Gualaxo do Norte ainda possui menor quantidade de material grosseiro que a referência.

² Ressalta-se que esse valor não é equivalente a 90% ou 110% da média, mas sim um valor que é função de características da distribuição de valores da amostra, usualmente expressos pelo desvio padrão e variância.

Os resultados também mostram tendência de ocorrer maior presença de material grosseiro em trechos de maior declividade, o que é esperado segundo a teoria do transporte de sedimentos, bem como maior diferença em relação a referência e maior robustez estatística ao afirmar que a classe de menor declividade possui menor quantidade de grosseiros que a referência. O mesmo é observado ao nível de cada unidade de habitat físico. Os resultados indicam que diferença do percentual de grosseiros observadas em corredeiras é menor do que a observada em rápidos e poços/remansos, quando se compara os resultados do Gualaxo do Norte com a referência.

Esses resultados indicam que a erosão do leito (em específico a erosão seletiva de material fino) tem sido o principal processo na formação e alteração das características físicas dos rios. Sendo esperado que grandes eventos de cheia (grande capacidade de trabalho concentrada no período de duração do evento), e que a ocorrência contínua de vazões de menor intensidade (a alteração física de rio é um processo cumulativo e contínuo), promovam alterações nas características físicas dos rios, dando continuidade ao processo de recuperação.

Em relação a condição das margens, foi observado que a presença de obras de enrocamento contribuiu na disposição de material grosseiro no leito do canal ativo, o que para situação observada nos momentos iniciais após o rompimento foi um fator promotor de qualidade nos habitats locais. De maneira análoga, foi identificado que vegetação ciliar que foi recomposta já é capaz de fornecer uma certa quantidade de material lenhoso ao rio. É interessante ressaltar que os resultados do mapeamento de habitats nos rios de referência indicam a existência de vegetação densa e de grande porte junto as margens, capaz de obstruir a visualização de aproximadamente 6 % da área do leito dos trechos de rios avaliados. No rio Gualaxo do Norte esse valor era de 0,2 % em 2021, indicativo de que a vegetação ciliar no rio Gualaxo do Norte ainda possui menor porte que nos rios de referência.

E todos os rios foi observado um aumento das erosões das margens entre 2019 e 2021, o que corrobora com as alterações observadas na alteração das estruturas de habitats, pois a erosão das margens é uma evidência de que um rio tenha passado por transformações físicas. Ainda que a erosão das margens e migração lateral dos rios tenha sido vista como indesejável, em específico pelo aporte de material que contribuiria para um possível aumento da turbidez (ou maior prazo para a redução da turbidez), ela é um processo natural, e que tem potenciais benefícios de inserção de material lenhoso e matéria orgânica no meio aquático.

Quanto a correlação entre intervenções humanas, os resultados indicam que a renaturalização no T06 e T07 e obras de estabilização de margens por enrocamento têm influência na formação de habitats físicos, e aparentam ter auxiliado, até o momento, na diversificação de habitats e material predominante do leito. Não foi possível quantificar a influência das intervenções.

Os resultados deste estudo correspondem à uma avaliação dos habitats físicos em uma escala macro (mesohabitats) e predominância de material grosseiro no leito fluvial que possui cobertura completa da área compreendida entre o T06 e T11. Parâmetros como biodiversidade e habitats físicos em microescala tipicamente apresentam uma boa correlação com a presença de habitats físicos em macroescala. Avalia-se que a base de dados produzida é complementar a outras fontes de dados levantados de maneira localizada/pontual, por exemplo dados do monitoramento da biodiversidade e informações pontuais de mapeamento de habitats em microescala, e pode fornecer a base para uma avaliação mais global do processo de recuperação dos rios.

Em resumo, os resultados do estudo indicam que significativas mudanças nas características físicas dos rios afetados pelo rompimento ocorreram no período analisado, com a comparação entre os cenários de 2019 e 2021 indicando mudanças significativas durante esses 2 anos, e os resultados de 2021 indicando um estágio similar as condições definidas como referência para presença e diversidade de habitats físicos.

Em específico no rio Gualaxo do Norte, apesar de já ter alcançado uma condição de presença e diversidade de habitats físicos similar ou superior aos rios da região não afetados pelo rompimento, a qualidade desses habitats (presença de material grosseiro) ainda não está equivalente à de rios não afetados pelo rompimento. É esperado que com o passar do tempo e continuidade dos processos físicos naturais do transporte de sedimentos, a presença de grosseiros no leito do rio Gualaxo do Norte aumente e alcance uma condição similar ou superior aos rios da região não afetados pelo rompimento.

Este tipo de análise não pode ser realizada para o rio do Carmo e rio Doce devido a escala das imagens utilizadas para definição da condição de referência.

Reforçamos que as informações apresentadas neste documento correspondem uma base de dados quantitativa, com abrangência completa dos trechos T06 à T11 localizados na

área impactada dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (a montante do reservatório de Candonga) gerada a partir de mapeamento de habitats físicos em uma macroescala (mesohabitats) e da condição dos leitos dos rios, sendo representativa das condições esperadas em momento anterior ao rompimento e/ou para rios não afetados pelo rompimento, e para condição de 2019 e 2021. Reforçamos também que a técnica empregada de uso de imagens aéreas possibilitou excelente cobertura para o ano de 2021 (0,2 % da área do rio Gualaxo do Norte sem condições de visualização do leito, e nenhuma área com obstruções que impedissem a classificação de habitats no rio do Carmo e rio Doce).

Avalia-se os procedimentos adotados, métodos escolhidos, informações utilizadas, análises realizadas e resultados produzidos, forneceram subsídios suficientes para o atendimento pleno dos objetivos gerais e específicos do trabalho, bem como as requisições colocados pela NT CT-GRSA nº 10-2021.

Palavras-chave: Habitats físicos; geomorfologia fluvial; imageamento aéreo.

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos do estudo.....	4
2.1. Objetivos específicos	4
3. Estrutura do relatório	5
4. Área de estudo.....	7
5. Referencial teórico	10
5.1. Mapeamento sistemático de canais fluviais	11
5.2. Classificação de habitats físicos	12
6. Hipóteses sobre o processo de recuperação das características físicas dos rios	14
7. Cenários avaliados	15
8. Seleção e levantamento de imagens aéreas	16
9. Mapeamento de habitats físicos e do canal fluvial.....	19
9.1. Delimitação do canal	19
9.2. Condição das margens	19
9.3. Material predominante na camada ativa do leito.....	22
9.4. Habitats físicos.....	24
10. Resumo dos resultados	26
10.1. Análise do canal ativo.....	27
10.2. Habitats Físicos.....	30
10.2.1.Rio Gualaxo do Norte.....	34
10.2.2.Rio Carmo e Rio Doce.....	39
10.3. Material predominante na camada ativa do leito.....	46
10.4. Condição das margens	52
11. Discussão	55
12. Limitações e incertezas das análises.....	59
13. Conclusões e recomendações	62
14. Considerações finais	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
Apêndice A	75
Apêndice B.....	76

Apêndice C.....	77
Apêndice D	78
Apêndice E.....	79
Apêndice F.....	80
Apêndice G	81
Apêndice H	82
Apêndice I.....	83
Apêndice J.....	84
Apêndice K	85
Apêndice L.....	86
Apêndice M.....	87
Apêndice N	88
Apêndice O	89
Apêndice P.....	90
Apêndice Q	91

1. Introdução

Nos trechos da parte superior da bacia do rio Doce, no rio Gualaxo do Norte (T06 à T09) e na porção atingida do rio Carmo (T10) e do rio Doce a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves, popularmente conhecida como Candonga (T11), a onda oriunda do rompimento da barragem gerou uma vazão muito superior a capacidade do leito menor do rio. Isto ocasionou erosão do leito e margens, seguida de deposição de material transportado pela onda de detritos no canal fluvial e margens dos cursos d'água (uma mistura de rejeitos com sedimentos naturais), alterando o padrão da morfologia fluvial. Logo após o rompimento a morfologia destes locais ficou caracterizada pela predominância 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).

O reservatório de Candonga foi capaz de atenuar significativamente o pico da vazão gerado pelo rompimento, sendo que nas estações fluviométricas de jusante do barramento as vazões foram equivalentes à uma cheia típica (menor que uma cheia de tempo de recorrência de 2 anos, segundo Golder, 2021) com pouca, ou completa ausência, de extravasamento do escoamento para fora da calha fluvial, sobre a planície de inundação. Isto levou a uma evidente mudança na magnitude dos impactos nas características físicas dos rios impactados quando comparado os trechos a montante do reservatório de Candonga e os trechos fluviais a jusante da barragem de Candonga³.

O extensivo trabalho de campo de caracterização dos depósitos de rejeitos realizado no âmbito dos trabalhos do Plano de Manejo de Rejeitos (PMR) aponta que quase a totalidade do trecho a montante do reservatório de Candonga (T06 à T11) foi recoberta por rejeitos, e permanecia recoberto por rejeitos durante o período analisado (dados de campo do PMR foram coletados entre outubro de 2017 e janeiro de 2018)⁴. Cenário diferente do observado para o trecho de jusante da barragem de Candonga (T13 ao T16), onde, no momento do levantamento (dados de campo coletados entre março de 2018 e dezembro de 2019), a maior parte do trecho

³ Dados dos levantamentos de campo do PMR dos trechos T13 e T14 (Golder,2021), coletados entre 2018 e 2021, apontam presença de rejeitos na planície de inundação limitada a locais específicos. A deposição observada foi causada, provavelmente, pelos eventos de cheia dos anos de 2016 e 2020 que causaram extravasamento da calha fluvial.

⁴ Análise independente dos dados dos transectos amostrados nos trabalhos do PMR (CH2M, 2017a; JACOBS/CH2M, 2018a,b,c) aponta que somente um de cem locais amostrados ao longo do trecho não apresentava evidência da presença de rejeitos.

não possuía evidências de depósitos de rejeitos⁵. Destaca-se que avaliações de impactos físicos e caracterizações geomorfológicas chegaram a conclusões similares (LACTEC, 2020; CH2M, 2017a; Golder, 2016). Ante a esse fato, o reservatório de Candonga representa um local conveniente para mudança das abordagens para estudos e atividades relacionadas a recuperação/alteração das características físicas dos rios.

Com o passar do tempo e com a ocorrência de processos físicos de transporte de material pelas águas dos rios, o canal fluvial tem passado por transformações buscando recompor suas características, incluindo a formação e diversificação de habitats físicos. O restabelecimento da diversidade desses habitats, em conjunto com outros fatores, é um componente chave para a recuperação ambiental dos rios impactados.

Habitats físicos são definidos como áreas contínuas que possuem características morfológicas (material predominante na camada ativa do leito e geometria do canal) e características hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento) distintas.

Diferente de parâmetros de qualidade de água que são efêmeros e altamente influenciados pela variação de vazão (i.e., turbidez ou concentração de sedimentos), as características físicas de um rio correspondem a uma espécie de registro histórico, sendo definidas de maneira cumulativa pelos processos físicos de transporte de sedimentos, que por sua vez são definidos pelo regime hidráulico e hidrológico. Essa característica denota robustez ao parâmetro presença de habitats físicos, e registro de como eles têm se alterado no tempo, para uso na avaliação do comportamento de recuperação de rios que tenham sofrido impactos em suas características físicas, pois reduz incertezas na avaliação comparativa de medições de campo⁶.

A presença de habitats físicos é uma métrica de avaliação de recuperação de rios utilizada internacionalmente por diferentes instituições, como o Serviço Geológico do Governo federal dos Estados Unidos – USGS (Curtis e Guerrero, 2015; Labbe e colaboradores, 2005; Coffman e colaboradores, 2011), a iniciativa da União Europeia REFORM (Rinaldi e

⁵ Análise independente dos dados dos transectos amostrados nos trabalhos do PMR (Worley, 2019; Golder, 2020,2021) apontam que 80 % dos locais amostrados não apresentava evidência da presença de rejeitos, mesmo tendo sido focada o levantamento em locais que se esperava a deposição de sedimentos/rejeitos. Apesar de não ser esperado que tenha ocorrido deposição encobrindo todo ou a maior parte do trecho, como no caso do trecho de montante, os dados coletados não são suficientes para refutar a hipótese.

⁶ Devido ao fato de ser formado por um processo cumulativo a presença de habitats físicos é pouco influenciada por fatores momentâneos e não representativos do comportamento geral dos rios.

colaboradores, 2015) e o Departamento de Ecologia do estado de Washington, nos Estados Unidos (Janisch, J, 2013), e que se mostra adequada para a avaliação dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce a montante do reservatório de Candonga.

O presente relatório faz parte do estudo “Mapeamento de Habitats Físicos nos Trechos T06 à T11 e Definição da Condição de Referência” em atendimento a Nota Técnica da Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) Nº 10/2021 e a Deliberação CIF Nº 516/2021, resultantes do consenso entre as partes sobre a exclusão deste indicador – diversidade de habitats físicos - da lista dos indicadores fim do Programa Manejo de Rejeitos da Fundação Renova. O estudo tem como objetivo caracterizar e mapear os habitats físicos e também mapear de outras características do rio, como a granulometria predominante na camada ativa do leito e a condição das margens. É tomado como base imagens de satélite anteriores ao evento, imagens aéreas de altíssima resolução existentes para o ano de 2019 e do ano de 2021.

Além do mapeamento dos habitats físicos nos rios impactados nos anos de 2019 e 2021, foi estimada a condição de referência (caracterização correspondente à uma situação sem a perturbação causada pelo rompimento) para a presença de habitats físicos nos rios estudados. O escopo do estudo foi separado em um total de seis produtos.

- Produto 1 – Plano de Trabalho⁷
- Produto 2 – Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2019
- Produto 3 – Definição da condição de referência para os trechos T10 e T11
- Produto 4 – Definição da condição de referência para os trechos T06 à T09
- Produto 5 – Mapeamento de Habitats Físicos para trechos T06 à T11 para condição pós-rompimento - Ano Base 2021
- Produto 6 – Análise integrada da evolução do processo de formação e recuperação de habitats físicos – Relatório Final

Este documento corresponde relatório final do estudo, e apresenta em seu conteúdo informações sobre todas as etapas de análise desenvolvidas, incluindo descrição dos procedimentos de seleção de dados e imagens empregado, dos procedimentos/métodos

⁷ Documento intitulado “Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Plano de trabalho. Revisão 02” (NHC, 2021), submetido a CT-GRSA no início de 2021 e aprovado pela Nota Técnica CT-GRSA Nº 10 de 2021.

empregados no levantamento de imagens de campo (ano de 2021), critérios utilizados para seleção das informações/dados para definição dos valores de referência, descrição dos procedimentos de delimitação, mapeamento e classificação de habitats físicos e de outros parâmetros complementares, apresentação dos resultados do mapeamento para os anos de 2019, 2021 e para condição de referência, descrição dos procedimentos/técnicas empregadas para as análises dos resultados, incluindo apresentação e discussão de resultados de estudos e dados coletados/elaborados no âmbito de outros trabalhos, apresentação das limitações e do alcance das conclusões, apresentação das conclusões do estudo.

2. Objetivos do estudo

O objetivo geral do estudo é avaliar e mapear os habitats físicos para condição de referência⁸ (pretéritos ao evento e de rios não impactados da região) e em dois momentos após o rompimento (anos de 2019 e 2021), para 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 a T11), e identificar as respostas do sistema fluvial a perturbação causada pelo rompimento da barragem de Fundão⁹.

2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente estudo são¹⁰:

- Realizar mapeamento sistemático das estruturas de habitats físicos (cascatas, corredeiras, rápidos e remansos/poços) nos trechos T06 à T11 para os anos de 2019 e 2021. Inclui:
 - Avaliar e selecionar as imagens existentes da estação seca de 2019;
 - Realizar levantamento de imagens de alta resolução na estação seca 2021;
 - Avaliar as imagens levantadas na estação seca de 2021;
 - Mapear as estruturas de habitats físicos para os anos de 2019 e 2021.

⁸ Adotamos o termo “condição de referência” em detrimento ao termo “dados pretéritos”, pois é utilizado valores regionais para caracterizar o estado “não impactado” do rio Gualaxo do Norte, correspondente à sua condição anterior ao evento (abordagem tipo *space-for-time substitution*).

⁹ O texto apresentado no plano de trabalho (NHC, 2021) foi revisado, mas sem alteração de conteúdo.

¹⁰ A apresentação dos objetivos específicos foi reestruturada apresentando maior detalhamento do que o apresentado no plano de trabalho (NHC, 2021). Os objetivos específicos “c”, “e”, e “g” correspondem ao primeiro objetivo específico do plano de trabalho (e seus subitens). Os objetivos específicos “a”, “b”, “d”, “f”, e “h” correspondem ao segundo objetivo específico do plano de trabalho (e seus subitens). O objetivo específico “i” e “h” correspondem, respectivamente, ao terceiro e quarto objetivos específicos do plano de trabalho.

- 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 trechos de rios da região não afetados diretamente pelo rompimento (T06 ao T09):
 - Rio Gualaxo do Norte (T06 à T09): baseado em informações levantadas em trechos de rios da região não afetados pelo rompimento e com características similares ao rio Gualaxo do Norte, e em seleção de imagens do rio Gualaxo do Norte anteriores ao rompimento. Inclui: selecionar os trechos e realizar levantamento de imagens de alta resolução na estação seca 2021; avaliar e selecionar imagens históricas¹¹; e mapear as estruturas de habitats físicos;
 - Rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11): baseado em imagens anteriores ao rompimento. Inclui: avaliar e selecionar imagens históricas; e mapear as estruturas de habitats físicos.
- Avaliar o processo de evolução das estruturas de habitats físicos, comparando informações de referência (históricas e de trechos de rios da região) com informações do 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. Estrutura do relatório

Buscando maior fluidez na comunicação dos principais resultados e conclusões do estudo, sem detrimento à apresentação detalhada de procedimentos e resultados que embasam as conclusões, o presente documento foi estruturado no formato de um relatório principal, apêndices técnicos e apêndices de apresentação de resultados (i.e., mapas, tabelas, etc.).

O relatório principal consiste em um documento conciso com foco na apresentação dos principais resultados e conclusões do estudo. Neste documento a descrição da base de dados utilizada, dos critérios e premissas adotadas, dos procedimentos de coleta e tratamento dos dados, e dos métodos de análise dos resultados é realizada de maneira mais geral.

Os apêndices técnicos são complementares ao relatório principal, apresentando maior nível de detalhamento na descrição da base de dados utilizada, dos critérios e premissas adotadas, dos procedimentos de coleta e tratamento dos dados, dos métodos de análise dos

¹¹ Objetivo específico incluído conforme requisição número 3 da NT-GRSA nº 10-2021

resultados e na apresentação de resultados. De maneira complementar, os apêndices de apresentação de resultados correspondem ao conjunto de resultados do tipo mapas, figuras, gráficos e/ou tabelas que foram considerados demasiadamente extensos para inclusão no corpo do texto do relatório principal e/ou apêndices técnicos.

Os apêndices técnicos são:

- Apêndice A: Análise e seleção de trechos de rios da região para definição dos valores de referência de presença de habitats físicos e presença de material grosseiro para o rio Gualaxo do Norte
- Apêndice B: Análise e seleção das imagens utilizadas no mapeamento de habitats físicos
- Apêndice C: Aerolevantamento e inspeção de campo
- Apêndice D: Procedimentos metodológicos
- Apêndice E: Análise comparativa da classificação visual do material predominante na camada superficial do leito com amostras de campo
- Apêndice F: Apresentação e discussão dos resultados
- Apêndice G: Análise estatística dos resultados
- Apêndice H: Análise da presença de material lenhoso (LWD – *Large Wood Debris*) na calha fluvial

Os apêndices de apresentação de resultados são:

- Apêndice I: Mapas dos de habitats físicos dos trechos de rios da região utilizados para definir a condição de referência do rio Gualaxo do Norte (T06 à T09)
- Apêndice J: Características gerais dos habitats físicos dos trechos de rios da região utilizados para definir a condição de referência do rio Gualaxo do Norte (T06 à T09)
- Apêndice K: Mapas dos de habitats físicos para o ano de 2014 para definir a condição de referência dos rios do Carmo e Doce (T10 e T11)
- Apêndice L: Características gerais dos habitats físicos para o ano de 2014 para definir a condição de referência dos rios do Carmo e Doce (T10 e T11)
- Apêndice M: Mapas dos de habitats físicos para o ano de 2019
- Apêndice N: Características gerais dos habitats físicos para o ano de 2019
- Apêndice O: Mapas dos de habitats físicos para o ano de 2021
- Apêndice P: Características gerais dos habitats físicos para o ano de 2021
- Apêndice Q: Mapas comparativos entre 2019 e 2021

4. Área de estudo

A área de estudo principal corresponde à área impactada do Rio Gualaxo do Norte, do Rio do Carmo e do Rio Doce – a montante do reservatório de Candonga, trechos T06 ao T11 conforme divisão proposta pelo Plano de Manejo de Rejeitos – PMR (CH2M, 2017). Possui cerca de 110 km de extensão, com área de drenagem variando de aproximadamente¹² 180 a 8.900 km². O rio Gualaxo do Norte (T06 a T09) é um rio misto, com vales encaixados – íngremes e confinados, de leito rochoso, intercalados com cursos aluviais moderadamente confinados. A largura típica do rio Gualaxo do Norte é de cerca de 10 m na área afetada mais a montante e de 20 a 25 m próximo à confluência do rio do Carmo. O rio do Carmo (T10) possui largura típica variando de 40 a 60 m. E a largura típica do rio Doce no trecho T11 (a 10 km a montante do reservatório de Candonga) é de 75 m. A descrição e os comprimentos dos trechos considerados do rio principal neste estudo estão apresentados na Figura 1 e na Tabela 1¹³.

Também fizeram parte do estudo trechos selecionados de rios da região com similaridade aos trechos impactados para o caso do rio Gualaxo do Norte¹⁴, incluindo trechos nos municípios de Itabira, Nova Era, Santa Bárbara, Alvinópolis, Mariana, Barra Longa, Rio Doce, Lamim, Cipotânea, Senador Firmino, Alto Rio Doce e Canãa, no estado de Minas Gerais. A Figura 2 apresenta os rios selecionados. Informações sobre o processo e critérios adotados para seleção são apresentados no Apêndice A.

De maneira análoga às boas práticas de projetos de obras hidráulicas, foi adotado um sistema de estaqueamento dos rios, adotando a nomenclatura típica da área de geomorfologia fluvial de “quilômetro do rio” (do inglês *river kilometer*). Esta prática visa auxiliar a localização ao longo da área estudada, e a definição de um marco comum ao trecho de estudo. Apesar de se localizar fora da área de estudo, adotou-se como referência de ponto de início (ponto 0) a barragem da UHE Risoleta Neves (popularmente conhecida como Candonga), por se tratar de uma estrutura física de grande relevância local. A distância é contada de jusante para montante ao longo da linha central dos rios. Como a área do reservatório de Candonga (trecho T12), não

¹² As áreas de drenagem foram delimitadas com base em modelo digital de terreno desenvolvido a partir das informações coletadas da SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* - <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

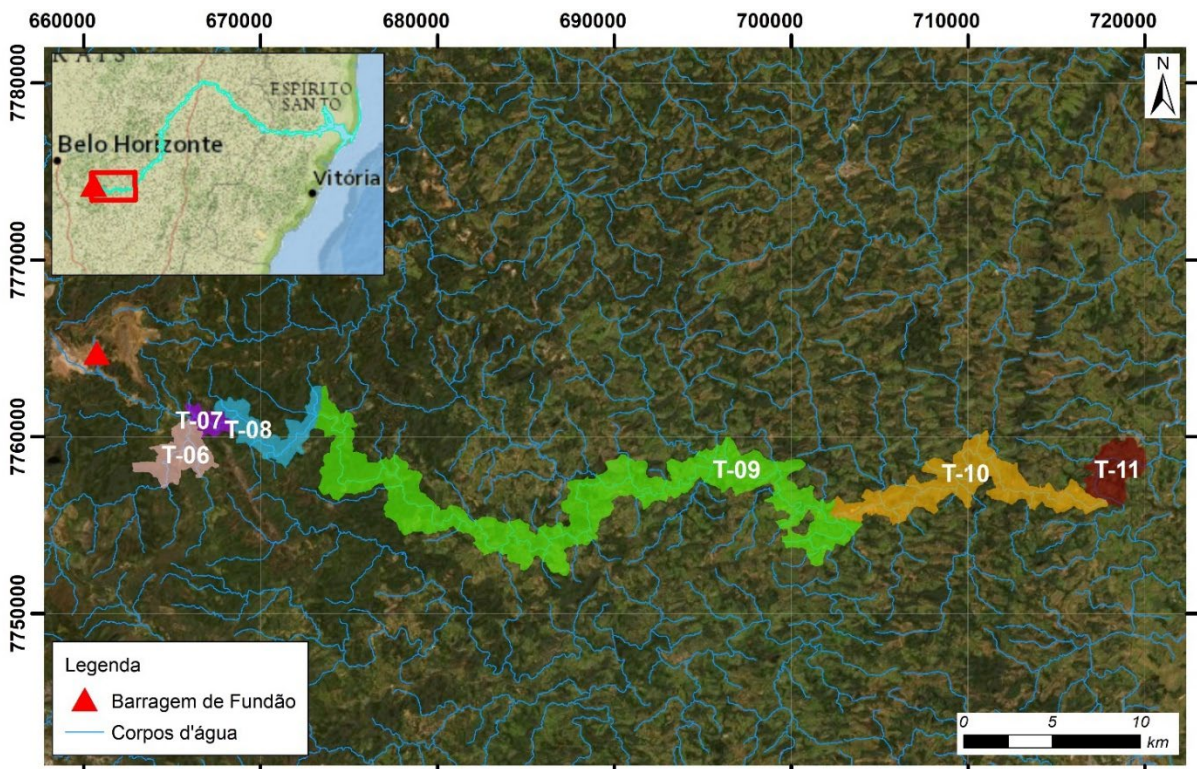
¹³ Todos os valores apresentados neste parágrafo são valores aproximados.

¹⁴ O rio Gualaxo do Norte possui calha mais confinada, antes do rompimento possuía vegetação ciliar que obstruía a visualização do leito do rio, e as imagens históricas existentes não são de alta resolução (pixel > 0,30 cm), sendo necessário utilizar rios da região para definir um valor de referência para presença de habitats no rio Gualaxo do Norte (abordagem tipo *space-for-time substitution*).

faz parte da área do estudo, as análises presentes nesse documento se iniciam a partir do quilômetro do rio RK-11.

A linha central seguiu o curso dos rios principais, até a montante do trecho T06-RGN, no rio Gualaxo do Norte (RK-118). Nas duas grandes confluências da área de estudo foi adicionada siglas correspondentes aos rios. No rio do Carmo no trecho a montante da confluência com o rio Gualaxo do Norte, e no rio Piranga no trecho a montante da confluência com o rio do Carmo, trechos onde o impacto foi causado por um refluxo da onda de rejeitos, foram adicionadas siglas correspondentes aos rios na representação dos RKs (i.e., RK##-RPG e RK##-RCA).

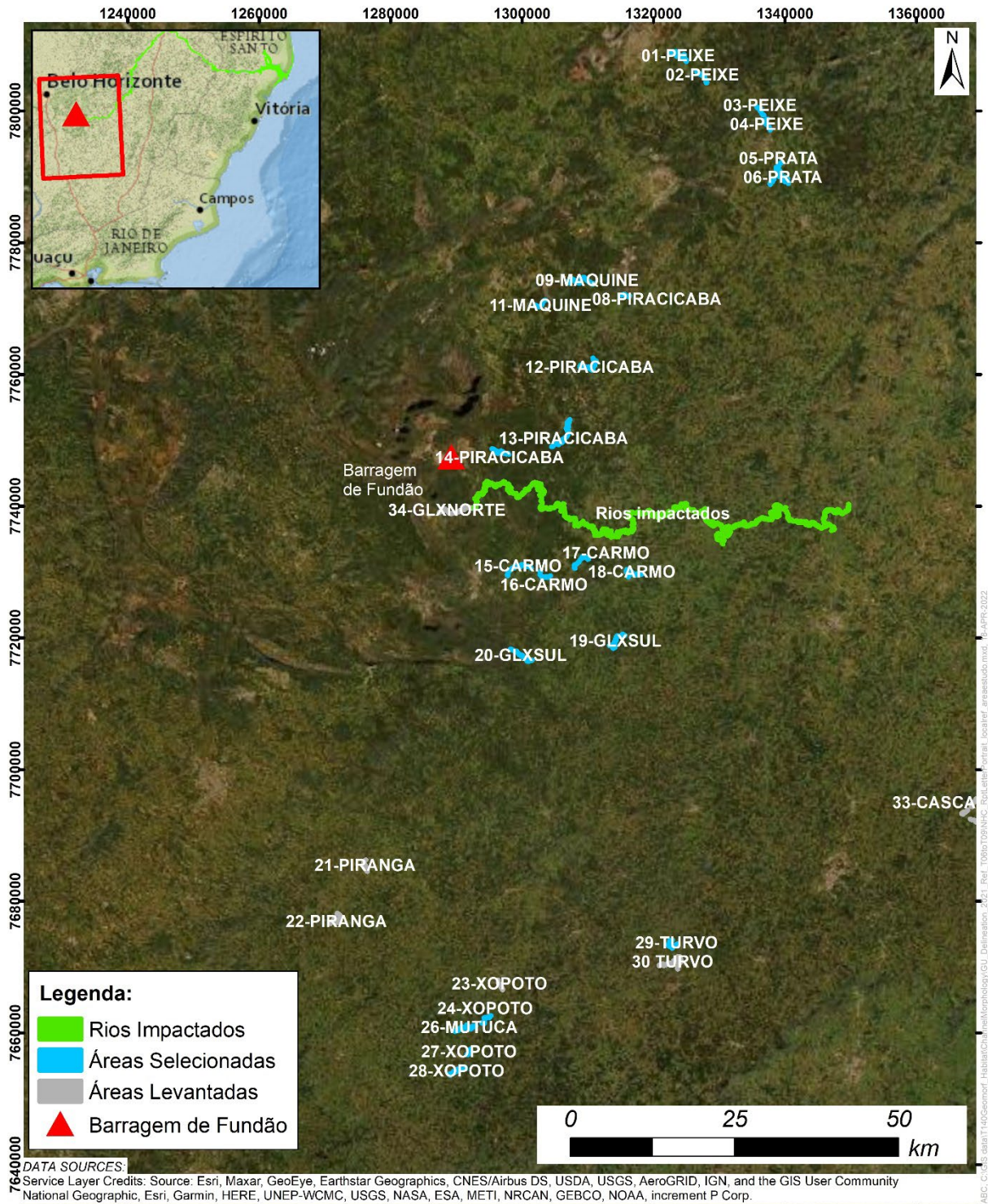
Figura 1 – Área de estudo principal e trechos do PMR correspondentes ao Rio Gualaxo do Norte (T06 a T09), Rio do Carmo (T10) e Rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T11).



Referências: Sirgas 2000, 23S

Service Layer Credits: Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community National Geographic, Esri, Garmin, HERE, UNEP-WCMC, USGS, NASA, ESA, METI, NRCAN, GEBCO, NOAA, increment P Corp.

Figura 2 – Área de estudo – Trechos selecionados de rios da região com similaridade aos trechos impactados do rio Gualaxo do Norte¹⁵ e rios diretamente afetados pelo rompimento entre o T06 e T11.



¹⁵ No total foram selecionadas 34 áreas de levantamento em rios da região, totalizando 66 trechos de referência. A numeração é diferente da apresentada na descrição dos trechos de referência selecionados (item 8 e Apêndice A), pois segue a numeração adotada na fase do levantamento de campo, e trechos de referência foram desconsiderados por fatores como visibilidade do leito (veja item 8 e Apêndice C).

Tabela 1 – Descrição dos trechos estudados.

TRECHO	DESCRIÇÃO	COMP. (km)	RK (aprox..)
6	Rio Gualaxo do Norte, montante do Córrego Santarém (área de remanso durante o evento)	5,9	113,1 - 119,0
7	Rio Gualaxo do Norte, logo a jusante da confluência	3,6	109,5 - 113,1
8	Rio Gualaxo do Norte na região da PCH Bicas (cascata e majoritariamente confinado)	8,9	100,6 - 109,5
9	Rio Gualaxo do Norte a jusante da região da PCH Bicas (maiores planícies aluviais)	60,8	42,5 - 100,6
10	Rio do Carmo	25,6	16,9 - 42,5
11	Rio Doce a montante do reservatório de Candonga	7,1	10,8 - 16,9
Total		111,8	

5. Referencial teórico

As características físicas de um rio (sumarizadas pelo parâmetro habitat físico) possuem forte relação com o funcionamento do sistema fluvial, sendo um fator de grande importância para a recuperação ambiental de rios que sofreram impactos de natureza física (como o caso da área de estudo).

Habitats físicos podem ser definidos como uma composição de áreas que possuem características físicas morfológicas (material predominante na camada ativa, superficial, e forma do leito) e características hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento) distintas. Esses trechos de diferentes naturezas fornecem também habitats distintos para os organismos aquáticos (Montgomery & Buffington, 1997, 1998; Bisson e colaboradores, 2017).

Segundo Suska et al. (2020), a complexidade dos habitats fluviais é um dos fatores que embasam a recuperação de rios que sofreram impactos de natureza física. Do ponto de vista estrutural, a complexidades de habitats está associada à sua diversidade, que por sua vez está associada a presença de áreas com diferentes velocidades de fluxos e profundidades. A qualidade dos habitats está relacionada à composição do canal, que envolve a granulometria do material de leito, presença de barras de sedimentos e outros materiais modificadores (matacões, leitos rochosos, pedaços de madeira, por exemplo).

5.1. Mapeamento sistemático de canais fluviais

A identificação de habitats físicos e seu mapeamento é realizado com base na avaliação de características do leito fluvial e do escoamento. Considerando o difícil acesso por terra em parte do trecho a ser estudado, em especial ao longo do rio Gualaxo do Norte, foi utilizada uma abordagem baseada em imagens aéreas de alta resolução obtidas com drone em sobrevoo de baixa altitude, semelhante aos procedimentos adotados e/ou recomendados em Rinaldi e Colaboradores (2012), Janisch (2013) e Belletti e colaboradores (2015) para levantamentos em escala de bacia hidrográfica. As imagens registradas permitem eventual reavaliação dos resultados, mesmo após mudanças das condições de campo (i.e., após a ocorrência de evento de cheia).

Considerando a necessidade de se observar as características do leito, as imagens aéreas devem ser obtidas em condições de baixas vazões (baixas profundidades) e baixa turbidez, tipicamente observadas durante a estação seca. Imagens com ângulo Nadir – tiradas com a câmera apontando diretamente para baixo – em período com baixo sombreamento (comumente entre 10 h e 15 h) são as mais adequadas. As imagens devem ser georreferenciadas e processadas por meio de ortorretificação, 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.

Para o mapeamento de habitats, as escalas características para avaliação por ortofotos variam conforme a natureza do rio, podendo variar entre 1:100 e 1:2000. A escala de análise deve considerar a dimensão do rio e em especialmente a capacidade de visualização de elementos imersos, como troncos e rochas, e eventual necessidade de visualização de material do leito (i.e., identificar material de granulometria equivalente a cascalho).

A interpretação é feita visualmente e são distinguidas com base nas características físicas de sua morfologia (material e forma do leito) e hidráulicas (profundidade e velocidade do escoamento). As imagens previamente georreferenciadas e processadas são inseridas em programas de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) e, com o auxílio de suas ferramentas o mapeamento é usualmente iniciado com o delineamento manual das margens do rio (delimitação de um primeiro polígono), e das áreas secas do canal, correspondentes à bancos de sedimentos aparentes, rochas, troncos, etc. (delimitação de um segundo polígono). A partir

desses delineamentos, é possível determinar o canal ativo¹⁶ do rio e sequencialmente são delimitadas as áreas de abrangências das unidades de habitats físicos ao longo do rio.

Uma descrição mais detalhada, incluindo apresentação de um referencial teórico mais abrangente é apresentado no apêndice D.

5.2. Classificação de habitats físicos

Vários métodos e protocolos foram desenvolvidos para o levantamento, caracterização e classificação de habitats físicos em rios (por exemplo: Platts e colaboradores, 1983; Raven e colaboradores, 1997). Eles fornecem uma estrutura dentro da qual unidades de habitat podem ser delineadas e amostradas. No entanto, os métodos mais antigos de avaliação de habitat físico apresentam algumas limitações (Belletti et al., 2015). Anteriormente a terminologia usada para descrever habitats físicos na maioria dos levantamentos de habitats era simplista quando comparada ao atual. A maioria dos trabalhos das décadas de 80 e 90 descrevem a configuração do leito do rio apenas como corredeiras ou poços. Nos trabalhos mais atuais outras unidades geomórficas são consideradas (cascatas, corredeiras, rápidos, remansos/poços, estruturas alternadas de quedas e poços – *step and pool*, etc.).

A Tabela 2 apresenta as classes de habitats físicos utilizados no mapeamento sistemático do canal fluvial do presente trabalho¹⁷. A Figura 3 ilustra a estrutura conceitual dos habitats físicos incluídos no mapeamento sistemático do canal fluvial, conforme as classes selecionadas para o estudo.

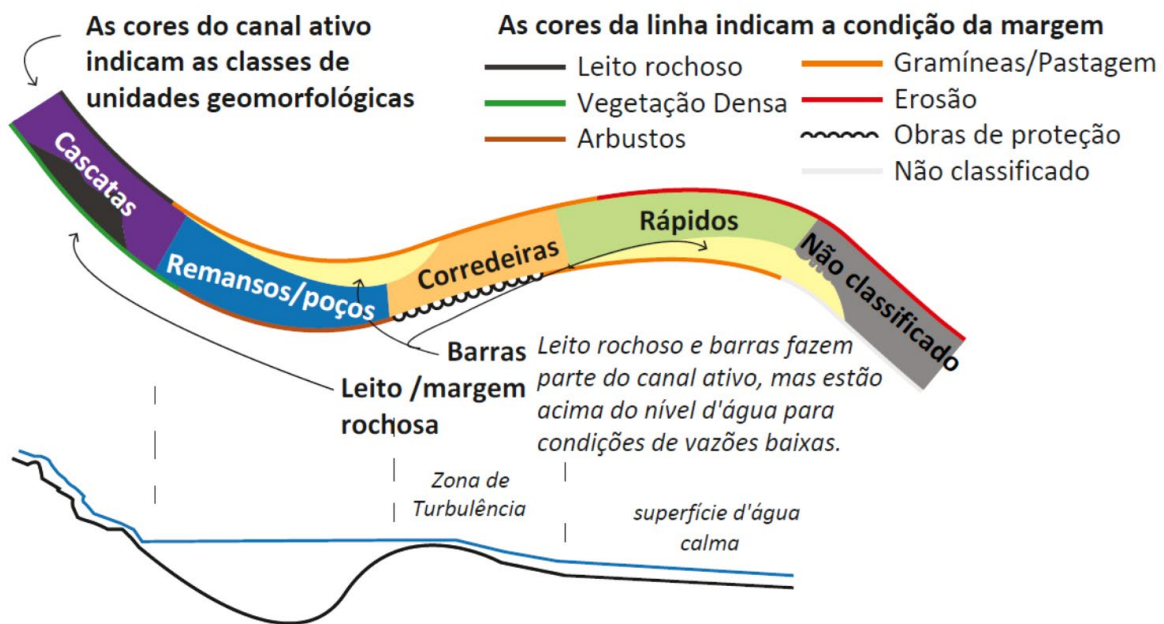
¹⁶ Canal ativo, ou Leito menor, é a área ao longo do leito do rio onde a combinação de velocidade da vazão, intensidade do transporte de sedimentos e duração da inundação impede o crescimento da vegetação.

¹⁷ Ressalta-se que existem outras formas de classificação de habitats físicos mais e menos detalhadas. A escolha pelo uso de quatro “macro” classes (mesohabitats) teve como base a escala do estudo e a necessidade de comparação entre diferentes momentos (referência, 2019 e 2021), onde se antecipa que um menor número de classes torna mais robustos, estatisticamente falando, os resultados das comparações.

Tabela 2 – Classes de habitats físicos utilizados no mapeamento sistemático do canal fluvial.

CLASSE	FORMA TOPOGRÁFICA	VELOCIDADE DO FLUXO EM CONDIÇÕES DE BAIXA VAZÃO	PROFUNDIDADE RELATIVA
Poço/remanso (<i>pools</i>)	Leito côncavo, ponto mais profundo substancialmente abaixo do leito, em algum ponto a jusante	Lenta	Profunda
Rápido(s) (<i>runs/glides</i>)	Leito plano com gradiente moderado abaixo. Superfície da água levemente inclinada.	Moderado a lento	Moderado
Corredeira (<i>riffles</i>)	Leito plano, frequentemente pontos altos locais ao longo do perfil talvegue	Rápido, turbulento	Raso
Cascata (<i>cascades</i>)	Leito com inclinação íngreme.	Muito rápido (supercrítico)	Raso

Figura 3 - Estrutura conceitual dos habitats físicos utilizados no mapeamento sistemático do canal fluvial.



6. Hipóteses sobre o processo de recuperação das características físicas dos rios

A combinação entre a erosão do leito, margem e planícies de inundação dos rios seguida de deposição do material majoritariamente composto por rejeitos oriundos da barragem de Fundão alterou as características físicas dos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce a montante do reservatório de Candonga. Imediatamente após o evento, estes rios apresentavam pouca ou nenhuma heterogeneidade hidráulica e homogeneidade do material do leito (predominantemente fino).

A presença de habitats das classes corredeiras e remansos é um fator importante na avaliação da recuperação das características físicas dos rios, isso porque trata-se de tipos de habitats que não existiam imediatamente após o rompimento. O mesmo pode ser dito em relação a qualquer tipo diversidade de habitats físicos (i.e., alternância entre rápidos e outras classes de habitats). Deste modo, qualquer identificação de habitats do tipo remansos/poços e corredeiras, bem como o aumento da diversidade de habitats, são indícios de recuperação das características físicas dos rios, e o índice de presença dessas classes de habitats pode auxiliar na avaliação do grau de recuperação dos rios. Deve ser notado que os habitats do tipo cascata já se encontravam visíveis pouco tempo após o rompimento¹⁸, fato atribuído ao elevado gradiente energético do escoamento que ser capaz de manter partículas de material fino em suspensão, inibindo que sua deposição altere as características físicas destes locais.

Considerando que material depositado em praticamente toda a área impactada dos rios era majoritariamente composto por rejeitos (caracterizados por granulometria fina, silte ou menor), qualquer identificação de material mais grosseiro (areias, cascalho, pedra de mão, ou maior) indica que o rejeito que ali existia após o evento foi removido (processo de erosão seletiva, do inglês *sorting*) e houve alguma recuperação das características físicas do rio, de modo que, para atingir o objetivo proposto, não é necessário a identificação direta do material fino. Ainda que a identificação de areias no leito do rio também possa ser interpretada como recuperação das características físicas, para a avaliação de habitats físicos, a identificação de cascalho, pedra de mão/seixos, ou maior, na camada superficial do leito é mais pertinente, pois

¹⁸ Não há evidências de que tenha ocorrido grandes alterações nas áreas ocupadas por cascatas.

esse material é tipicamente associado a habitats do tipo corredeiras, os quais não estavam presentes imediatamente após o rompimento.

Para se testar as hipóteses de recuperação das características físicas dos rios foram avaliados os seguintes parâmetros:

- Presença percentual de habitats do tipo corredeiras e poços/remansos (“não rápidos”)
- Presença percentual de habitats do tipo corredeiras
- Presença percentual de material grosseiro
 - Presença percentual de material grosseiro por classe de habitat físico

7. Cenários avaliados

O presente trabalho considera três diferentes cenários para a avaliação da evolução da presença de habitats, os quais são descritos a seguir:

- **Cenário de referência:** condição representativa da situação de presença de habitats nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce à montante;
 - Rio Gualaxo do Norte (T06 à T09): baseado em informações levantadas de rios da região com características similares ao Gualaxo do Norte durante a estação seca de 2021 e seleção de imagens anteriores ao rompimento, ano de 2014, para o trecho T09;
 - Rio do Carmo e rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10 e T11): baseado em informações anteriores ao rompimento, ano de 2014;
- **Cenário 2019:** situação da presença de habitats durante a estação seca de 2019;
- **Cenário 2021:** situação da presença de habitats durante a estação seca de 2021.

Maiores informações sobre a seleção das imagens utilizadas e procedimentos de levantamento são apresentadas no item 8, e Apêndice A, Apêndice B e Apêndice C.

Considerando o comportamento geral da área de estudo quanto aos processos fluviais e de transporte de sedimentos, rios de cabeceira com tendência à erosão do leito e transporte de material para jusante, é possível afirmar que as características físicas do rio (i.e., presença de habitats físicos) é majoritariamente definida pelos maiores eventos de cheia que ocorreram. Permitindo inferir que as características observadas durante a estação seca sejam representativas e consideram as eventuais alterações físicas desencadeadas durante a estação chuvosa, e de eventos significativos que tenham ocorrido.

8. Seleção e levantamento de imagens aéreas

As imagens aéreas são a base de dados primordial do presente estudo. Imagens aéreas foram tomadas como base ao mapeamento sistemático de habitats físicos dos rios impactados, bem como à definição das condições de referência ao rio Gualaxo do Norte, pelo mapeamento de rios da região (abordagem do tipo *space-for-time substitution*). Considerando a necessidade de observar as características do leito, as imagens aéreas foram obtidas na estação seca de 2019 e 2021, isto é, sob condições de baixas vazões (profundidades) e baixa turbidez¹⁹.

Conforme apresentado no item 7, cada cenário avaliado utilizou uma base de dados específica. Para o cenário de referência dois conjuntos diferentes de dados foram utilizados. Além do imageamento de alta resolução, imagens de satélite de antes do rompimento também serviram de base para definição da condição de referência no rio do Carmo e rio Doce. Ressalta-se que não foi possível utilizar a mesma abordagem adotada no rio Gualaxo do Norte pois não existem rios próximos e com características similares ao rio do Carmo e rio Doce em quantidade adequadas para garantir robustez estatística nas comparações. Adicionalmente, não se tem conhecimento da existência de imagens de alta resolução prévias ao rompimento com cobertura/abrangência adequada.

Para o cenário de referência dos trechos T10 e T11 (rios do Carmo e Doce) foram selecionadas imagens de satélite de momento antes do rompimento. As imagens selecionadas do banco de dados do Google Earth foram capturadas em 31/05/2014 pelo satélite CNES (Agência Espacial Francesa) / Airbus fornecida pelo Consórcio Aeroespacial Maxar Technologies ao Google Earth. Após o georreferenciamento apresentaram resolução média de 0,35 m de pixel. Destaca-se, no entanto, que as imagens com resolução de 1 m de pixel, ou maior, são utilizadas com sucesso para a realização do mapeamento de habitats físicos na escala de trabalho que será utilizada (Wright et al., 2000; Marcus, 2002), não sendo isto considerado um fator crítico para o atendimento do objetivo de mapeamento de habitat e de condição das margens, no entanto elas não são adequadas para classificação do material predominante do leito. Ressalta-se que foi realizado o georreferenciamento das imagens com base em aerolevantamentos mais recentes e de maior resolução (imagens do levantamento RPA03²⁰,

¹⁹ No ano de 2019 foi realizado um estudo piloto de mapeamento de habitats no contexto de se avaliar a viabilidade da aplicação das técnicas de mapeamento de habitats com uso de imagens. NHC (2020). Não há imagens nos demais anos com resolução compatível com os objetivos gerais do estudo.

²⁰ Trabalhos referentes aos estudos de classificação do uso e ocupação do solo e monitoramento das ações de restauração ambiental do PG-25. Apêndice A

Geopixel, 2019) para minimização das incertezas do uso destas imagens para cálculo de área (conforme apontado por Silva e Nazareno, 2009; Boothroyd e colaboradores, 2020). Uma descrição mais abrangente do processo de seleção das imagens é apresentada no Apêndice B.

É importante ressaltar que as opções que de trechos de rios com características similares ao T10 e T11 são muito limitadas, o que levaria a necessidade de se utilizar vários trechos em um mesmo rio para garantir robustez estatística, o que poderia introduzir uma eventual tendência na análise²¹, ou de utilização de trechos de rios que não possuem muita similaridade²².

Nos trechos de T06 a T09, o rio Gualaxo do Norte possui calha mais confinada e com maior presença de vegetação ciliar, especialmente nos trechos mais a montante (T06 à T08), que no geral dificulta, ou mesmo impede, a visualização do leito do rio em uma parcela significativa dos trechos. Em parte do trecho T09, devido a menor presença histórica de vegetação ciliar, associada ao maior porte do rio, foi verificado que existem imagens de satélite de momento anterior ao rompimento que possibilitam a realização do mapeamento de habitats e de condição das margens em áreas do T09²³, no entanto elas não são adequadas para classificação do material predominante do leito.

Deste modo, cenário de referência dos trechos de T06 a T09 optou-se por utilizar uma combinação entre imagens levantadas durante a estação seca de 2021²⁴ em rios da região com características similares ao rio Gualaxo do Norte e imagens de satélite de momento antes do rompimento para algumas áreas do trecho T09. Um total de 56 trechos de comprimento aproximado variando de 1 a 3 km, sendo 53 trechos de rios da região foram selecionados e 3 trechos do rio Gualaxo do Norte (imagens históricas). Uma descrição mais abrangente do processo de seleção dos trechos de referência e das imagens é apresentada no Apêndice A, e

²¹ Trechos de rios com área de drenagem similar ao T10 e com similaridades se limitam a região de cabeceira do Piranga. Não foram identificados rios com área de drenagem similar ao T11 que não tenham sido diretamente afetados pelo rompimento.

²² No caso do T10 o baixo curso do rio Casca e do rio Matipó, e médio curso do Suaçuí Grande possuem áreas de drenagem similares ao trecho afetado do rio do Carmo, mas possuem regime hidrológico distinto. No caso do T11 o baixo curso do rio Santo Antônio, rio Suaçuí Grande e rio Manhauçu possuem áreas de drenagem similares ao trecho impactado do rio do rio Doce a montante do reservatório de Candonga (T10), mas possuem regime hidrológico distinto.

²³ A avaliação do uso de imagens históricas para definição da condição de referência no rio Gualaxo do Norte foi uma sugestão feita pela CT-GRSA durante a fase de elaboração e discussão do plano de trabalho do presente estudo. Corresponde a requisição número 3 Nota Técnica CT-GRSA Nº 10 de 2021 que aprovou o plano de trabalho.

²⁴ Aerolevantamento realizado com “drone” (VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado) entre agosto e setembro de 2021.

maiores informações sobre o levantamento de campo, equipamentos empregados e procedimentos de tratamento das informações das imagens e de topografia são apresentadas no Apêndice C.

Para o cenário 2019 foram utilizadas imagens existentes de altíssima resolução levantadas pela NHC para a finalidade de mapeamento de habitats físicos²⁵ (NHC, 2020) combinadas com imagens de alta resolução dos levantamentos RPA02 e RPA03 (Geopixel, 2019), originalmente realizados para estudos de classificação do uso e ocupação do solo e monitoramento das ações de restauração ambiental do PG-25. O levantamento da NHC possui resolução aproximada de 2 cm e abrange o rio Gualaxo do Norte, com cobertura quase completa, e os levantamentos RPA02 e RPA03 possuem resolução espacial de 10 cm e abrangem toda a área principal de estudo (T06 à T11)²⁶. Para o rio Gualaxo do Norte foram utilizadas preferencialmente as imagens da NHC complementadas pelas imagens do RPA03, e nos rios do Carmo e Doce foram utilizadas majoritariamente as imagens do RPA03, sendo as imagens do RPA02 utilizadas somente entre o RK-11 e RK-24, trecho em que as imagens RPA03 apresentavam elevada turbidez e não permitiam boa visualização do leito. Uma descrição mais abrangente do processo de seleção das imagens é apresentada no Apêndice B.

Para o cenário 2021 foi realizado aerolevanteamento durante a estação seca de 2021²⁷ com abrangência completa do curso dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce ao longo dos trechos T06 ao T11. Juntamente com a aquisição de imagens foi realizado levantamento topográfico utilizando LiDAR embarcado no VANT. As imagens processadas²⁸ possuem resolução média de 2 cm. Maiores informações sobre o levantamento de campo, equipamentos empregados e procedimentos de tratamento das informações das imagens e de topografia são apresentadas no Apêndice C.

²⁵ O levantamento em questão foi realizado no contexto de se avaliar a viabilidade da aplicação ao estudo de caso das técnicas de mapeamento de habitats com uso de imagens. NHC (2020). Ressalta-se que o presente estudo utilizou a base de dados do referido trabalho (imagens), e não seus resultados.

²⁶ As imagens do levantamento RPA02 foram coletadas entre outubro e novembro de 2017, e imagens do levantamento, RPA03 coletadas na estação seca de 2019 (junho e agosto). Apesar da diferença de datas optou-se por se utilizar as imagens do RPA02 em alguns locais onde as imagens do RPA03 apresentavam elevada turbidez, o que resulta em maior ambiguidade/incerteza na interpretação da morfologia do rio.

²⁷ Aerolevanteamento realizado com “drone” (VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado) entre agosto e setembro de 2021.

²⁸ As imagens foram processadas para a formação de um ortomosaico, sendo tratadas para homogeneização da cor, brilho e contraste, e eliminação de emendas visíveis. Nas regiões em que a mosaicagem automática não apresentou qualidade satisfatória, foram feitas correções manuais, com intervenção do operador. A comparação do traçado do rio com as imagens do RPA03 foi satisfatória, assegurando consistência entre os levantamentos, bem como resultados obtidos com base nos diferentes conjuntos de imagens.

9. Mapeamento de habitats físicos e do canal fluvial

Conforme mencionado, a avaliação realizada no estudo toma como base imagens aéreas, sendo as análises realizadas em ambiente SIG, utilizando o programa ArcMap 10.8.1. As feições identificadas foram delimitadas manualmente e classificadas por meio de fotointerpretação.

9.1. Delimitação do canal

O primeiro passo para a caracterização geomorfológica do canal foi o delineamento das margens do rio, as quais definem a abrangência do canal ativo. O canal ativo é definido como a área ao longo do rio onde a combinação de velocidade da vazão, intensidade do transporte de sedimentos e duração da inundação impede o crescimento da vegetação – ou seja, inclui bancos de sedimentos, por exemplo, mas exclui margens a partir de onde há vegetação ou ilhas vegetadas, e parte do canal maior (ou leito maior) que inclui as áreas inundáveis somente em eventos de grandes vazões. Posteriormente delimitação das margens, o canal ativo foi subdividido em canal molhado (considerado no momento em que a foto aérea foi capturada), e em área seca do canal²⁹. A Figura 4 exemplifica a classificação de canal molhado e área seca do canal ativo.

9.2. Condição das margens

A composição das margens por vegetação densa é um importante parâmetro de análise da condição das margens e sua influência nos habitats. É responsável por promover estabilidade dos taludes das margens, minimizando a formação de sulcos erosivos nos depósitos da planície de inundação, que por fim limita a entrada de sedimentos no fluxo de água. Além disso, a presença de vegetação ripária desenvolvida apresenta-se como uma fonte de materiais lenhosos para o meio aquático (truncos de madeira (LWD, do inglês *Large Wood Debris*). Quando depositados no canal ativo, os troncos de madeira promovem a formação de regiões com diferentes perfis de velocidade de fluxo, sendo agentes indutores de transformações físicas no canal fluvial. A vegetação ripária também tem um importante papel no aporte de matéria

²⁹ São consideradas “áreas secas” as áreas com configurações de barras (acúmulos deposicionais de material de leito dentro do canal ativo) e/ou plataformas rochosas que estão na área do canal ativo definida,

orgânica nos rios. Como consequência, fomentam a qualidade dos habitats e promovem o desenvolvimento da diversidade e abundância da biota local.

As margens foram classificadas como:

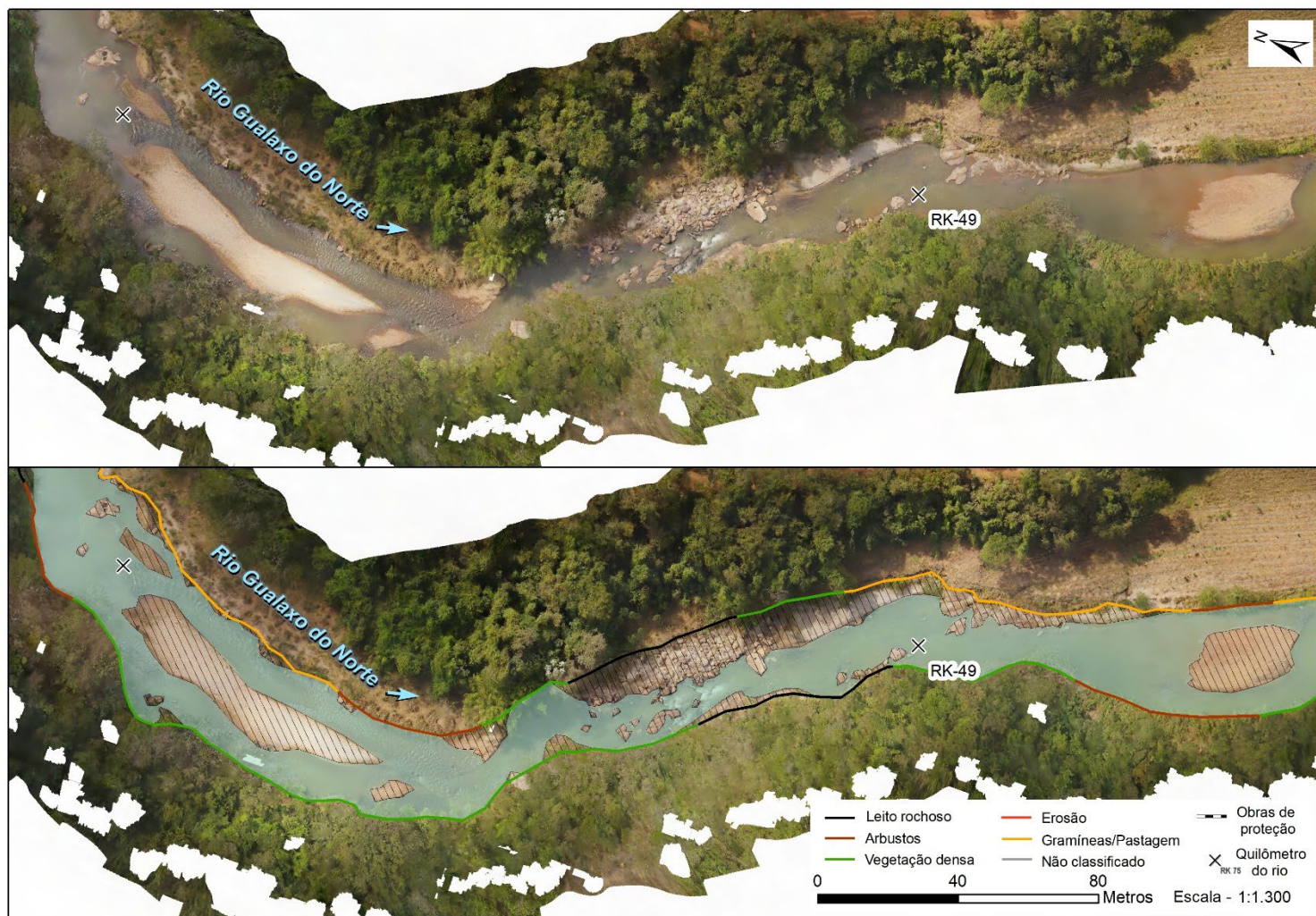
- Vegetação densa – cobertura espessa de copas e vegetação projetada (geralmente árvores de maior porte);
- Arbustos – vegetação de menor porte e arbustos;
- Grama ou pastagem – áreas onde animais haviam pastado, resultando em vegetação rasteira muito curta com uma quantidade mínima de arbustos;
- Proteção de talude – presença de estruturas artificiais de enrocamento utilizadas para auxiliar na estabilização dos depósitos de rejeitos nas margens e planícies de inundação³⁰;
- Erosão – áreas da margem que possuíam processo de erosivo³¹; e
- Leito rochoso – afloramento natural que não é classificado como barra de sedimentos.

A Figura 4 exemplifica a classificação da condição das margens.

³⁰ Obras de controle de erosão realizadas utilizando técnicas de bioengenharia, como biomantas e estruturas de troncos da renaturalização, não se enquadram nesta classe.

³¹ Inclui processos erosivos desenvolvidos por processos naturais ou antrópicos, como por exemplo em áreas de extração mineral.

Figura 4 - Exemplo de delimitação de canal molhado (transparência esverdeada) e área seca (hachura), os quais acoplados compõem o canal ativo, e classificação das condições de margens. Esse trecho está localizado no T09 RK-49, no município de Barra Longa. Nessa área é possível observar diversos bancos de sedimentos e também aflorações rochosas.



9.3. Material predominante na camada ativa do leito

Para cada unidade de habitat físico foi atribuída uma classe de material predominante do leito³². Além da caracterização da classe de material preponderante no leito, o percentual de areia e materiais mais finos foi visualmente estimado para cada unidade de habitat mapeada. Esta é a informação base utilizada para a avaliação da métrica da predominância de material grosseiro no leito dos rios, a qual corresponde a uma métrica de avaliação da qualidade dos habitats.

A resolução da imagem (tamanho do pixel) define qual a menor partícula que é possível de ser identificada. De maneira simplificada, quando as partículas do material do leito são menores que a resolução da imagem, múltiplas partículas estarão dentro da área representada em um pixel, e a coloração do pixel será “uma média” da coloração das partículas, denotando homogeneidade na coloração e ausência de textura ao longo de uma área formada por partículas com esta característica granulométrica. Quando uma partícula tem tamanho similar ao do pixel da imagem, os pixels representam cada partícula quase que individualmente³³, considerando a diferença de coloração dos grãos e o efeito de sombra que uma partícula faz na outra, a imagem resultante de uma área com esta característica granulométrica será de uma textura de cores. Situação análoga ocorre no caso de partículas maiores que o pixel, sendo possível identificar visualmente cada partícula de forma independente.

No presente estudo buscamos identificar materiais “grosseiros”, como cascalho, pedra de mão ou material maior³⁴, que não se encontravam na camada superficial do leito logo após o rompimento (ao menos de maneira predominante). Neste contexto, os levantamentos de campo foram planejados para se obter imagens com resolução compatível para a identificação da fração granulométrica cascalho³⁵. Destaca-se que no presente trabalho o termo “finos” se refere a material de granulometria equivalente a areias ou menor (partículas menores que 2 cm),

³² Foi identificado qual era o tipo de material predominante que ocupava a maior porção da unidade de habitat físico identificada. De modo que podem existir habitats classificados como cascalho com pequenas áreas ocupadas por material predominantemente fino. Não foi realizada a delimitação e mapeamento das áreas ocupadas por cada classe adotada.

³³ Mesmo nos casos em que a partícula tenha tamanho similar ao pixel, ou mesmo casos em que a partícula seja maior, dois ou mais pixels podem representar partes de uma partícula devido a diferenças no alinhamento.

³⁴ A fração cascalho (ou pedregulho) corresponde a material entre 2 e 6 cm de diâmetro, a fração pedra de mão corresponde a material entre 6 e 20 cm de diâmetro, conforme classificação da NBR 6502 (ABNT, 1995).

³⁵ As imagens do levantamento realizado possuem resolução (tamanho do pixel) de ~2 a 4cm.

as quais não conseguem ser identificados individualmente em função da resolução das imagens utilizadas.

Desta maneira foram definidas as seguintes classes de material predominante na camada ativa do leito: cascalho; pedra de mão/seixos³⁶; matacão; leito rochoso; areias ou material mais fino (claro); e areias ou material mais fino (escuro).

A classe cascalho é caracterizada nas imagens pela presença de textura em pequena escala, mas sem definição nítida do formato de cada partícula. No caso da classe pedra de mão, adicionalmente a textura é possível identificar individualmente cada grão/partícula. No caso das classes matacão³⁷ e leito rochoso é nítida a identificação das grandes estruturas de rocha características dessas formações.

Já as classes de areias ou material mais fino claros e escuros são caracterizadas pela ausência de textura e coloração homogênea ao longo da área com presença deste tipo de material. A diferenciação entre claro e escuro tem como embasamento as observações dos trabalhos iniciais do plano de manejo de rejeitos (CH2M, 2017; CH2M/JACOBS, 2018a,b,c) e do painel de experts que avaliou as causas do rompimento (Morgenstern *et. al*, 2016). Ainda que o material classificado no presente estudo como “Areias ou material mais fino (claros)” provavelmente corresponda à sedimentos originados em áreas não impactadas da bacia (majoritariamente), dotando o princípio da precaução, a inferência da recuperação da qualidade dos habitats do rio Gualaxo do Norte³⁸ foi realizada com base na presença de material grosseiro.

Exemplos da classificação dos materiais predominantes na camada ativa do leito são apresentados na Figura 5.

³⁶ Nas tabelas dos arquivos vetoriais e tabelas dos relatórios foi adotada a nomenclatura “pedras/seixos”

³⁷ A fração matacão corresponde a material entre 0,2 e 1,0 m de diâmetro, conforme classificação da NBR 6502 (ABNT, 1995).

³⁸ Conforme já apresentado, as imagens utilizadas para definição da condição de referência nos rios do Carmo e Doce, bem como o conjunto de imagens utilizado para o ano de 2019 não permitem a identificação/classificação de frações grosseiras menores como o cascalho, inviabilizando a análise comparativa da composição do leito nestes rios. Destaca-se foi realizado a classificação do material predominante do leito para o cenário 2021, o qual poderá ser utilizado em comparações futuras. Os resultados estão apresentados no Apêndice F.

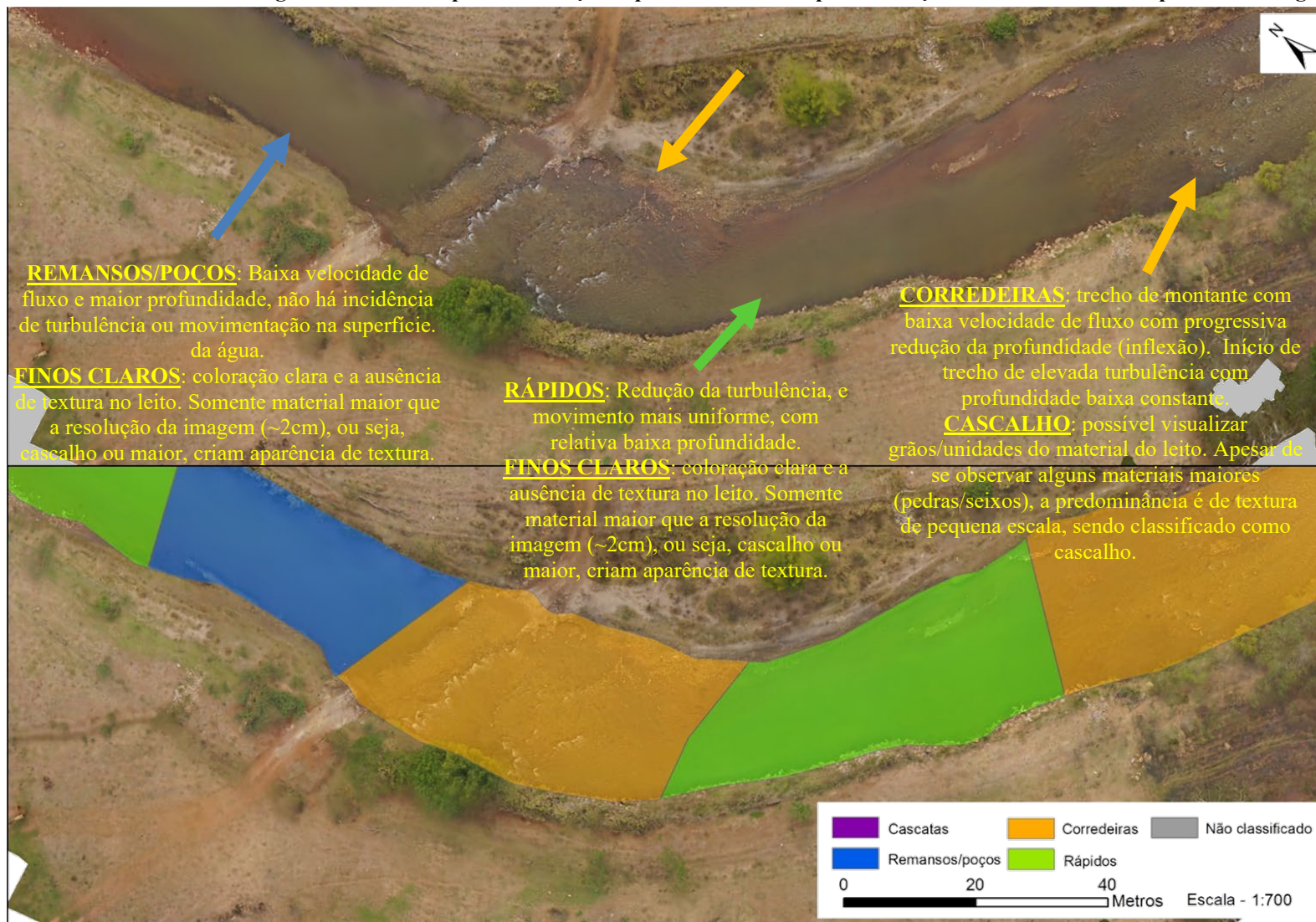
9.4. Habitats físicos

O canal molhado foi subdividido em unidades de habitats físicos individuais, conforme classes apresentadas na Tabela 2. As feições do leito (i.e., alterações na profundidade e locais de inflexão do perfil longitudinal), características do escoamento (condições de turbulência e profundidade), bem como a composição predominante do material da camada ativa do leito, são as informações utilizadas na classificação e mapeamento de habitats físicos.

Em termos práticos, foram delimitados polígonos correspondentes a área de abrangência de cada unidade de habitat físico identificada, sendo posteriormente calculado a área de cada unidade de habitat. O mapeamento sistemático realizado inclui a análise quantitativa da presença percentual dos habitats físicos³⁹. Esta abordagem adotada possibilitará avaliar a evolução da presença de habitats físicos nos rios, e condições físicas em geral. A Figura 5 exemplifica a classificação dos habitats físicos, destacando as feições utilizadas para delimitação das diferentes classes de habitats.

³⁹ A presença percentual dos habitats físicos foi calculada para as classes corredeiras, rápidos e Poços/remansos por meio da divisão da somatória da área das unidades de habitats da referida classe pela área do canal molhado. Especificamente nas comparações realizadas utilizando procedimentos estatístico (Apêndice G) foi descontada a área ocupada por cascatas para minimizar a influência da presença das cascatas, as quais permaneceram imutáveis com o tempo.

Figura 5 – Exemplo de delimitação das classes de habitats físicos e classificação o material predominante na camada ativa do leito. Esse trecho está localizado no T09 RK-61, próximo ao subdistrito de Barreto (Barra Longa, MG). São representadas as três classes mais frequentes nos rios estudados: Corredeiras, rápidos e remansos. Notas explicativas foram adicionadas à figura afim de exemplificar as feições típicas identificadas para definição dos habitats físicos a partir das imagens aéreas.



10. Resumo dos resultados

Os mapas dos apêndices de apresentação dos resultados⁴⁰ apresentam as unidades de habitats físicos, a condição das margens, informações quanto a caracterização geomorfológica quanto ao grau de confinamento⁴¹, as imagens aéreas utilizadas nos mapeamentos entre os trechos T06 e T11 e nos rios de referência, nas datas mencionadas. Os mapas do Apêndice Q apresentam uma comparação direta dos resultados do mapeamento para o ano de 2019 e 2021.

Resultados quantitativos dos mapeamentos sistemáticos para as condições de referência e para os trechos T06 ao T11 nos anos de 2019 e 2021 são apresentados ao longo deste capítulo, e em maior detalhe no Apêndice F. As tabelas apêndices de apresentação dos resultados⁴² apresentam as principais características de cada unidade de habitat físico mapeada (classe de habitat físico, classe de material predominante no leito do rio, coordenadas, área, comprimento, largura, qual trecho do PMR está inserido, entre outras informações).

As análises realizadas têm como base os trechos do PMR divididos pelos seus rios principais, utilizando as mesmas siglas adotadas pelas estações de monitoramento do PMQQS⁴³.

A Tabela 3 apresenta as principais características geomorfológicas dos trechos de análise, em específico apresenta informações quanto a declividade (média e desvio padrão, calculados entre pontos distantes em 250 m).

⁴⁰ Apêndice I, Apêndice K, Apêndice M, e Apêndice O.

⁴¹ Foi adotada o mesmo tipo de classificação geomorfológica pelo grau de confinamento apresentada em Golder (2016). A classificação realizada em Golder (2016) compreende os trechos T07 ao T11. Ela foi avaliada e não se julgou necessário realizar revisões. No âmbito do presente trabalho foi realizada a classificação do T06 e dos trechos de rios de referência.

⁴² Apêndice J, Apêndice L, Apêndice N, e Apêndice P.

⁴³ Significado das siglas que indicam aos rios: RGN – rio Gualaxo do Norte; RCA – rio do Carmo; RDO – rio Doce; RPG – rio Piranga. O Trecho 09 do PMR foi subdividido em T09-RGN e T09-RCA, e o trecho T11 em T11-RPG e T11-RDO.

Tabela 3 – Principais características da declividade dos trechos de análise.

Trecho	Declividade média (m/m)*	Média das declividades calculadas a cada 0.25 km)	Desvio Padrão das declividades calculadas a cada 0.25 km (m/m)
T06-RGN	0,0027	0,0027	0,0009
T07-RGN	0,0101	0,0092	0,0117
T08-RGN	0,0083	0,0081	0,0212
T09-RGN	0,0037	0,0037	0,0084
T09-RCA	0,0007	0,0021	0,0049
T10-RCA	0,0013	0,0013	0,0013
T11-RDO	0,0020	0,0019	0,0027
T11-RPG	0,0027	0,0011	0,0011
Total Geral**	0,0035	0,0035	0,0091

* As declividades médias foram calculadas considerando os pontos mais a montante e mais a jusante de cada trecho.

** A declividade média do Total Geral considera o ponto mais a montante do trecho T06-RGN e o ponto mais a jusante do trecho T11-RDO.

10.1. Análise do canal ativo

A presença percentual da área molhada e de barras e afloramentos rochosos em relação ao canal ativo nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce é apresentada na Figura 6 e na Tabela 4, sendo apresentadas a condição de referência e dos anos 2019 e 2021.

Enquanto no rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo a presença de áreas secas pode ser mais associada a depósitos e barras de sedimentos, no rio Doce as áreas secas estão associadas a grande presença de afloramentos rochosos. Isso reflete na diferença significativa da ordem de grandeza da presença percentual de áreas secas, sendo algo entre 14% e 20% no rio Gualaxo do Norte e Carmo e 34% a 50% no rio Doce.

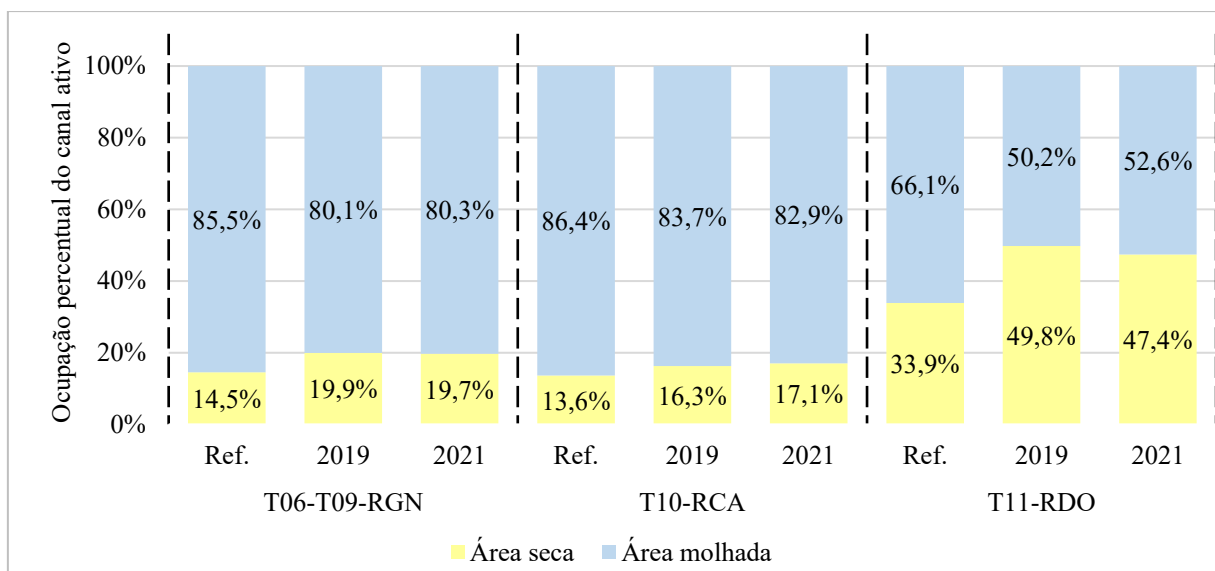
As condições observadas em 2019 e em 2021 não se alteram significativamente, possuindo diferença menor que 1 ponto percentual para o rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo, e diferença aproximada de 2,5 pontos percentuais para o rio Doce.

A referência adotada para o rio Gualaxo do Norte indica aproximadamente 5,2 pontos percentuais a menos de áreas secas que a condição observada para este rio em 2021, e a referência adotada para o rio do Carmo indica aproximadamente 3,5 pontos percentuais a menos que a condição observada para este rio em 2021.

No rio Doce (T11) as condições observadas na referência, 2019 e 2021 são distintas. É observada uma grande diferença em áreas de afloramentos rochosos, especialmente mais a jusante, estruturas estas que não foram alterados pelo rompimento (i.e., as rochas não foram erodidas – redução da área seca – e eventual deposição de material oriundo do rompimento – aumento da área seca – conseguiria ser visualmente diferenciada das rochas observadas), ressalta-se que esse comportamento não foi observado ao longo do rio do Carmo (áreas visíveis de afloramentos rochosos possuem grande similaridade). Essas observações permitem inferir que o nível d’água era semelhante no rio do Carmo no momento dos aerolevantamentos realizados, e que no rio Doce eram diferentes quando comparado o momento anterior ao rompimento e posteriores ao rompimento. Essa diferença pontual pode ter sido causada por uma condição de maior vazão do rio Piranga ou pela influência do remanso causado pelo reservatório da UHE Risoleta Neves (Candonga) se encontrava em operação em 2014 (ano de coleta das imagens adotadas para definição da referência).

A Figura 7 apresenta valores absolutos da largura média da área seca (barras de sedimentos e afloramentos rochosos) em relação ao canal ativo (informação apresentada a cada quilômetro) nos três períodos analisados⁴⁴. É notável o aumento da seção transversal dos rios principais após a confluência com o rio do Carmo e com o rio Piranga, refletindo a maiores vazões nestes trechos, devido a drenagem significativamente maior.

Figura 6 – Ocupação percentual em área do canal ativo (entre área seca e área molhada) nos trechos analisados para os cenários de referência, 2019 e 2021. A parcela em azul representa a proporção ocupada pelo canal molhado e a amarela a proporção ocupada pelas áreas secas.



⁴⁴ A condição de referência do rio Gualaxo do Norte não é apresentada nos gráficos, pois foi baseada em rios da região.

Figura 7 – Largura do canal molhado e da área seca no canal ativo, ao longo dos trechos de rios estudados. A parcela em azul representa a proporção ocupada pelo canal molhado e a amarela a proporção ocupada pelas áreas secas para os cenários de referência, 2019 e 2021.

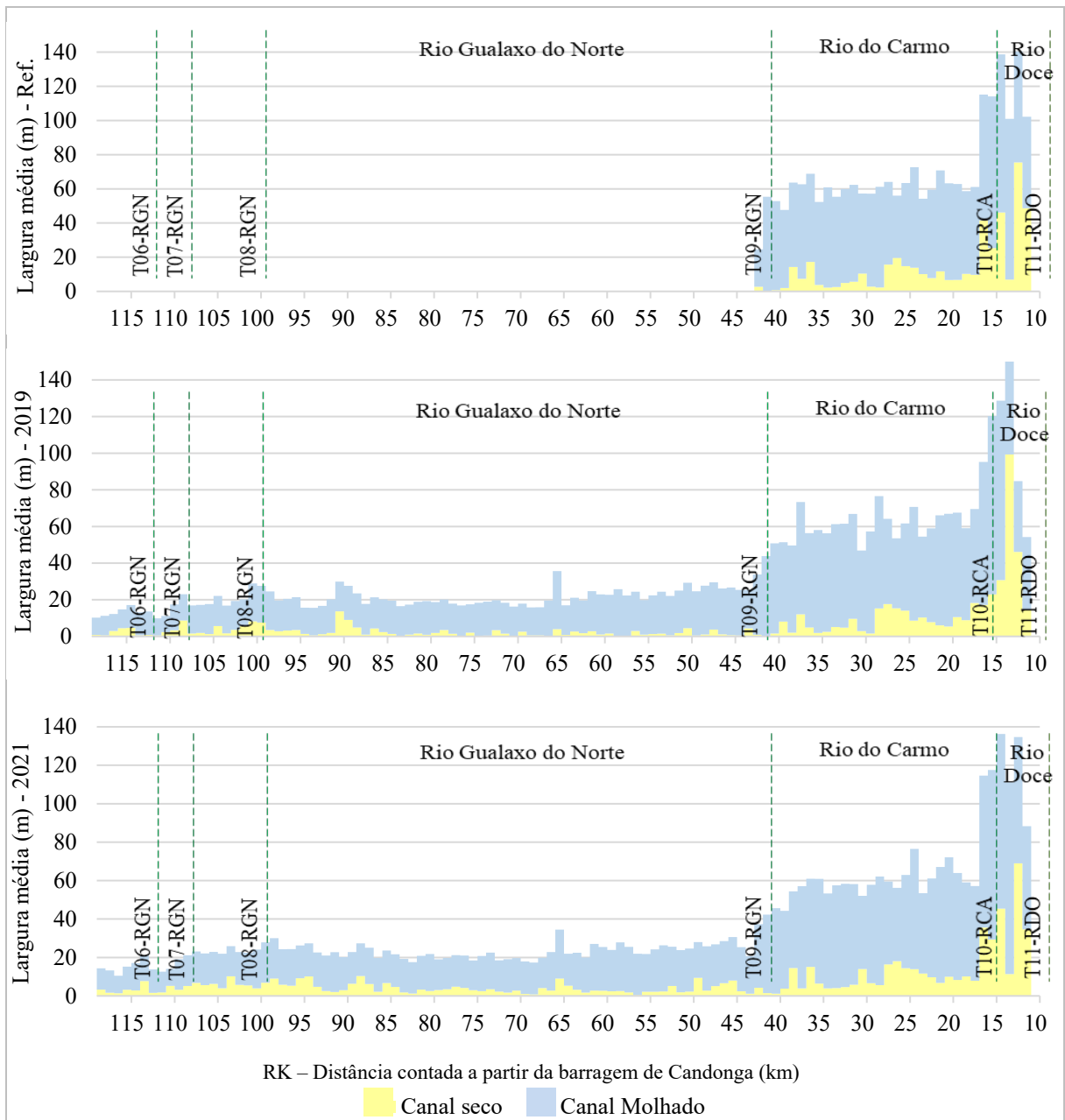


Tabela 4 – Ocupação percentual em área do canal ativo (entre área seca e área molhada) nos trechos os analisados para os cenários de referência, 2019 e 2021.

		Área molhada	Area seca
T06 a T09- RGN	Ref.	85,5%	14,5%
	2019	80,1%	19,9%
	2021	80,3%	19,7%
T10-RCA	Ref.	86,4%	13,6%
	2019	83,7%	16,3%
	2021	82,9%	17,1%
T11-RDO	Ref.	66,1%	33,9%
	2019	50,2%	49,8%
	2021	52,6%	47,4%

10.2. Habitats Físicos

A discussão sobre a recuperação dos rios impactados, quanto à presença de habitats físicos se baseia na diversidade e qualidade dos habitats. O esperado que exista alternância de habitats ao longo de um rio – entre cascatas, remansos, corredeiras e rápidos. Considerando as condições observadas logo após o rompimento, e as hipóteses da recuperação das características físicas do rio, a presença e diversidade de habitats físicos foi avaliada seguindo duas métricas: presença percentual de habitats do tipo corredeiras e poços/remansos (“não rápidos”); e presença percentual de habitats do tipo corredeiras (a qualidade dos habitats físicos é discutida no item 10.3).

Os principais resultados e a análise quanto a evolução da presença dos habitats físicos são apresentados a seguir. Todos os resultados e análises são apresentados relativos à presença de habitats físicos são apresentados nos apêndices, sendo apresentado no Apêndice F a discussão geral dos resultados, e do Apêndice I ao Apêndice P são apresentados mapas dos resultados do mapeamento para as condições de referência, 2019 e 2021, e também tabelas com características de cada unidade de habitat mapeada (por exemplo coordenadas, classe de habitat, presença de material grosseiro, área, comprimento, largura, entre outras), e o Apêndice Q uma comparação direta dos resultados de 2019 e 2021.

A Figura 8 e a Tabela 5 apresentam a comparação dos cenários avaliados por rio impactado. Ainda que esses resultados possam indicar influência da área de drenagem na presença de corredeiras e remansos, sendo observado maior presença desses habitats no rio Gualaxo do Norte, seguido do Carmo e por último o rio Doce, a avaliação da variação espacial

em cada rio (Figura 9) não apresenta a mesma tendência de maneira proeminente. Deve ser ressaltado que o identificado como “Não classificado” para o rio Gualaxo do Norte corresponde a áreas em que a vegetação ciliar e seu sombreamento impediam a visualização das características do leito do rio (as áreas não classificadas correspondem à 0,1 e 0,2% para 2019 e 2021 respectivamente), enquanto que no rio do Carmo e Doce, isso não foi observado, e a limitação na classificação se deu devido a resolução das imagens e relativa maior turbidez (ressalta-se que as imagens utilizadas para o cenário de referência e 2019 não foram levantadas com o objetivo de realização de mapeamento de habitats, e que em 2021 foi possível classificar habitats em toda a extensão do T10 e T11), que implica na dificuldade de diferenciar habitats de águas calmas (rápidos e poços/remansos), mas pela turbulência ser mais facilmente identificada, a identificação de corredeiras não foi prejudicada nesses rios.

De 2019 para 2021 é observado aumento da presença percentual de corredeiras e de poços/remansos é observada nos três rios principais. Estes resultados corroboram a hipótese de que as características físicas dos rios estariam passando por mudanças devido aos processos de transporte de sedimentos (formados principalmente por processos de erosão seletiva do material fino do leito), e que estariam rumando a uma situação de maior diversidade de características físicas, incluindo a presença e diversidade de habitats.

Em relação as duas métricas avaliadas para presença e diversidade de habitats (presença de corredeiras mais poços/remansos; e presença de corredeiras), o cenário de 2021 apresenta valores similares ou superiores a referência, o que pode ser interpretado como um forte indício de recuperação dos rios e similaridade com as características físicas do momento anterior ao rompimento.

Com a finalidade de proporcionar uma comunicação mais clara e direta da interpretação dos resultados da comparação dos cenários pós-rompimento com a referência, incluindo considerações metodológicas sobre as abordagens adotadas para definição do valor de referência, optou-se por apresentar em itens distintos os resultados e discussões para o rio Gualaxo do Norte (T06 ao T09), e para os rios do Carmo e Doce (T10 e T11).

Tabela 5 – Presença percentual dos habitats físicos nos rios analisados (cenário de referência, 2019, e 2021). No rio Gualaxo do Norte e respectivas referências a áreas consideradas como “Não Classificado” correspondem a locais em que a cobertura vegetal do canal ou seu sombreamento impedem a classificação. Nos rios do Carmo e Doce não há áreas em que a vegetação ciliar ou seu sombreamento impedem a classificação.

Trecho	Período	Habitats Físicos				
		Cascata	Corredeiras	Rápidos	Remansos /poços	Não Classificado *
Gualaxo do Norte T06-T09	Ref.	0,5%	27,4%	51,8%	14,2%	6,1%
	2019	2,8%	15,9%	73,8%	7,4%	0,1%
	2021	1,5%	40,2%	41,6%	16,5%	0,2%
Carmo T10	Ref.	0,0%	18,2%	33,9%	28,3%	19,5%
	2019	0,1%	18,1%	52,7%	11,5%	17,6%
	2021	0,2%	26,1%	56,7%	16,9%	0,0%
Doce T11	Ref.	1,3%	13,0%	22,5%	35,6%	27,7%
	2019	0,5%	15,0%	14,3%	9,9%	60,3%
	2021	1,2%	17,0%	42,8%	39,1%	0,0%

Figura 8 – Presença percentual dos habitats físicos nos rios analisados (cenário de referência, 2019, e 2021). No rio Gualaxo do Norte e respectivas referências a áreas consideradas como “Não Classificado” correspondem a locais em que a cobertura vegetal do canal ou seu sombreamento impedem a classificação. Nos rios do Carmo e Doce não há áreas em que a vegetação ciliar ou seu sombreamento impedem a classificação.

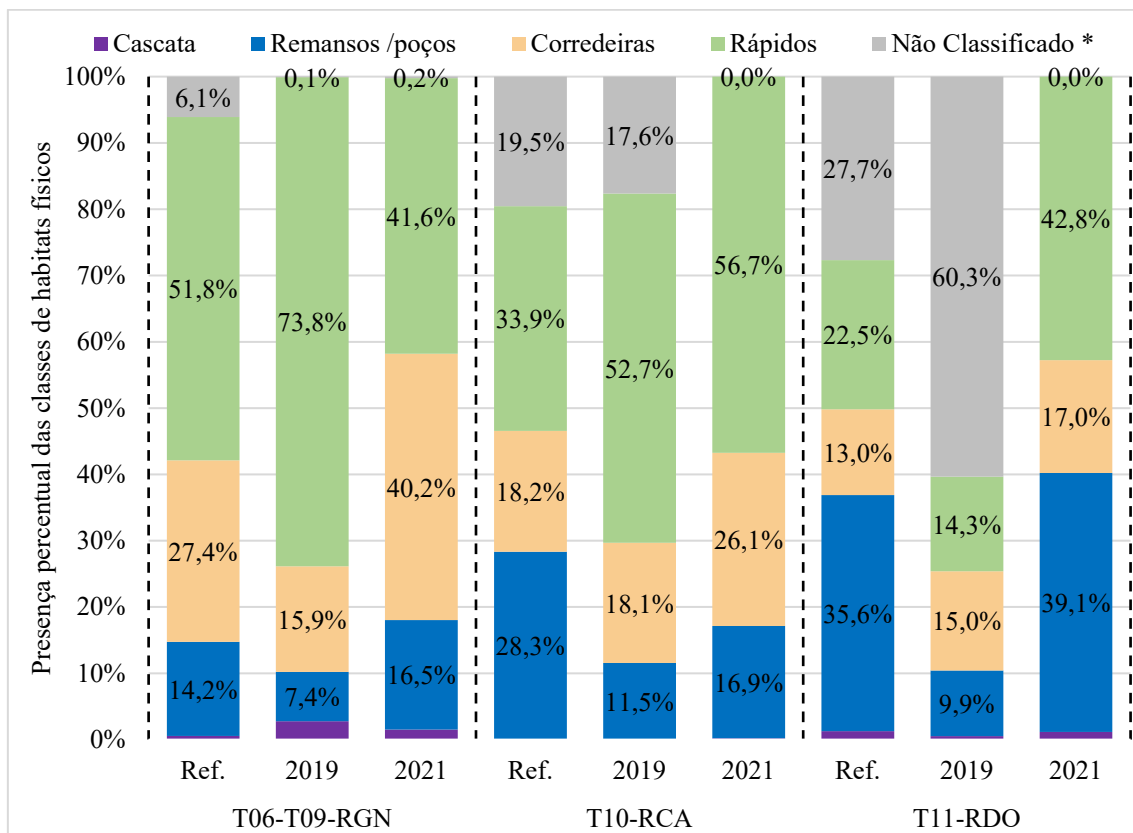
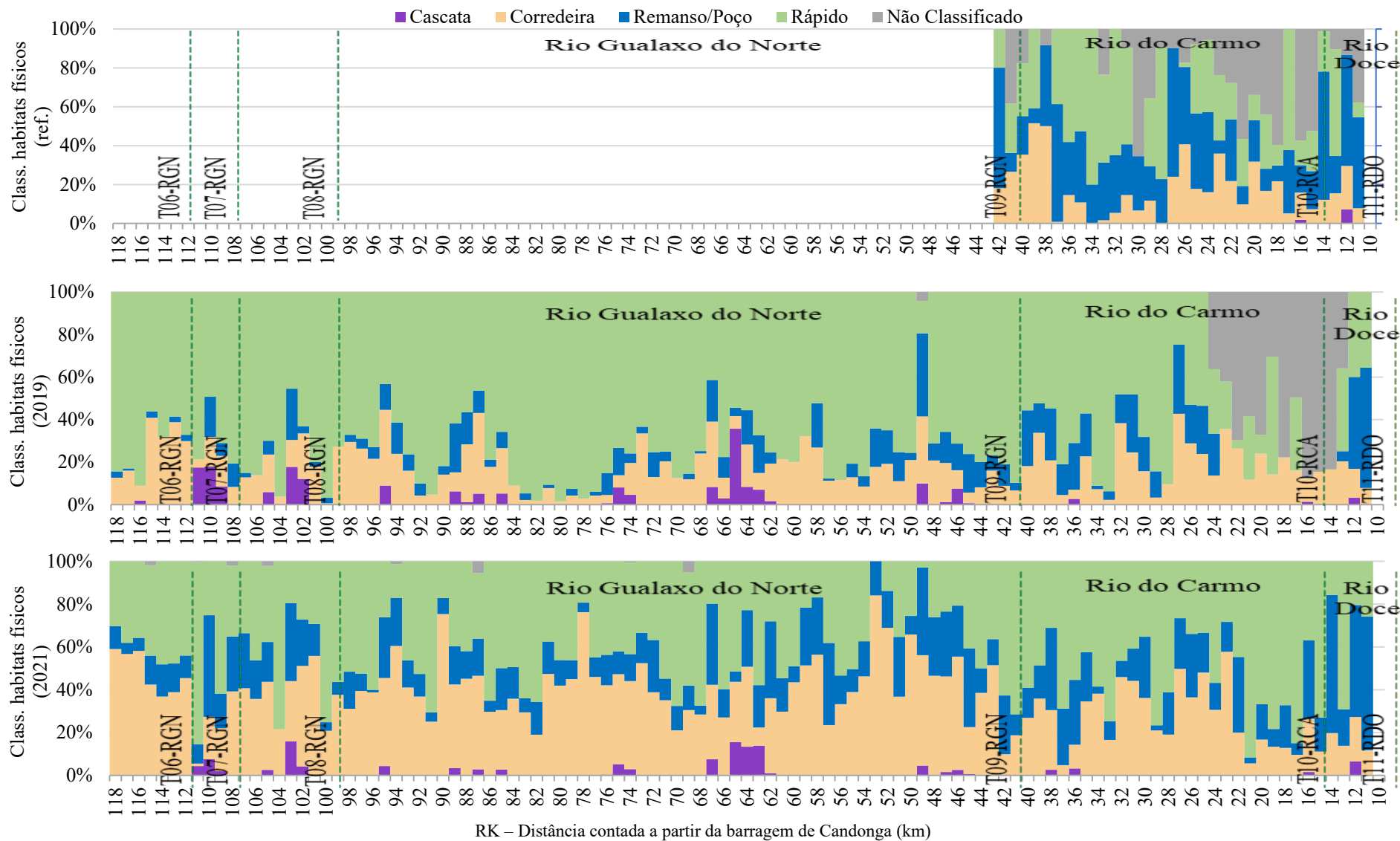


Figura 9 - Visão geral dos resultados do mapeamento dos habitats físicos plotados ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (cenário de referência, 2019, e 2021).



10.2.1. Rio Gualaxo do Norte

As condições de referências definidas para o rio Gualaxo do Norte tiveram como base trechos de rios da região que possuem características similares. Por se tratar de uma comparação entre dois grupos amostrais distintos (rio Gualaxo do Norte e trechos de rios da região), em adição a comparação direta dos resultados (i.e., comparação entre valores médios), foi realizada uma análise de poder *a posteriori* dos resultados para dar maior robustez as conclusões. De maneira simplista, esse tipo de análise estima a probabilidade de se estar certo ao afirmar que uma amostra é ou maior, ou menor ou igual a outra. Maiores detalhes da análise estatística realizada são apresentados no Apêndice G.

Analisando o rio como um todo (Tabela 5 e Figura 8), bem como pelos trechos do PMR, pode-se perceber uma proeminente evolução na diversidade de habitats, com um expressivo aumento da presença de corredeiras e remansos entre os anos de 2019 e 2021 (Tabela 6, , Figura 11 e Figura 12).

A comparação direta do valor médio da referência com os valores do rio Gualaxo do Norte indicam, no geral, maior diversidade de habitats no rio afetado pelo rompimento do que nos rios da região. Estes resultados são observados tanto para o rio como um todo quanto para os trechos do PMR.

Enquanto que para o rio como um todo o teste de poder estatístico assegura que o rio Gualaxo do Norte possui em geral mais corredeiras e mais corredeiras somadas a remansos que a referência (poder superior a 99%)⁴⁵, ao avaliar cada trecho do PMR, com exceção do T09 (poder superior a 99%) não se tem a mesma robustez estatística, em especial para os trechos T06 e T07, em que o número de amostras é relativamente pequeno. Na prática, isso implica que é possível concluir que: a) em média o rio Gualaxo do Norte possui maior diversidade de habitats que a referência; b) o T09 possui maior diversidade de habitats que a referência; c) as análises mostram que mesmo que o T06, T07 e T08 apresentem em média maior diversidade de habitats que a referência, e que há uma probabilidade que não pode ser desprezada de que algum pequeno segmento apresente diversidade de habitats menor que a referência. Na Figura 11 podem ser notados segmentos de 1 km de extensão que apresentam em 2021 valores menores reduzidos de presença de corredeiras (RK-111 e RK-104). No entanto, a baixa diversidade de

⁴⁵ Tipicamente assume-se que um poder de 80% ou maior denota confiabilidade na análise.

habitats observada é explicada pela presença de um longo trecho de cânion (habitat do tipo cascatas) e pelo remanso formado pela soleira da PCH Bicas, respectivamente.

A Figura 11 apresenta o perfil longitudinal com a participação de habitats físicos por quilômetro entre os trechos T06 e T07 (RK102 ao RK118) mapeados nos anos de 2019 e 2021. A Figura 12 apresenta o mesmo tipo de informação para o T09.

Principalmente nos três primeiros quilômetros a montante (RK116 ao RK118) foi observada uma significativa transformação das características do rio, onde em 2019 a participação de corredeiras e remansos somados era inferior a 20%, passando em 2021 para aproximadamente 60 %. Nota-se que no RK-116 e RK-117 se encontra a área renaturalizadas do trecho T06 (Aplysia, 2019,2021a), e avaliamos que a formação de alguns habitats do tipo corredeiras e remansos possam ser diretamente relacionados as estruturas de troncos implantadas.

Nos trechos do RK76 ao RK84 e do RK89 e RK93 também é observado uma mudança expressiva, onde a presença de corredeiras e remansos passou de aproximadamente 10% em 2019 para aproximadamente 50% em 2021. Destaca-se que o Projeto de Expansão da Renaturalização – PER (Aplysia, 2021b) foi instalado nos RK90 e RK91, em junho de 2021. Ainda que a avaliação das imagens indiquem que já ocorreram mudanças na composição do substrato imediatamente a montante e jusante das estruturas (microescala), com apenas 2~3 meses de atuação (tempo decorrido entre a instalação e o aerolevanteamento) não era possível notar uma influência direta na formação de mesohabitats (macroescala).

Tabela 6 – Participação dos habitats físicos nos trechos do rio Gualaxo do Norte (cenário de referência, 2019, e 2021).

Trecho	Período	Habitats Físicos				
		Cascata	Corredeiras	Rápidos	Remansos /poços	Não Classificado *
T06-RGN	Ref.	0,2%	35,4%	39,2%	16,5%	8,7%
	2019	0,3%	25,6%	73,0%	1,2%	0,0%
	2021	0,0%	47,9%	40,8%	11,0%	0,3%
T07-RGN	Ref.	0,2%	19,8%	44,3%	26,4%	9,3%
	2019	8,5%	15,0%	70,2%	6,2%	0,0%
	2021	3,6%	23,3%	52,7%	20,3%	0,1%
T08-RGN	Ref.	0,4%	31,8%	49,7%	17,1%	1,0%
	2019	5,2%	14,1%	74,6%	6,1%	0,0%
	2021	2,7%	36,6%	40,9%	19,4%	0,4%
T09-RGN	Ref.	0,7%	26,2%	51,6%	13,1%	8,5%
	2019	2,5%	15,6%	73,9%	8,0%	0,1%
	2021	1,4%	40,6%	41,4%	16,4%	0,2%
RGN (T06-T09)	Ref.	0,5%	27,4%	51,8%	14,2%	6,1%
	2019	2,8%	15,9%	73,8%	7,4%	0,1%
	2021	1,5%	40,2%	41,6%	16,5%	0,2%

Figura 10 – Participação dos habitats físicos nos trechos do rio Gualaxo do Norte (cenário de referência, 2019, e 2021).

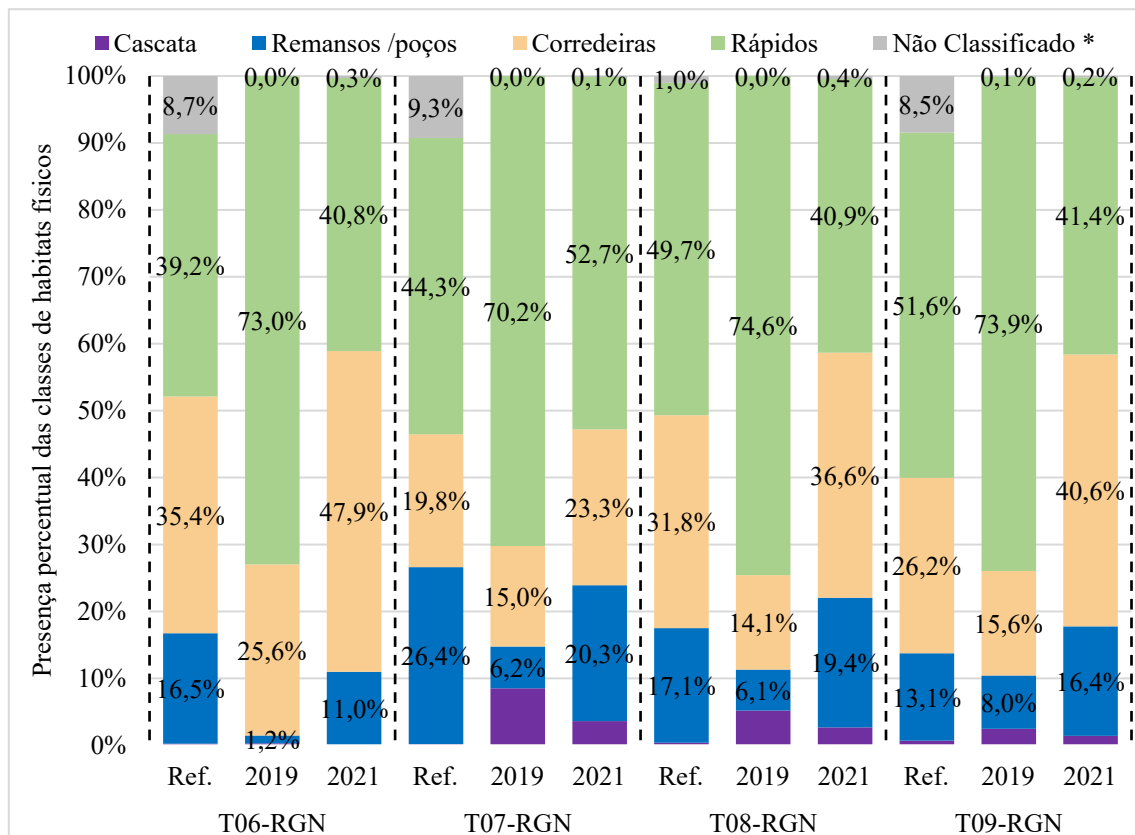


Figura 11 - Visão geral dos resultados do mapeamento dos habitats físicos plotados ao longo dos trechos T06, T07 e T08 (Rio Gualaxo do Norte) para cenários pós-rompimento de 2019 e 2021.

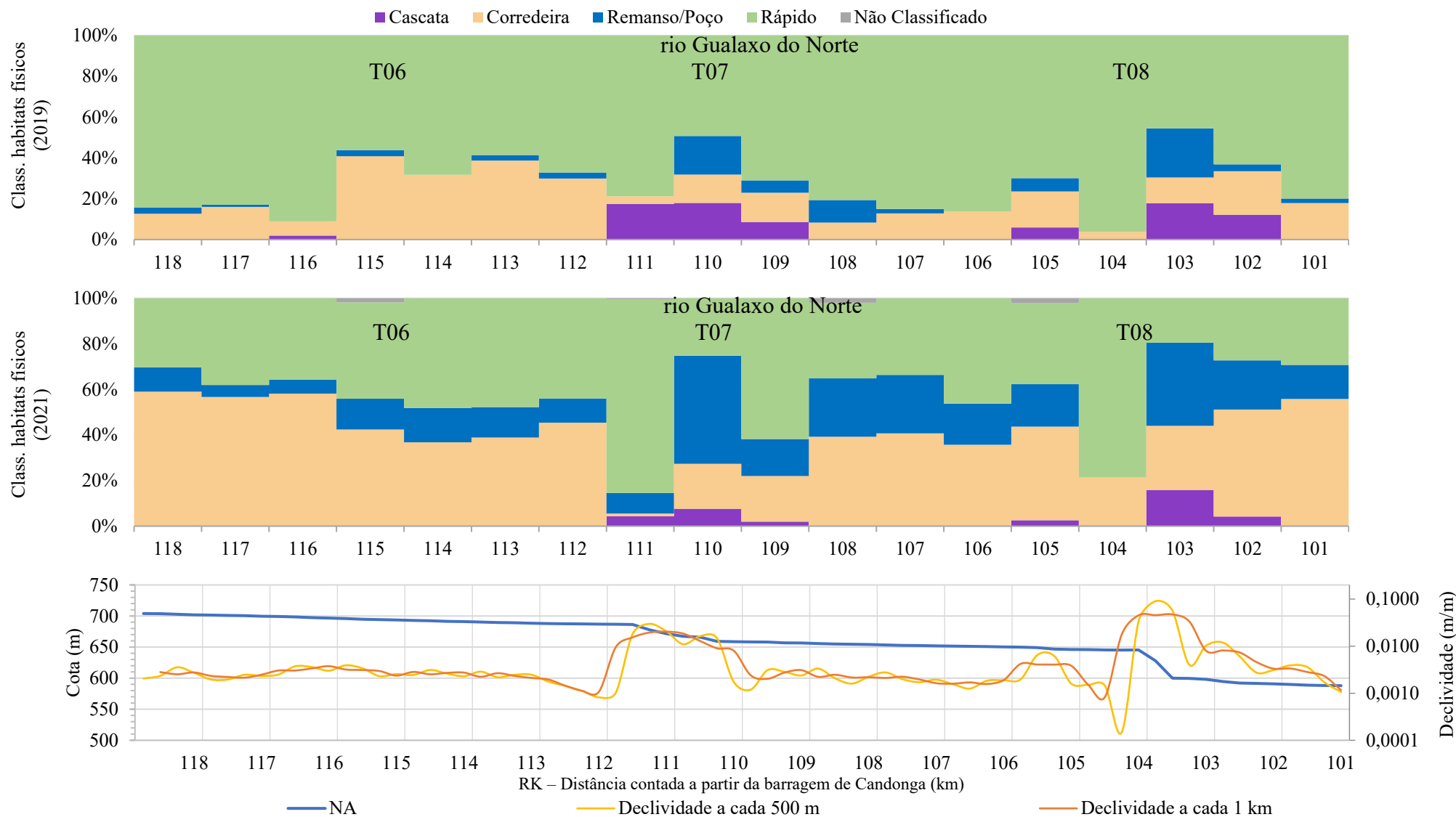
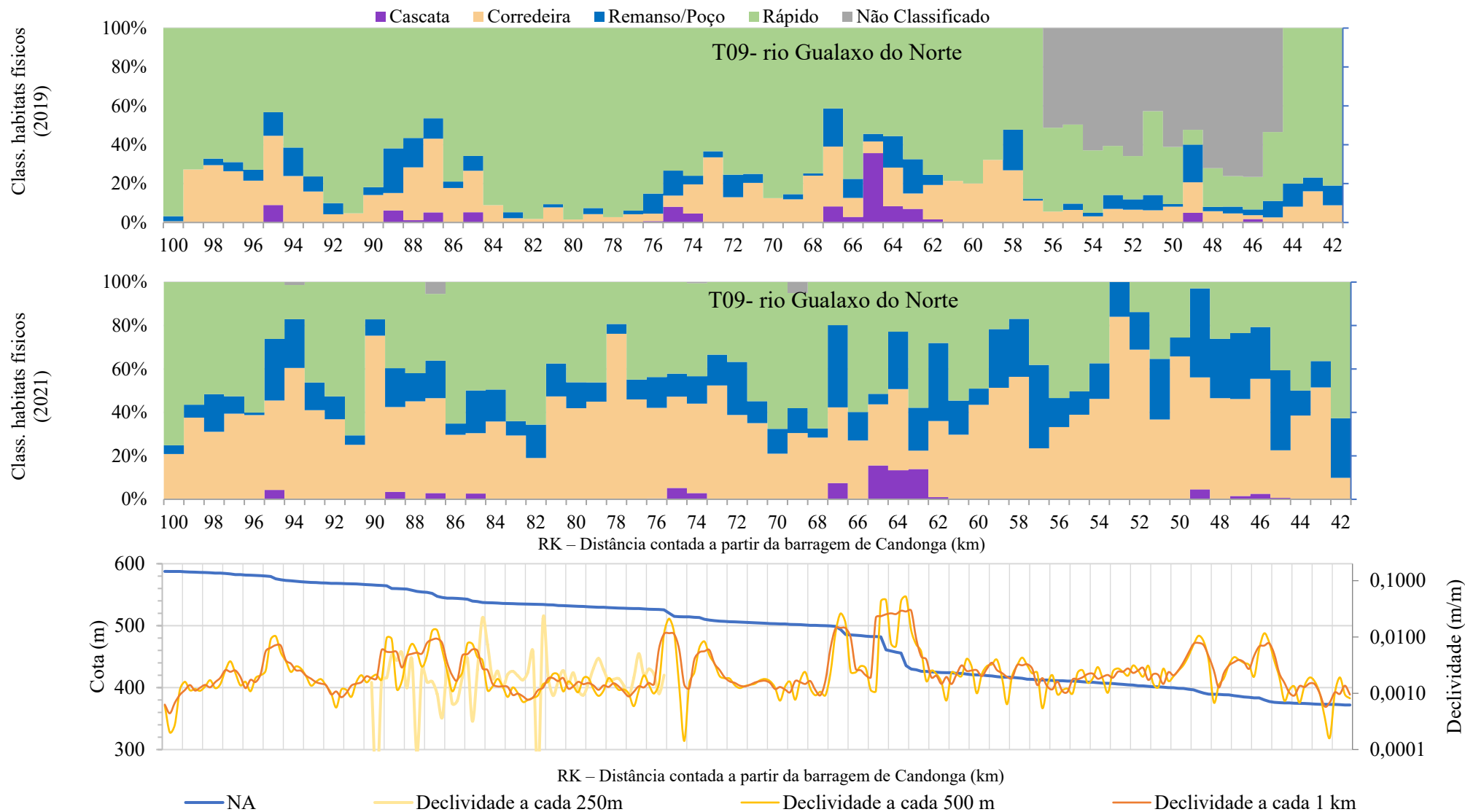


Figura 12 - Visão geral dos resultados do mapeamento dos habitats físicos plotados ao longo dos trechos T09 (Rio Gualaxo do Norte) para cenários pós-rompimento de 2019 e 2021.



10.2.2. Rio Carmo e Rio Doce

A condição de referência dos rios do Carmo e Doce (T10 e T11) foram baseadas em imagens históricas. Por se tratar de um mesmo conjunto amostral, a comparação direta das amostras (i.e., comparação direta dos RKs ou de conjunto de RKs) já se mostra uma análise robusta. Adicionalmente a comparação da presença de habitats foi feita uma comparação visual qualitativa das principais feições morfológicas, como zonas rasas e barras de sedimentos entre as imagens de 2014 e 2021.

As imagens de 2014 e de 2019 possuem resolução espacial menor que as imagens de 2021 (0,35 e 010 m respectivamente) e não apresentam em toda sua extensão boas condições de visibilidade do leito, o que introduz uma maior incerteza no processo de delineamento e classificação dos habitats. Em especial a limitação da identificação de feições geomorfológicas (i.e., variação de profundidade) dificulta a diferenciação entre rápidos e poços/remansos. A diferenciação dessas estruturas de habitats de águas calmas para corredeiras e cascatas é mais fácil de identificar pela visualização da turbulência das águas. Assim, especificamente para as imagens históricas e de 2019 para os trechos T10 e T11, as áreas de “Não classificado” correspondem a áreas ou de rápidos ou de poços/remansos⁴⁶.

A Tabela 7 e a Figura 13 apresentam os valores da presença de físicos para os trechos, e a Figura 14 apresenta o perfil longitudinal com a presença de habitats físicos por segmento de análise (RK11 ao RK42). São apresentados os resultados do mapeamento para os cenários de referência (ano de 2014) e cenários pós-rompimento para os anos 2019 e 2021.

Já em 2019, os rios apresentavam valores de presença de corredeiras similares à referência, o que poderia ser possivelmente caracterizado como uma situação melhor que a apresentada no rio Gualaxo do Norte. É interessante ressaltar que essa inferência está em concordância com as informações do monitoramento intracalha que indicam significativa alteração nas características físicas dos depósitos. Os resultados do monitoramento mostram que em 2019 não foram identificadas camadas classificadas como rejeito inconsolidado na maioria dos testemunhos dos trechos T10 e T11 (camadas de rejeitos inconsolidados haviam

⁴⁶ No caso do rio Gualaxo do Norte e dos trechos de rios de referência as áreas de “Não Classificados” correspondem a locais onde a visibilidade do leito foi prejudicada por sombreamento ou por obstrução direta devido a vegetação, não podendo ser inferido o comportamento esperado quanto à classificação de habitats físicos.

sido encontradas no contexto intracalha em todos os transectos amostrados em 2018 nos PMR. – WSP Golder, 2022). Acredita-se que o aporte de águas do trecho não impactado do rio do Carmo e rio Piranga (com relativa menor concentração de sedimentos) em uma vazão significativamente maior do que o rio Gualaxo do Norte tenha relação com a recuperação das características físicas mais acelerada observada⁴⁷.

Assim como no rio Gualaxo do Norte, os resultados de 2021 apresentam aumento da presença de habitats tipo corredeiras e remansos. Para o rio Doce as duas métricas avaliadas quanto a diversidade de habitats se encontravam similares ou superiores a referência. Para o rio do Carmo é observado que a presença de poços/remansos ainda é menor que a referência.

Ainda que os resultados apontem que em média os rios apresentem maior presença de corredeiras e de corredeiras adicionadas aos poços/remansos, a comparação direta do perfil longitudinal RK aponta que nem todos os RK apresentam valores para o ano de 2021 similares ou superiores ao valor de referência. Ressalta-se que é esperado se ter variância no entorno do valor médio, o que inclui por definição locais com valores inferiores à média. O que é interessante e que os dados apontam variação longitudinal quanto à presença das classes de habitats, o que caracteriza certa diversidade e alternância.

Conforme discutido no item 10.1, avalia-se que no rio Doce, em especial no trecho mais a jusante, as imagens utilizadas para caracterização dos cenários correspondam a diferentes situações de nível d'água. As prováveis diferenças no nível d'água, associadas a diferença de escala das imagens (incluindo menor visibilidade do leito nas imagens de referência), introduzem um certo grau de incerteza nas análises da presença de habitats. Pela condição de referência ser definida por imagens históricas optou-se por se realizar uma comparação direta das imagens aéreas avaliando outros tipos de feições geomorfológicas, as quais sofrem menor influência da variação da lâmina d'água e resolução da imagem. A Figura 15, a Figura 16 e a Figura 17 apresentam exemplos da comparação entre a situação antes do rompimento (ano de 2014) e em 2021. Nota-se que as estruturas de bancos de sedimentos, áreas rasas e ilhas se encontravam presentes nos rios em momento anterior ao rompimento foram restabelecidas nos mesmos locais, em mesma quantidade, e em tamanho/abrangência similares.

⁴⁷ Água com menor concentração de sedimentos possuem, tipicamente, maior potencial de erodir e transportar sedimentos. Esse é um fenômeno conhecido como “*hungry waters*” (“águas famintas” em tradução livre), e é muito comum em trechos a jusante de barramentos recém-construídos.

Ainda que com as incertezas inerentes a análise, é possível afirmar que um grande passo foi dado rumo a recuperação das características físicas do leito dos rios do Carmo e Doce. Tanto a avaliação dos testemunhos (caracterização muito detalhada, porém pontual), quanto a da presença de corredeiras e a comparação direta de outros tipos de feições morfológicas (caracterização abrangente), indicam que as características físicas dos rios são muito diferentes do observado imediatamente após o rompimento, e são similares ao observado antes do rompimento.

Tabela 7 – Participação dos habitats físicos nos rios do Carmo e Doce – T10 e T11 (cenário de referência, 2019, e 2021).

Trecho	Período	Habitats Físicos				
		Cascata	Corredeiras	Rápidos	Remansos /poços	Não Classificado *
T10-RCA	Ref.	0,0%	18,2%	33,9%	28,3%	19,5%
	2019	0,1%	18,1%	52,7%	11,5%	17,6%
	2021	0,2%	26,1%	56,7%	16,9%	0,0%
T11-RDO	Ref.	1,3%	13,0%	22,5%	35,6%	27,7%
	2019	0,5%	15,0%	14,3%	9,9%	60,3%
	2021	1,2%	17,0%	42,8%	39,1%	0,0%

Figura 13 – Participação dos habitats físicos nos rios do Carmo e Doce – T10 e T11 (cenário de referência, 2019, e 2021).

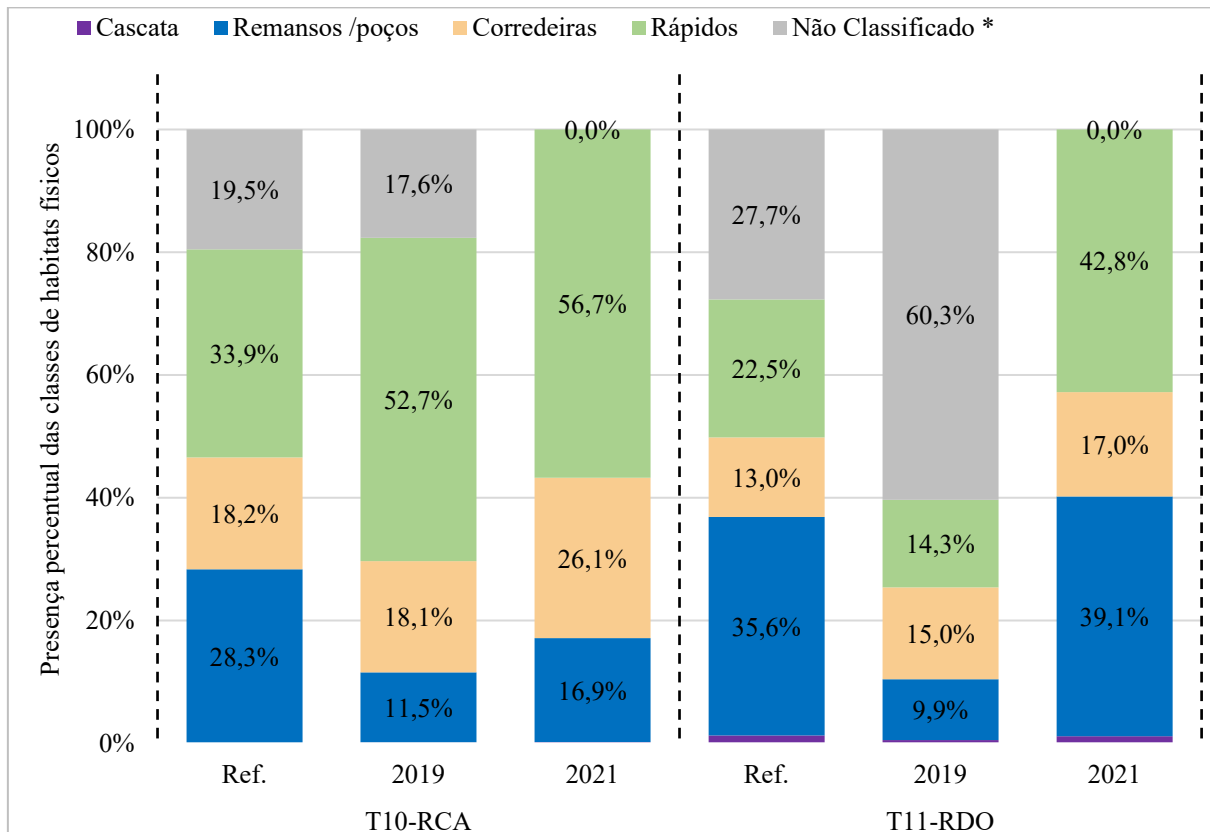


Figura 14 – Visão geral dos resultados do mapeamento dos habitats físicos plotados ao longo dos trechos T10 e T11 para cenários de referência, 2019 e 2021.

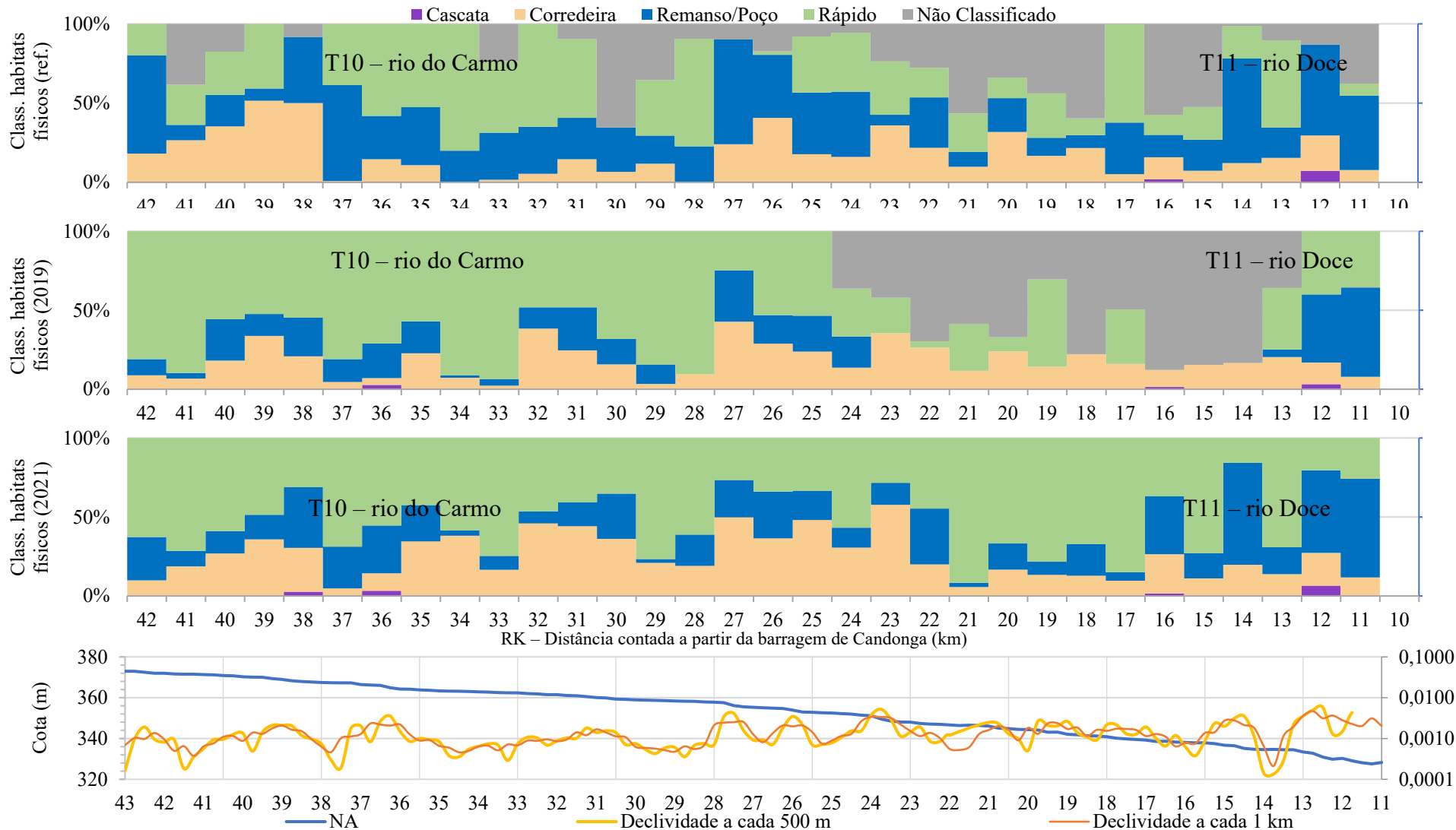


Figura 15 – Parte da área de abrangência do RK-21 localizado no rio Doce (T11). a) Imagem da estação seca de 2014 (antes do rompimento. Fonte: Google Earth Pro, 2022), e b) imagem da estação seca de 2021. Nota-se a grande semelhança da localização e dimensão de estruturas como bancos de sedimentos, áreas rasas e ilhas fluviais.



Figura 16 – Parte da área de abrangência do RK-33, figuras a) e b), localizados no rio do Carmo (T10). a) Imagem da estação seca de 2021 do RK-33, b) imagem da estação seca de 2014 do RK-33, antes do rompimento (Fonte: Google Earth Pro, 2022). Nota-se a grande semelhança da localização e dimensão de estruturas como bancos de sedimentos, áreas rasas e ilhas fluviais.

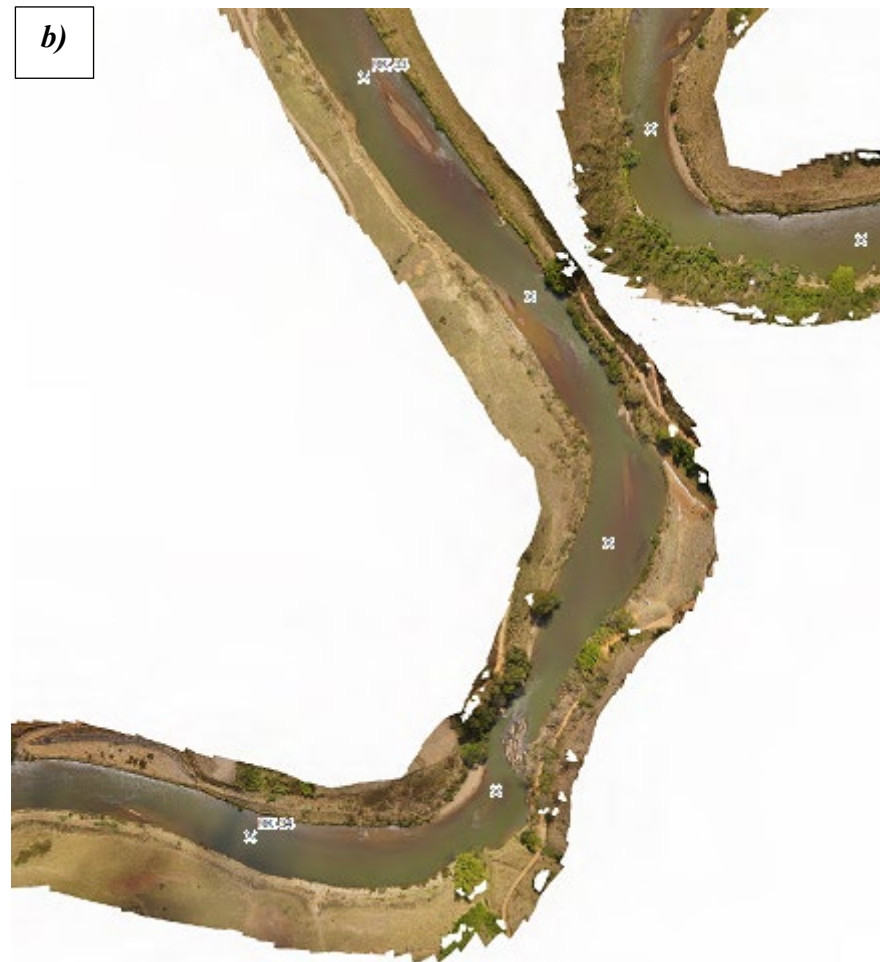
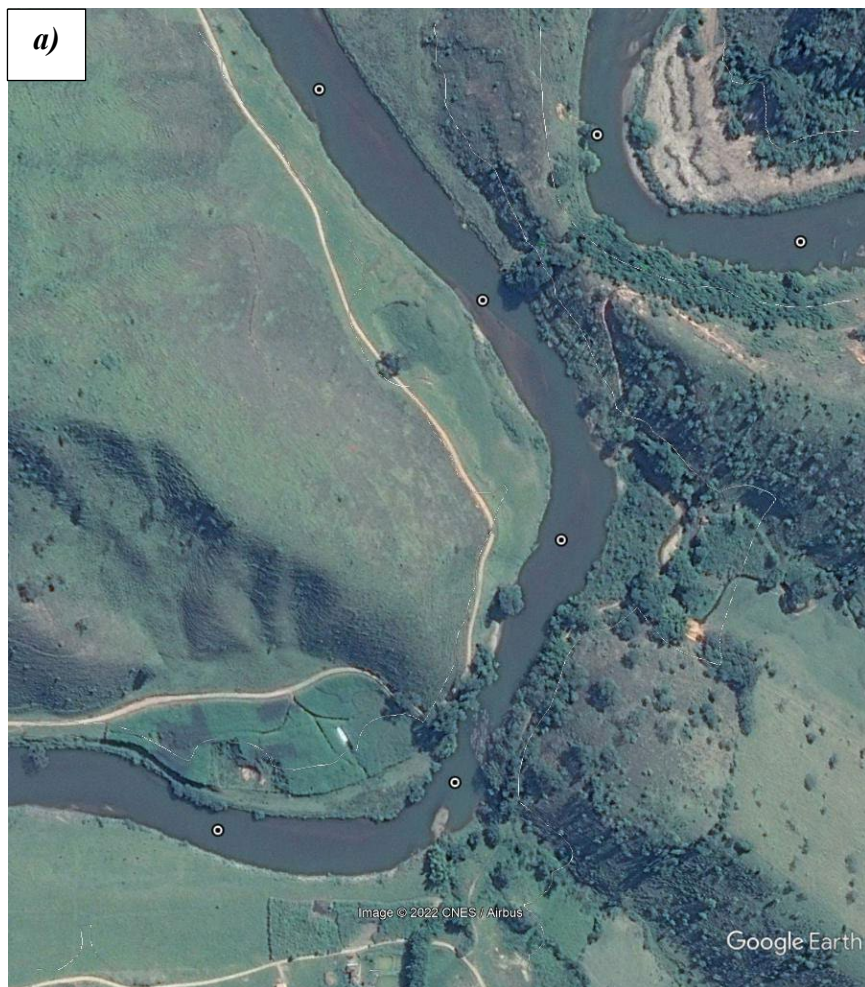
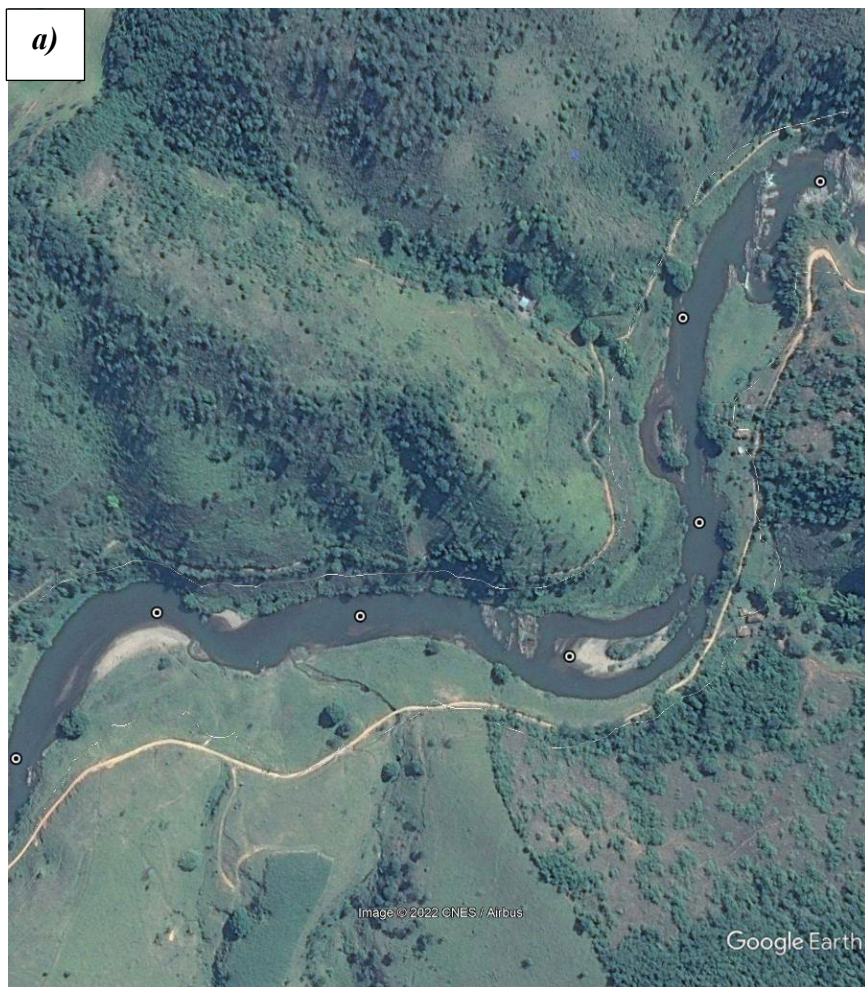


Figura 17 – Parte da área de abrangência do RK-36/37, localizados no rio do Carmo (T10). a) Imagem da estação seca de 2014 do RK-36/37, antes do rompimento; e b) imagem da estação seca de 2021 do RK-36/37, antes do rompimento (Fonte: Google Earth Pro, 2022). Nota-se a grande semelhança da localização e dimensão de estruturas como bancos de sedimentos, áreas rasas e ilhas fluviais.



10.3. Material predominante na camada ativa do leito

A composição granulométrica do leito do rio (substrato) interfere na formação e na qualidade dos habitats físicos. Após o rompimento da barragem material do leito dos rios impactados foi substituído por uma mistura composta majoritariamente de rejeitos, e uma parcela menor de sedimentos naturais, sendo caracterizada pela predominância de material fino (silte e menor), de coloração escura. Ainda que o material classificado no presente estudo como “Areias ou material mais fino (claros)” provavelmente corresponda à sedimentos originados em áreas não impactadas da bacia (majoritariamente), a inferência da recuperação da qualidade dos habitats do rio Gualaxo do Norte⁴⁸ foi realizada com base na presença de material grosseiro.

A classificação visual realizada foi comparada com dados de amostras de campo coletadas na estação seca de 2021 no âmbito do monitoramento intracalha (WSP Golder, 2022)⁴⁹, apresentando boa assertividade na identificação de grosseiros e finos. Maiores informações da validação do método são apresentadas no Apêndice E.

Os resultados principais da análise do material predominante na camada ativa do leito do rio Gualaxo do Norte são apresentados na Figura 18. A Tabela 8 apresenta também os resultados quando subdivididos pelos trechos do PMR.

Os resultados mostram que em 2019 todos os trechos do PMR do rio Gualaxo do Norte apresentavam pelo menos 25% do leito ocupado predominantemente por material fino escuro, sendo que o T09 tinha quase metade de sua área com predominância desta classe. No geral quase 70 % do rio Gualaxo do Norte era ocupado por material predominantemente fino em 2019.

⁴⁸ Conforme já apresentado, as imagens utilizadas para definição da condição de referência nos rios do Carmo e Doce, bem como o conjunto de imagens utilizado para o ano de 2019 não permitem a identificação/classificação de frações grosseiras menores como o cascalho, inviabilizando a análise comparativa da composição do leito nestes rios. Destaca-se foi realizado a classificação do material predominante do leito para o cenário 2021, o qual poderá ser utilizado em comparações futuras. Os resultados estão apresentados no Apêndice F.

⁴⁹ Informações coletadas em anos anteriores pelo monitoramento intracalha, pelo PMQOS e pelos estudos de renaturalização (Aplysia, 2019,2021a,b) analisaram a granulometria até diâmetro menor que o identificado pelas imagens, não sendo possível realizar a comparação das informações.

Entre 2019 e 2021 ocorreu uma significativa redução da presença desta classe, sendo esta majoritariamente substituída por material classificado como “Areias ou material mais fino (claros)”. Isto evidencia a ocorrência de mudanças na camada ativa do leito.

A Figura 19 apresenta o perfil longitudinal da presença de material de leito por quilômetro entre os trechos T06, T07 e T08 (RK102 ao RK118) e A Figura 20 para o T09 (RK42 ao RK101) para os anos de 2019 e 2021. É possível observar que a presença de finos escuros, de 2019 para 2021, reduziu em quase toda a extensão, mas ainda são presentes em menor quantidade e de maneira pontual. Destaca-se o segmento entre os RKs 74 e 86, onde a predominância de material fino escuro era de mais de 90% das unidades de habitats físicos em 2019, e em 2021 este segmento apresentou melhora na qualidade de seus habitats, com aumento expressivo da presença de cascalhos, pedras e material fino claro.

Em adição a área ocupada predominantemente por um tipo de material, foi avaliada a quantidade de material grosseiro (Obs.: essa métrica é diferente da área ocupada predominantemente por um tipo de material, pois é comum que mesmo em habitats predominantemente formado por material grosseiro apresentem pequenas áreas de material fino, especialmente junto as margens, ou a ocorrência pontual de material mais grosseiro ao longo de um habitat predominantemente ocupado por finos).

Assim como para as métricas de presença de habitats, pelo fato de a referência ser definida com base em uma amostra diferente (rios da região), em adição a comparação direta dos resultados (i.e., comparação entre valores médios), foi realizada uma análise de poder *a posteriori* dos resultados para dar maior robustez as conclusões. De maneira simplista, esse tipo de análise estima a probabilidade de se estar certo ao afirmar que uma amostra é ou maior, ou menor ou igual a outra. Essa análise foi realizada considerando o parâmetro presença de grosseiros, assumidos neste estudo como a somatória das classes cascalho ou maior.

Apesar de a comparação direta das médias apresentar uma diferença pequena entre a condição do rio Gualaxo do Norte em 2021 e a referência, sendo a presença de grosseiros maior na referência (40.51 e 43.26, respectivamente), mesmo ao se considerar um intervalo de 10% da distribuição ao redor da média⁵⁰, a análise estatística indica grande confiança ao afirmar que o rio Gualaxo do Norte ainda possui menor quantidade de material grosseiro que a referência.

⁵⁰ Ressalta-se que esse valor não é equivalente a 90% ou 110% da média, mas sim um valor que é função de características da distribuição de valores da amostra, usualmente expressos pelo desvio padrão e variância.

Em outras palavras, apesar de próximas, ainda não se pode afirmar que a qualidade dos habitats dos rios impactados é equivalente à qualidade observada na referência. Essa mesma inferência pode ser feita quando se subdivide nos trechos do PMR⁵¹.

Os resultados também mostram tendência de ocorrer maior presença de material grosseiro em trechos de maior declividade, o que é esperado segundo a teoria do transporte de sedimentos, bem como maior diferença em relação a referência e maior robustez estatística ao afirmar que a classe de menor declividade possui menor quantidade de grosseiros que a referência. O mesmo é observado ao nível de cada unidade de habitat físico. Os resultados indicam que diferença do percentual de grosseiros observadas em corredeiras é menor do que a observada em rápidos e poços/remansos, quando se compara os resultados do Gualaxo do Norte com a referência. Possivelmente indicando que as corredeiras atingirão um estágio similar à referência primeiro que as demais classes.

Esses resultados indicam que a erosão do leito (em específico a erosão seletiva de material fino) tem sido o principal processo na formação e alteração das características físicas dos rios. Sendo esperado que grandes eventos de cheia (grande capacidade de trabalho concentrada no período de duração do evento), promovam alterações nas características físicas dos rios, dando continuidade ao processo de recuperação.

⁵¹ As análises do T06 resultaram em valores inconclusivos. Esse resultado tem grande influência do tamanho amostral relativamente pequeno.

Tabela 8 – Participação da Composição do material de leito predominante nos trechos do rio Gualaxo do Norte (cenário de referência, 2019, e 2021).

		Areias ou material mais fino (claro)	Areias ou material mais fino (escuro)	Cascalho	Leito rochoso	Matacão	Pedras/seixos	S/ classif.
T06-RGN	Ref.	54,6%	-	17,6%	0,3%	1,2%	13,6%	12,7%
	2019	20,6%	27,8%	29,6%	0,0%	0,0%	16,0%	5,9%
	2021	41,3%	23,0%	14,1%	0,4%	2,4%	15,5%	3,3%
T07-RGN	Ref.	54,2%	-	14,8%	0,2%	0,3%	6,8%	23,7%
	2019	41,9%	28,8%	12,9%	0,0%	2,6%	12,5%	1,3%
	2021	65,8%	0,0%	0,8%	2,0%	0,0%	8,0%	23,5%
T08-RGN	Ref.	67,4%	-	19,1%	0,0%	2,3%	5,0%	6,2%
	2019	45,0%	26,5%	9,6%	0,0%	0,4%	9,1%	9,3%
	2021	57,5%	13,8%	6,8%	1,9%	1,0%	14,5%	4,5%
T09-RGN	Ref.	59,5%	-	10,9%	0,2%	3,3%	16,2%	9,9%
	2019	27,9%	47,7%	11,0%	2,4%	0,4%	8,5%	2,0%
	2021	44,2%	13,7%	18,2%	1,2%	1,2%	10,7%	10,9%
RGN (T06-T09)	Ref.	54,7%	0,0%	12,2%	0,2%	2,1%	12,6%	18,2%
	2019	27,4%	40,8%	11,2%	1,8%	0,4%	8,5%	9,8%
	2021	45,9%	13,9%	16,4%	1,2%	1,2%	11,3%	10,1%

Figura 18 – Participação da composição do material predominante na camada ativa do leito nos trechos do rio Gualaxo do Norte (cenário de referência, 2019, e 2021).

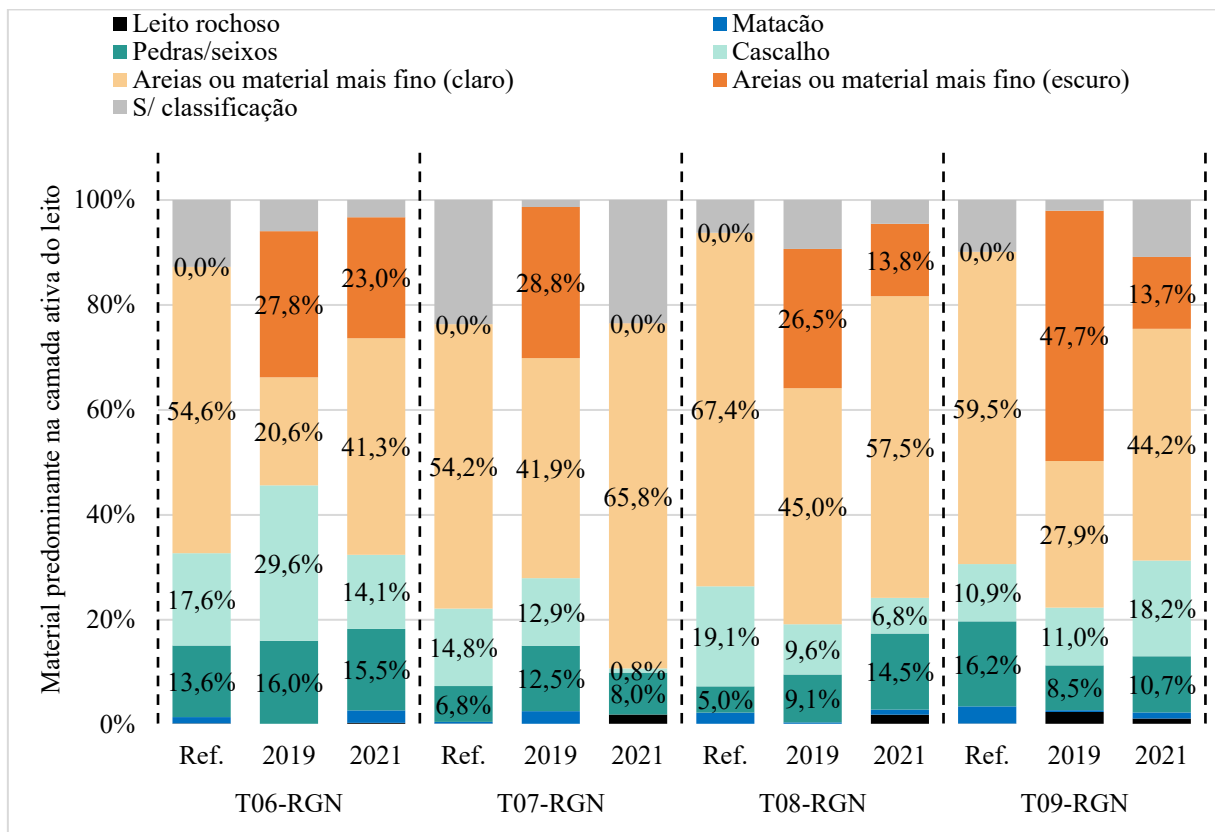


Figura 19 - Visão geral dos resultados da composição do material predominante na camada ativa do leito plotadas ao longo trechos T06, T07 e T08 (rio Gualaxo do Norte) para os cenários de 2019 e 2021.

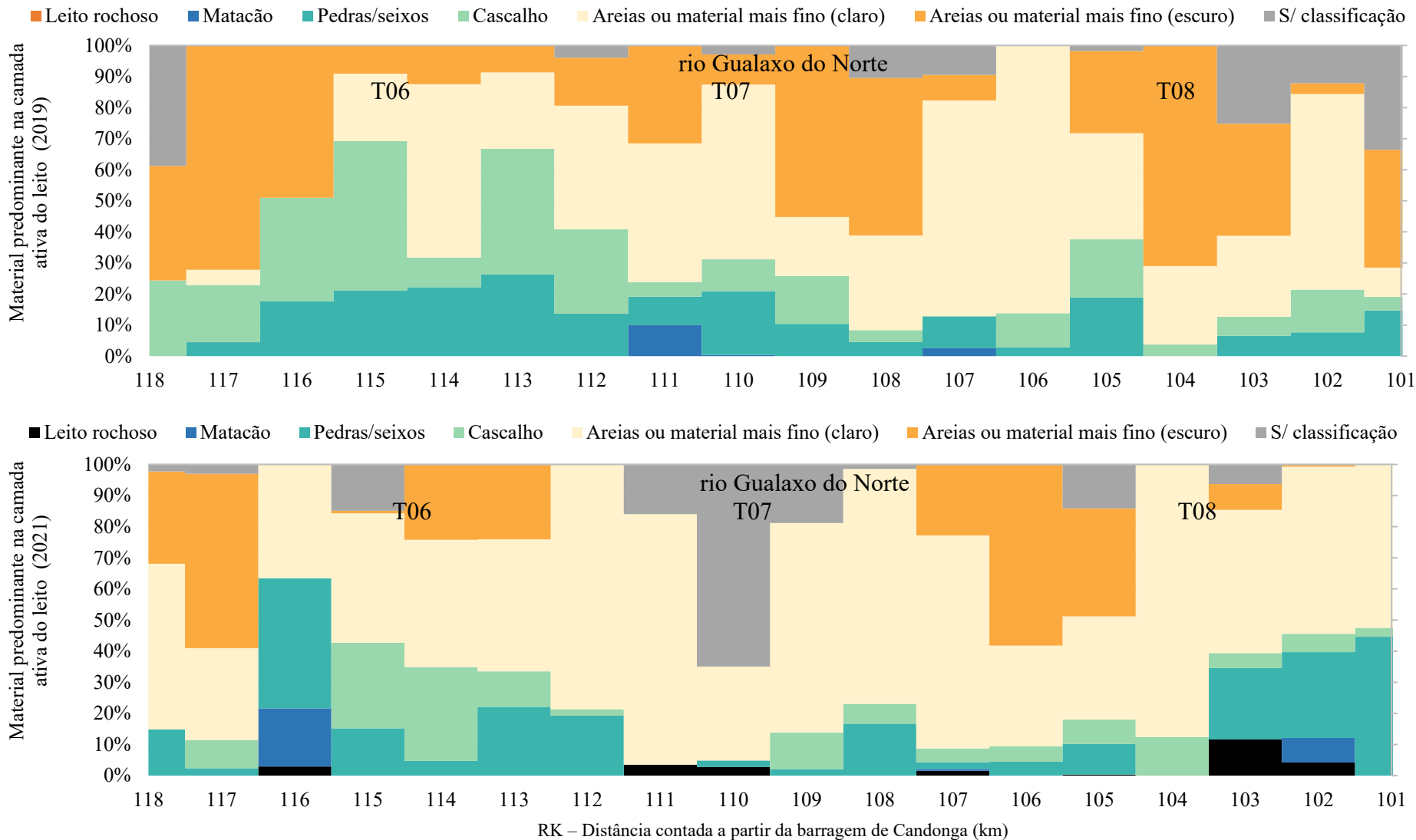
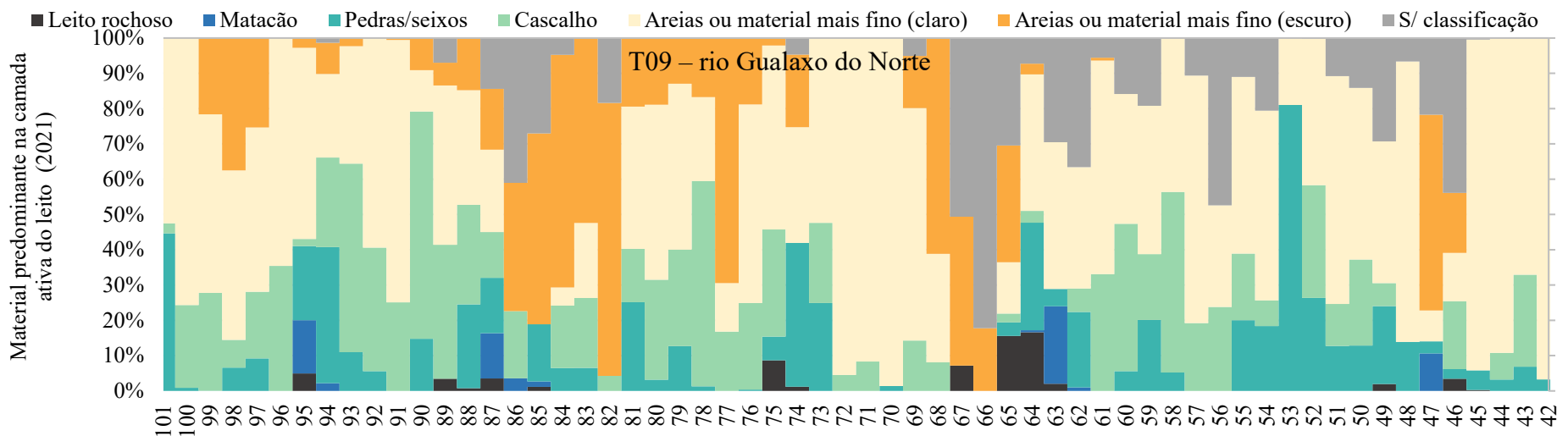
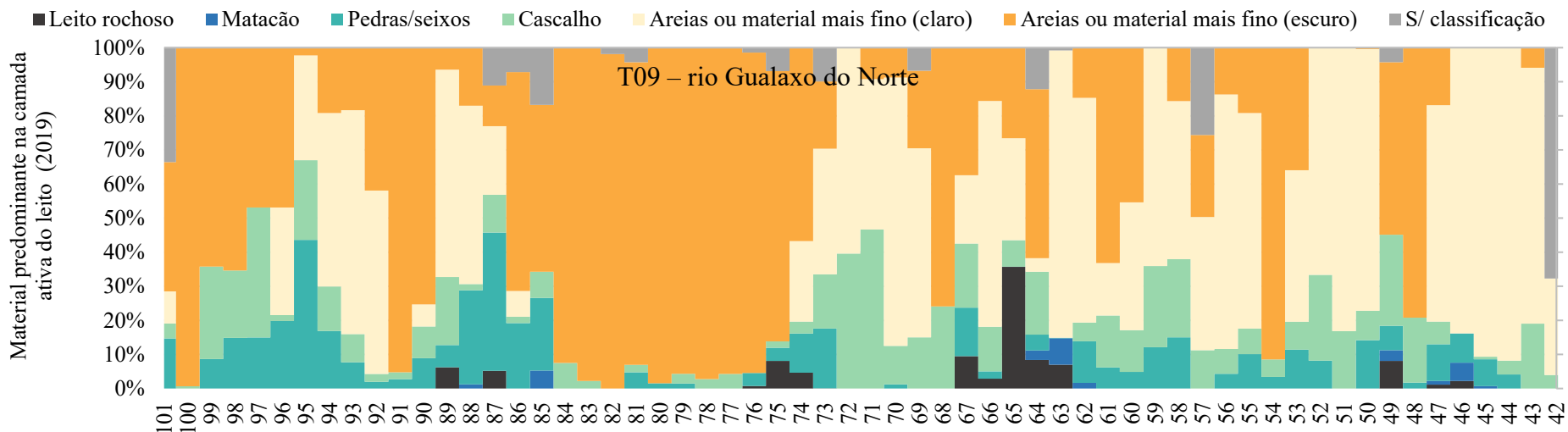


Figura 20 - Visão geral dos resultados da composição do material predominante na camada ativa do leito plotadas ao longo trecho T09 (rio Gualaxo do Norte) para os cenários de 2019 e 2021.



RK – Distância contada a partir da barragem de Candonga (km)

10.4. Condição das margens

A Tabela 9 apresenta a participação percentual das classes de condição das margens para os trechos do PMR. A Tabela 10 e a Figura 21 apresentam os resultados agrupados por rio analisado, sendo T06 a T09 correspondente ao rio Gualaxo do Norte, parte do T09 e T10 correspondentes ao rio Carmo e T11 referente ao rio Doce. A condição das margens é apresentada nos mapas apresentados nos apêndices de resultados⁵².

Deve ser ressaltado que o parâmetro corresponde a presença de vegetação nas margens dos rios, e a maioria das ações de revegetação do PG-25 são executadas a uma certa distância das margens. Deste modo, as informações quanto ao tipo de vegetação avaliado neste estudo (condição das margens) não são diretamente comparáveis a classificação feita no âmbito dos trabalhos do PG-25.

Trechos classificados como leito rochoso ou com obras de proteção de taludes representam margens fixas, isto é, onde os processos de migração lateral são inviabilizados. Foi observado que a presença de obras de enrocamento contribuiu na disposição de material grosseiro no leito do canal ativo, o que para situação observada nos momentos iniciais após o rompimento foi um fator promotor de qualidade nos habitats locais.

De maneira geral, a vegetação ripária no trecho de estudo foi quase toda removida pela erosão causada pelo rompimento. Os resultados apontam significativa recuperação em todos os trechos. No rio Gualaxo do Norte, a presença de área vegetada (vegetação densa e arbustos) ainda se encontra abaixo do valor de referência e foi reduzido de 2019 para 2021. O mesmo padrão de redução foi observado no rio do Carmo. Somente o rio Doce apresenta uma contínua melhora quanto a presença de vegetação nas margens, apresentando inclusive maior extensão de margem com vegetação densa.

No Gualaxo do Norte a menor presença percentual associada ao fato de ser uma vegetação relativamente jovem, culminam em presença de troncos e material lenhoso (LWD) no leito do rio, quando comparado à referência. No entanto deve ser destacado que em esmo locais que não tiveram implantação de renaturalização apresentam material lenhoso, podendo ser inferido que a vegetação ciliar atualmente existente já é capaz de fornecer certa quantidade

⁵² Apêndice I, Apêndice K, Apêndice M, e Apêndice O.

de material lenhoso. A renaturalização tem potencial para acelerar os processos de recuperação do rio Gualaxo do Norte quanto a presença de material lenhoso, e pode ser utilizada como ação de caráter temporário até que a vegetação ripária seja capaz de, por si só, fornecer material lenhoso para o rio em quantidade similar à referência. Maiores informações no apêndice H.

Também é interessante ressaltar que os resultados do mapeamento de habitats nos rios de referência indicam a existência de vegetação densa e de grande porte junto as margens, capaz de obstruir a visualização de aproximadamente 6 % da área do leito dos trechos de rios avaliados. No rio Gualaxo do Norte esse valor era de 0,2 % em 2021. Sendo esse um outro indicativo da vegetação ciliar no rio Gualaxo do Norte ainda possui menor porte que nos rios de referência.

As estruturas rígidas de enrocamento implantadas para controle de erosão e proteção dos taludes das margens (classe “proteção de taludes”) se encontravam em 2021, no geral recobertas com vegetação, sendo mais difíceis de serem identificadas que em 2019. No geral se mostraram estáveis (as estruturas em 2019 foram identificadas em 2021). É observada correlação entre a presença de enrocamento na parte externa de curvas com a presença de poços/remansos. Acredita-se que a limitação da movimentação lateral (esperada na parte externa de curvas de rios) promovida pelas estruturas de proteção tenha favorecida a erosão em profundidade e a formação de poços/remansos.

E todos os rios foi observado um aumento das erosões das margens entre 2019 e 2021, o que corrobora com as alterações observadas na alteração das estruturas de habitats, pois a erosão das margens é uma evidência de que um rio tenha passado por transformações físicas. Ainda que a erosão das margens e migração lateral dos rios tenha sido vista como indesejável, em específico pelo aporte de material que contribuiria para um possível aumento da turbidez (ou maior prazo para a redução da turbidez), ela é um processo natural, e que tem potenciais benefícios de inserção de material lenhoso e matéria orgânica no meio aquático.

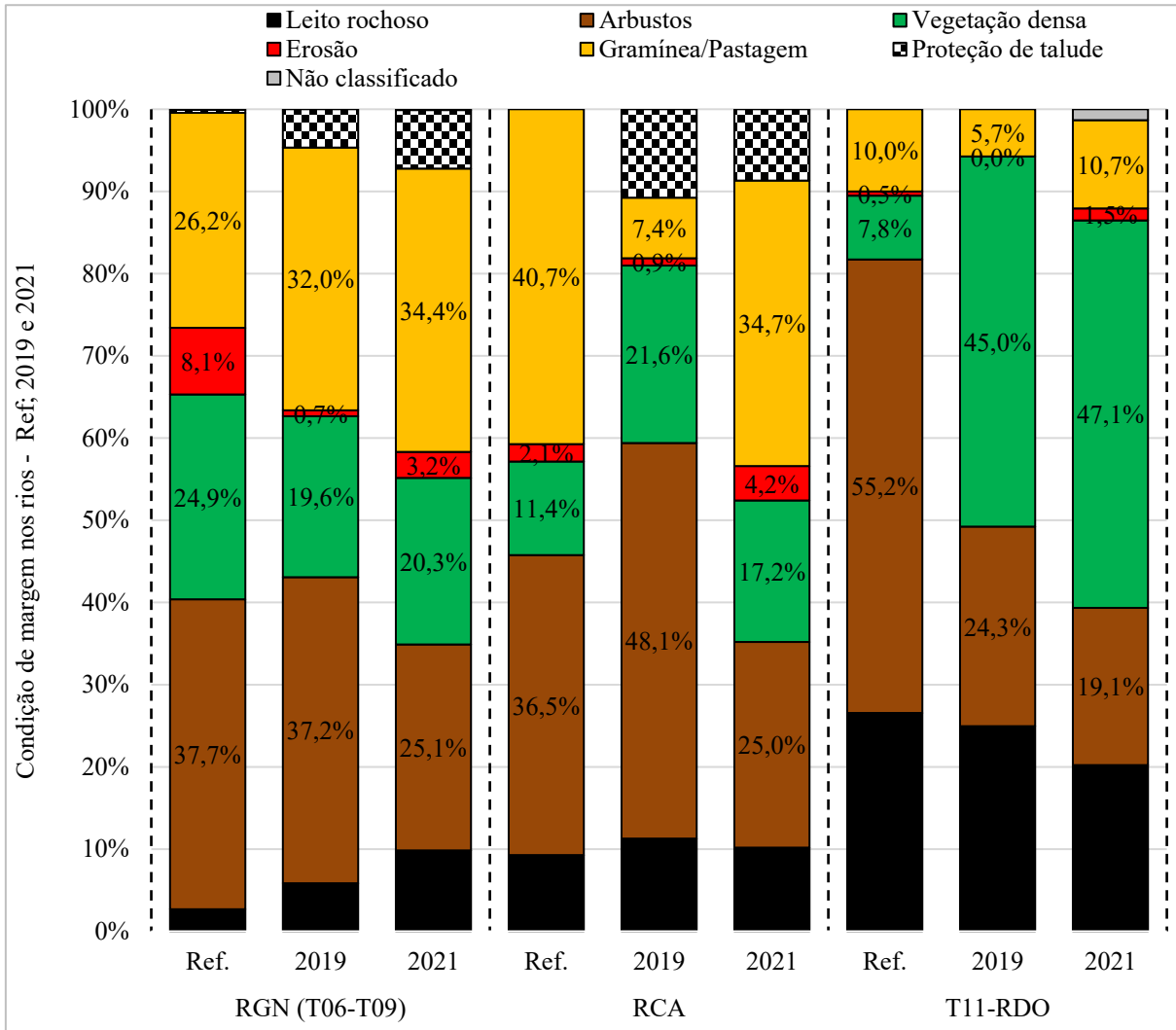
Tabela 9 – Condição de margem em percentual de extensão por trecho do PMR.

	Rótulos de Linha	Arbustos	Erosão	Gramínea/ Pastagem	Leito rochoso	Não classificado	Proteção de talude	Vegetação densa
T06-RGN	Ref.	46.1%	7.4%	20.7%	5.9%	0.1%	0.0%	19.7%
	2019	22.2%	2.4%	44.8%	0.8%	0.0%	12.6%	17.1%
	2021	19.5%	8.0%	41.1%	3.3%	0.0%	11.6%	16.6%
T07-RGN	Ref.	36.2%	9.1%	33.6%	1.9%	0.0%	0.0%	19.2%
	2019	42.2%	4.0%	8.7%	38.7%	0.0%	2.1%	4.3%
	2021	7.5%	3.2%	30.6%	45.7%	0.0%	2.2%	10.8%
T08-RGN	Ref.	38.5%	10.2%	28.2%	0.1%	0.3%	0.0%	22.7%
	2019	52.7%	0.3%	18.0%	6.5%	0.0%	2.1%	20.5%
	2021	31.9%	6.3%	33.5%	10.0%	0.0%	3.1%	15.3%
T09-RGN	Ref.	34.9%	7.8%	25.9%	2.1%	0.0%	0.6%	28.7%
	2019	36.1%	0.4%	34.3%	4.1%	0.0%	4.4%	20.7%
	2021	26.9%	2.0%	37.6%	7.3%	0.0%	8.4%	17.9%
T09-RCA	Ref.	12.1%	5.0%	82.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	2019	64.4%	2.6%	20.9%	0.5%	0.0%	0.8%	10.9%
	2021	29.1%	4.0%	44.2%	0.9%	0.0%	3.2%	18.5%
T10-RCA	Ref.	36.5%	2.1%	40.7%	9.3%	0.0%	0.0%	11.4%
	2019	48.1%	0.9%	7.4%	11.3%	0.0%	10.8%	21.6%
	2021	25.0%	4.2%	34.7%	10.2%	0.0%	8.7%	17.2%
T11-RDO	Ref.	55.2%	0.5%	10.0%	26.6%	0.0%	0.0%	7.8%
	2019	24.3%	0.0%	5.7%	24.9%	0.0%	0.0%	45.0%
	2021	19.1%	1.5%	10.7%	20.2%	1.3%	0.0%	47.1%
T11-RPG	Ref.	71.7%	0.0%	19.1%	0.0%	0.0%	0.0%	9.2%
	2019	23.9%	0.0%	0.0%	8.6%	0.0%	0.0%	67.5%
	2021	8.0%	0.5%	16.3%	3.2%	0.0%	0.0%	72.1%

Tabela 10 – Condição de margem em percentual de extensão por trecho de rio analisado.

		Condição de Margem						
Trecho	Período	Arbustos	Erosão	Gramínea/ Pastagem	Leito rochoso	Não classificado	Proteção de talude	Vegetação densa
RGN (T06-T09)	Ref.	26,4%	7,1%	24,6%	2,0%	0,1%	0,3%	39,5%
	2019	37,2%	0,7%	32,0%	5,8%	0,0%	4,7%	19,6%
	2021	25,1%	3,2%	34,4%	9,8%	0,1%	7,1%	20,3%
RCA	Ref.	36,5%	2,1%	40,7%	9,3%		0,0%	11,4%
	2019	48,1%	0,9%	7,4%	11,3%	0,0%	10,8%	21,6%
	2021	25,0%	4,2%	34,7%	10,2%	0,0%	8,7%	17,2%
T11-RDO	Ref.	55,2%	0,5%	10,0%	26,6%		0,0%	7,8%
	2019	24,3%	0,0%	5,7%	24,9%	0,0%	0,0%	45,0%
	2021	19,1%	1,5%	10,7%	20,2%	1,3%	0,0%	47,1%

Figura 21 – Condição de margem em percentual de extensão por trecho de rio analisado.



11. Discussão

Os resultados do estudo indicam que significativas mudanças nas características físicas dos rios afetados pelo rompimento ocorreram no período analisado, e que eles se encontram rumo a um estágio similar as condições definidas como referência. É observado um comportamento diferenciado em relação as características de referência e ao tempo de resposta dos rios impactados quando se avalia individualmente os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce. Essa diferença é possivelmente atribuída ao porte dos rios e do impacto sofrido pelos mesmos, no entanto é importante destacar que parte desta diferença pode ser atribuída à abordagem utilizada para definição dos valores de referência e aos dados utilizados para a caracterização do cenário 2019.

As informações utilizadas permitem avaliar a diversidade de habitats (avaliado pelas métricas de presença de corredeiras e de presença de corredeiras mais poços/remansos) para os três rios principais avaliados, e a qualidade de habitats (avaliado pela métrica presença de áreas com predominância de material grosseiro) somente no rio Gualaxo do Norte.

Nos rios do Carmo e Doce as imagens utilizadas para o cenário de referência (2014) e 2019 não foram coletadas para o objetivo específico de mapear habitats, possuindo algumas limitações na visualização do leito e possuem resolução um pouco menor que as imagens coletadas em 2021 (resolução aproximada de 35 cm, 10 cm e 2~4 cm, respectivamente). Esses fatores acarretam incertezas nas análises, em especial na diferenciação entre habitats de águas calmas (rápidos e poços/remansos). Além da presença de corredeiras em 2021 ser similar a ao cenário de referência, a comparação direta de outras feições geomorfológicas indica similaridade das características físicas com a condição pré-rompimento.

Não foi possível avaliar comparativamente a presença da predominância de material grosseiro (métrica utilizada para inferir a qualidade dos habitats) devido a limitação imposta pela resolução das imagens utilizadas para os cenários de referência e 2019. No entanto, julga-se como razoável a hipótese de que a presença de material grosseiro nesses rios tenha encontrado uma situação de equilíbrio similar a condição anterior ao rompimento. Esta hipótese se baseia no fato de que o processo de alteração das características físicas é cumulativo, ao fato de que já em 2019 a situação de presença de corredeiras era similar a referência anterior ao rompimento, e considera que a evolução da alteração física dos rios Carmo e Doce entre 2019 e 2021 tenha ocorrido seguindo padrão similar ao rio Gualaxo do Norte (mudança observada entre 2019 e 2021, tanto para habitats e quanto material grosseiro, muito expressiva, sendo que em 2019 a presença de habitats da classe corredeiras e predominância de grosseiros era muito inferior a referência, e em 2021 a presença de habitats da classe corredeira era superior a referência e predominância de grosseiro próximo ao observado na referência).

Enquanto que para o rio Gualaxo do Norte como um todo o teste de poder estatístico assegura que, em geral, o rio possui maior área de corredeiras e mais corredeiras somadas a remansos que a referência (poder superior a 99%)⁵³, ao avaliar cada trecho do PMR, com exceção do T09 (poder superior a 99%) não se tem a mesma robustez estatística, em especial para os trechos T06 e T07, em que o número de amostras é relativamente pequeno (causa típica

⁵³ Tipicamente assume-se que um poder de 80% ou maior denota confiabilidade na análise.

de baixa significância estatística no teste utilizado). Na prática, isso implica que é possível concluir que: a) em média o rio Gualaxo do Norte possui maior diversidade de habitats que a referência; b) em média o T09 possui maior diversidade de habitats que a referência; c) as análises mostram que mesmo que o T06, T07 e T08 apresentem em média maior diversidade de habitats que a referência, há uma probabilidade que não pode ser desprezada de que algum pequeno segmento apresente diversidade de habitats menor que a referência.

Em relação a predominância de material grosseiro, foi observada um aumento entre 2019 e 2021. Também é notável a redução significativa de áreas com predominância de “Areias ou mais fino (escuro)”, tendo sido majoritariamente substituído por material que pode ser associado a sedimentos finos de origem natural na bacia hidrográfica (classe “Areias ou mais fino (claros)”). Apesar da significativa mudança entre 2019 e 2021, quando comparado com a referência, em 2021 o Gualaxo do Norte apresenta valores de presença de áreas com predominância de material grosseiro ligeiramente inferiores (comparação corroborada pelas análises estatísticas).

Em resumo, apesar de o rio Gualaxo do Norte já ter alcançado uma condição de presença e diversidade de habitats físicos similar ou superior aos rios da região não afetados pelo rompimento, a qualidade desses habitats (presença de material grosseiro) ainda não está equivalente à de rios não afetados pelo rompimento. É esperado que com o passar do tempo e continuidade dos processos físicos naturais do transporte de sedimentos, a presença de grosseiros no leito do rio Gualaxo do Norte aumente e alcance uma condição similar ou superior aos rios da região não afetados pelo rompimento⁵⁴.

Em trechos com maior declividade é observado uma maior diversidade de habitats (a presença percentual de rápidos é menor e a presença percentual de remansos, corredeiras e cascatas é maior) e maior quantidade de material grosseiro. De maneira análoga, os resultados indicam que habitats físicos caracterizados por maior gradiente energético (cascatas e corredeiras) apresentam menor quantidade de finos que habitats caracterizados por menor gradiente energético (rápidos e remansos). Isto indica que a erosão do leito (em específico a erosão seletiva de material fino) tem sido o principal processo na formação e alteração das características físicas dos rios, que padrão de remobilização e erosão do material mais fino é

⁵⁴ Não é o objetivo do estudo estimar cenários futuros/tempo de recuperação. Os métodos e resultados obtidos não são adequados para realização de tal estimativa.

uma função da energia hidráulica local, e que pode ser escalada para cada habitat físico de maneira individual.

A variação dos resultados em função da declividade também sugere que a recuperação do sistema é limitada pela quantidade de trabalho que os rios são capazes de realizar, e é esperado aumento da recuperação das características físicas do leito fluvial com o aumento da capacidade de trabalho dos rios, seja pela ocorrência de grandes eventos de cheia (grande capacidade de trabalho concentrada no período de duração do evento), ou mesmo pela ocorrência contínua de vazões de menor intensidade – pois o trabalho de recuperação do rio é cumulativo e contínuo.

Apesar de ser observado uma maior presença de corredeiras no rio Gualaxo do Norte, seguido pelo Carmo e por último o rio Doce, não se observa uma clara tendência espacial de montante para jusante quando se avalia o trecho como um todo, excetuando-se somente os primeiros quilômetros do rio do Carmo. Apesar desta exceção, os resultados sugerem que uma vez erodido pelo escoamento, o material composto de rejeitos finos entra no transporte por suspensão (*suspended load*) ou por lavagem (*wash load*) e é rapidamente (ao longo de dias ou semanas) transportado para jusante, com limitada interação com o leito do rio, e limitada tendência de deposição. Esses resultados são concordantes com os dados de estratigrafia levantados no âmbito do monitoramento intracalha (WSP Golder, 2022) que aponta na maioria das amostras que a camada superior é composta por material grosseiro ou por uma camada de material de cor clara e granulometria equivalente à areia ou mais fino.

Quanto a correlação entre intervenções humanas e o comportamento da presença de habitats e material predominante na camada ativa do leito, ainda que não se possa estabelecer uma correlação quantitativa direta, os resultados indicam uma grande melhora na diversidade de habitats, com aumento expressivo de corredeiras, no trecho coincidente com a área de abrangência da renaturalização implantada no T06 (aproximadamente RK-116 e RK-117), e aumento expressivo de grosseiros no RK-116, porém aumento de material fino escuro no RK-117, o que pode ser um indicio de limitação do método da classificação visual do material do leito em trechos de maior profundidade e com turbulência na lâmina d'água que homogeneízam a representação do leito e induzem à um erro conservador para o estudo de caso, de se considerar material grosseiro (tipicamente escuro) como material fino escuro (maiores informações no Apêndice E. Em relação a renaturalização implantada no T07, observa-se alterações somente na metade de montante, onde ocorreu aumento na presença de corredeiras e a criação de habitat

do tipo remanso (não presente em 2019). A metade inferior é dominada por rápidos formados, provavelmente, pelo efeito de remanso imposto pelos controles hidráulicas naturais localizados imediatamente a jusante do trecho renaturalizados⁵⁵.

Ainda sobre intervenções humanas, é observada uma tendência de formação de poços/remansos junto às estruturas rígidas de enrocamento implantadas nas margens externas de curvas. Acredita-se que a limitação da movimentação lateral (esperada na parte externa de curvas de rios) promovida pelas estruturas de proteção tenha favorecida a erosão em profundidade e a formação de poços/remansos. Essa observação, juntamente com a estabilidade observada das estruturas indicam que elas tem sido efetivas no controle de erosão das margens, e tem impedido/limitado a movimentação lateral que teria como consequência a erosão de parte dos depósitos estáveis de rejeitos nas planícies de inundação. Outro fenômeno observado junto as estruturas de enrocamento é a contribuição direta de material grosseiro para o leito do rio (é observado em travessias molhadas construídas). Destaca-se ainda que muitas estruturas estão sendo incorporadas pela vegetação.

Os resultados deste estudo correspondem à uma avaliação dos habitats físicos em uma escala macro (mesohabitats) e predominância de material grosseiro no leito fluvial que possui cobertura completa da área compreendida entre o T06 e T11. Parâmetros como biodiversidade e habitats físicos em microescala tipicamente apresentam uma boa correlação com a presença de habitats físicos em macroescala. Avalia-se que a base de dados produzida é complementar a outras fontes de dados levantados de maneira localizada/pontual, por exemplo dados do monitoramento da biodiversidade e informações pontuais de mapeamento de habitats em microescala (Hydrobiology, 2018,2020), e pode fornecer a base para uma avaliação mais global do processo de recuperação dos rios.

12. Limitações e incertezas das análises

Os procedimentos e métodos adotados baseados em imagens aéreas são amplamente amparados pela literatura especializada, (Curtis e Guerrero, 2015; Labbe e colaboradores, 2005; Coffman e colaboradores, 2011; Rinaldi e colaboradores, 2015; Janisch, J, 2013; entre outros), tendo sido previamente testados e validados contra procedimentos de avaliação direta em

⁵⁵ A renaturalização implantada no trecho T09 ocorreu somente 2 meses antes do levantamento das imagens aéreas de 2021, de modo que (com os dados utilizados no presente estudo) não foi possível realizar uma comparação e avaliar sua evolução entre 2019 e 2021.

campo. Destaca-se ainda que o uso de imagens aéreas se mostra como um registro de dados “estático no tempo” que pode ser verificado com maior facilidade, diferente de algumas informações de protocolos baseados em informação do campo que necessitaria nova visita ao local para verificação dos resultados (verificação que pode ser inviável devido à possíveis mudanças das características dos rios, i.e., após grandes eventos de cheia, tal qual o ocorrido na estação chuvosa subsequente ao levantamento de imagens realizado – evento de cheia de janeiro de 2022).

Como todo procedimento de fotointerpretação, a classificação de habitats, bem como a do material predominante no leito e classificação das condições das margens, possui incertezas inerentes. Especificamente falando de habitats, a maior fonte de incerteza é tipicamente associada à definição do limite entre duas classes diferentes, que dependendo do julgamento profissional pode se localizar um pouco mais a montante ou mais a jusante, o que pode influenciar a estimativa na área do habitat delineado. Ainda que seja esperada certa aleatoriedade nesse processo (o que minimiza a incerteza da estimativa geral de área das classes de habitats, i.e., análise de um longo trecho ou de um rio como um todo), a mesma equipe de engenheiros e geomorfologistas realizou o mapeamento para os três cenários, assegurando que a comparação entre eles não é tendenciosa. Em outras palavras, ainda que existam incertezas, espera-se que elas possuam a mesma ordem de grandeza e não afetem de maneira tendenciosa as comparações.

Foi realizada comparação dos resultados de predominância de material no leito com amostras de campo, apresentando boa assertividade. O principal tipo de erro indicado foi o de se classificar material grosseiro com material classificado como “Areias ou mais finos (escuros)”. Isso ocorre em regiões com menor visibilidade do leito (mais profundas e/ou com turbulência da água), a qual proporciona uma homogeneização das imagens. Ressalta-se que essa tendência é conservadora para o estudo, ao passo que tende a reduzir a presença de grosseiros, principal métrica utilizada para avaliação da qualidade dos habitats físicos.

A impossibilidade de se avaliar diretamente a condição do rio Gualaxo do Norte antes do rompimento é uma fonte de incerteza inerente não só ao estudo de mapeamento de habitats, mas a diversos outros estudos e parâmetros avaliados no âmbito da análise de recuperação ambiental dos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão. Conforme em outros estudos, foi adotada uma abordagem de se comparar o estado do rio Gualaxo do Norte com referência regional (*space-for-time substitution*). A minimização da incerteza associada a essa

abordagem foi realizada por meio da seleção de um número de trechos de rios da região que garantisse robustez estatística na comparação dos resultados (baseada em teste de poder estatístico *a priori*) sendo a significância estatística também verificada posteriormente na comparação dos resultados (testes de poder estatístico *a posteriori*). Destaca-se que a similaridade ao Gualaxo do Norte foi avaliada considerando fatores hidrológicos, pedológicos, geomorfológicos e de uso e ocupação do solo, que são os principais fatores que influenciam as características dos rios.

Nos rios do Carmo e Doce, a utilização de imagens com diferentes resoluções coletadas para outros fins que não o mapeamento de habitats físicos introduz incertezas na análise comparativa entre os cenários avaliados, especialmente quanto a comparação dos resultados para habitats de águas calmas (rápidos e poços/remansos) que são mais dependentes da visualização de características do leito do rio. Essa incerteza é menor na delimitação de corredeiras, as quais a turbulência na lâmina d'água, que é bem identificada, auxilia na delimitação dessa classe de habitat. A avaliação direta de imagens de momento anterior ao rompimento nos rios do Carmo e Doce permitiu a realização de avaliação comparativa qualitativa de feições geomorfológicas, permitindo a realização de uma comparação adicional para dar maior robustez às inferências quanto as alterações físicas que os rios têm passado e seu processo de recuperação.

A área onde a presença de cobertura vegetal do canal, ou de áreas em que seu sombreamento, impedem a visualização do leito e, por consequência, a classificação dos habitats foi inferior a 1% ao longo do rio Gualaxo do Norte e inexistente nos rios do Carmo e Doce. A obstrução da visualização do canal causada pela cobertura vegetal não é uma fonte significativa de incerteza ao estudo realizado. Espera-se que com o passar do tempo e desenvolvimento dessa vegetação as condições de visibilidade do leito piorem. Nos rios da região utilizados para definir a condição de referência para o rio Gualaxo do Norte a presença é maior, mas ainda sim é relativamente pequena (~6%), não sendo avaliado como fator crítico ao estudo.

O presente estudo trata-se de uma avaliação das características físicas dos rios, analisados pela presença de habitats físicos em uma escala macro (mesohabitats) e predominância de material grosseiro no leito fluvial. Apesar de tipicamente os mesohabitats apresentarem uma boa correlação com microhabitats (i.e., mesohabitats de águas calmas são tipicamente compostos por diferentes classes de microhabitats de águas calmas), não é

aconselhada a inferência da recuperação de habitats em microescala sem a realização de uma análise específica.

A presença e diversidade de habitats físicos também é tipicamente associada a biodiversidade. Em casos de recuperação de rios observa-se uma correlação entre a recuperação de características físicas dos rios e o retorno da biodiversidade em quantidade e abundância. O retorno de condições similares as do momento pré-rompimento é um forte indicativo de que o sistema fluvial estaria apto e forneceria condições ao retorno da vida em abundância e diversidade similares à de momentos anteriores ao rompimento, no entanto, fatores como impactos causados por outros agentes não relacionados com o rompimento (i.e., mineração ilegal, lançamento de efluentes, etc.) podem, eventualmente, contribuir para inibição do retorno da biodiversidade. Além de serem fortemente influenciáveis por fatores externos, a riqueza e abundância da biodiversidade sofre influência da sazonalidade. Deve-se também considerar uma população de indivíduos leva tempo para se desenvolver até sua maturidade, em outras palavras, uma vez que o sistema fluvial proporcione condições de colonização (recuperação dos habitats físicos) ainda pode levar um tempo para que abundância e diversidade se recuperem. Desta maneira, ressaltamos que inferências diretas sobre aspectos de recuperação de biodiversidade não são aconselhadas.

13. Conclusões e recomendações

As informações apresentadas neste documento correspondem à uma base de dados robusta gerada a partir de mapeamento de habitats físicos em uma macroescala (mesohabitats) e da condição dos leitos dos rios. Esse processo foi executado para a definição da condição de referência⁵⁶, e da condição no ano de 2019 e no ano de 2021 para os rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão entre os trechos T06 e T11: rio Gualaxo do Norte, Carmo e Doce. Dados quantitativos da presença de habitats físicos, material predominante na camada ativa do leito e condições das margens foram produzidos. Todas essas informações foram necessárias para atender o objetivo principal deste trabalho, que é avaliar e mapear os habitats físicos para condição de referência e em momentos após o rompimento, para caracterizar os

⁵⁶ Adotamos o termo “condição de referência” em detrimento ao termo “dados pretéritos”, pois é utilizado valores regionais para caracterizar o estado “não impactado” do rio Gualaxo do Norte, correspondente à sua condição anterior ao evento (abordagem tipo *space-for-time substitution*).

processos físicos e identificar as respostas do sistema fluvial (T06 ao T11) à perturbação causada pelo rompimento da barragem de Fundão.

A seguir são apresentados as principais conclusões e recomendações baseadas na análise da presença de habitats, predominância de material grosseiro, incluindo a análise de poder estatístico realizada, e condição das margens:

- No geral e na avaliação de trechos específicos (i.e., resultados agrupados por trechos do PMR), para todos os parâmetros medidos, a comparação entre os cenários de 2019 e 2021 indica que os rios avaliados passaram por mudanças significativas durante esses 2 anos;
- Em média o rio Gualaxo do Norte possuía em 2021 maior diversidade de habitats que a referência, sendo inferido que ele apresentava em 2021 condição de presença de habitats similar ao momento anterior ao rompimento;
- Em média o T09 possuía em 2021 maior diversidade de habitats que a referência, sendo inferido que ele apresentava em 2021 condição de presença de habitats similar ao momento anterior ao rompimento;
- As análises mostram que mesmo que o T06, T07 e T08 apresentavam em 2021 valores médios maiores diversidade de habitats que a referência, há uma probabilidade que não pode ser desprezada de que algum pequeno segmento apresente diversidade de habitats menor que a referência;
- As análises quanto a predominância de material grosseiro, métrica utilizada para avaliar a condição/qualidade dos habitats físicos, indica que o rio Gualaxo do Norte possui menor quantidade de área com predominância de material grosseiro que os rios da região, sendo inferido que ele em 2021 ele não apresentava condições de predominância de material grosseiro e de condição/qualidade de habitats similares ao momento anterior ao rompimento;
- Em 2021 os rios do Carmo e Doce apresentavam características de presença corredeiras e de outras feições geomorfológicas (i.e., localização e dimensão de bancos de sedimentos, áreas rasas e ilhas) similares a condição de referência, indicando que foi atingida condição similar a pré-rompimento;

- Devido a característica das imagens utilizadas para definição da referência e cenário de 2019, não foi possível analisar a predominância de material grosseiro e qualidade dos habitats nos rios do Carmo e Doce. No entanto, esse dado foi levantado no ano de 2021, sendo predominantemente ocupado por sedimentos finos de origem natural na bacia hidrográfica (classe “Areias ou mais fino (claros)”);
- Os resultados indicam que intervenções humanas avaliadas (renaturalização no T06 e T07 e obras de estabilização de margens por enrocamento) tem influência na formação de habitats físicos, e aparentam ter auxiliado, até o momento, na diversificação de habitats e material predominante do leito. Não foi possível quantificar a influência das intervenções;
- A presença de material lenhoso e troncos no rio Gualaxo do Norte é inferior a referência (nos rios do Carmo e Doce não foi possível avaliar a condição de referência para este parâmetro devido a resolução das imagens). Recomendamos a continuidade das ações de recuperação da floresta ripária ao longo do rio Gualaxo do Norte, em específico com ações de revegetação bem próxima ao rio, permitindo que folhas, galhos e, eventualmente, a própria árvore caiam no rio, voltando a cumprir suas funções ecológicas de aporte de nutrientes e material lenhoso para o rio. Ações de renaturalização tem potencial para aumentar o aporte de material lenhoso no Gualaxo do Norte, e podem ser utilizadas pontualmente durante o período de desenvolvimento da mata ciliar;
- A correlação entre uma maior diversidade de habitats e maior predominância de material grosseiro com maiores declividades sugere que a recuperação do sistema é limitada pela quantidade de trabalho que os rios são capazes de realizar, indicando que a erosão do leito (em específico a erosão seletiva de material fino) tem sido o principal processo na formação e alteração das características físicas dos rios. É esperado que grandes eventos de cheia (grande capacidade de trabalho concentrada no período de duração do evento), e que a ocorrência contínua de vazões de menor intensidade (a alteração física é rio é um processo cumulativo e contínuo), promovam alterações nas características físicas dos rios, dando continuidade ao processo de recuperação;

- Os resultados apresentados neste estudo correspondem à uma base de dados robusta e que poderiam ser utilizadas como indicadores de recuperação dos rios. No entanto, para os parâmetros referentes a diversidade de habitats, os valores que seriam adotados como meta foram alcançados em algum momento entre 2019 e 2021, o que levaria ao encerramento do acompanhamento do indicador. Em outras palavras, apesar de atender o critérios mínimos para ser utilizado como indicador, os resultados utilizadas para avaliação da diversidade de habitats físicos apontam que não seria mais necessário seguir com o monitoramento desses parâmetros. É válido ressaltar que informações referentes a granulometria do material do leito têm sido levantadas de maneira pontual por outros trabalhos e monitoramentos (i.e., PMQQS e monitoramento intracalha).

14. Considerações finais

Os resultados correspondem a uma base de dados quantitativa, com abrangência completa dos trechos T06 à T11 localizados na área impactada dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (a montante do reservatório de Candonga) que é representativa das condições esperadas em momento anterior ao rompimento e/ou para rios não afetados pelo rompimento, e para condição de 2019 e 2021.

O uso de imageamento aéreo para a classificação dos habitats forneceu excelente cobertura para o ano de 2021 com menos de 1% da área do rio Gualaxo do Norte sem condições de visualização do leito, e nenhuma área com obstruções que impedissem a classificação de habitats no rio do Carmo e rio Doce. Diferentemente de procedimentos que seriam fundamentados na observação e registro em campo da presença de habitats, a abordagem utilizada realiza o registro das condições de campo com as imagens, e permitem eventual reavaliação dos resultados, mesmo após mudanças das condições de campo (i.e., após a ocorrência de evento de cheia).

Avalia-se os procedimentos adotados, métodos escolhidos, informações utilizadas, análises realizadas e resultados produzidos, forneceram subsídios suficientes para o atendimento pleno dos objetivos gerais e específicos do trabalho, bem como as requisições colocados pela NT CT-GRSA nº 10-2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aplysia (2019). Renaturalização do rio Gualaxo do Norte: Design de Instalação das Estruturas (Relatório técnico nº 496/2020). Rev. 02. Relatório preparado para Fundação Renova. 2019.

Aplysia (2021a). Renaturalização do rio Gualaxo do Norte: Relatório Final das Campanhas de Monitoramento (Relatório técnico nº 039/2021). Rev. 01. Relatório preparado para Fundação Renova. 2021.

Aplysia (2021b). Renaturalização do Rio Gualaxo do Norte: Design de Instalação das Estruturas no Trecho Expansão - Relatório Técnico nº 486/2020 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995), NBR 6502: Rochas e solos, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D. et al. (2015) A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environ Earth Sci* 73, 2079–2100 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3558-1>

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.

Boothroyd, R.J., Williams, R.D., Hoey, T.B., Barrett, B. and Prasojo, O.A. (2020). Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. *WIREs Water*, 8: e21496. doi.org/10.1002/wat2.1496

Brown, L. (2014). Texture Shading: A New Technique for Depicting Terrain Relief.

Childs, C. (2004). Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. *ArcUser*, July-September, 3235. [online]. Disponível em: <http://webapps.fundp.ac.be/geotp/SIG/interpolating.pdf> (Acesso realizado em 27 março de 2017).

CH2M (2017). Volume 1 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito – Trecho 8 – Revisão 00. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP.

CH2M (2017a). Volume 1 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito – Trecho 8 – Revisão 00. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP CH2M/JACOBS (2018a).

Volume 2 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito – Trechos 6 e 7 – Revisão 00. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP. 358p.

CH2M/JACOBS (2018b). Volume 4 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 9 – Revisão 00. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP. 533p.

CH2M/JACOBS (2018c). Volume 5 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 10 e 11 – Revisão 01. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP. 491p.

Coffman, D.K.; Malstaff, G.; e Heitmuller, F.T. (2011). *Characterization of geomorphic units in the alluvial valleys and channels of Gulf Coastal Plain rivers in Texas, with examples from the Brazos, Sabine, and Trinity Rivers, 2010*. Relatório preparado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. Geological Survey) Scientific Investigations Report 2011–5067, 31 p.

Curtis, J. A. e Guerrero, T. M. (2015). *Geomorphic Mapping to Support River Restoration on the Trinity River Downstream from Lewiston Dam, California, 1980–2011*. Relatório N° 2015–1047, preparado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em cooperação com Trinity River Restoration Project

Geopixel (2019). Serviços de monitoramento das ações de reabilitação ambiental das áreas impactadas entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves por meio de fotos aéreas, panorâmicas e índices de vegetação e geoprocessamento. Relatório Compilado semestral das campanhas de monitoramento Ref.: fev/19 a set/2019. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São José dos Campos, 2019.

Gilvear D, Davids C & Tyler A (2004). The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology; River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, 20 (7), pp. 795-811. <https://doi.org/10.1002/rra.792>

Golder (2020). Aplicação do Método Analítico para avaliação do LAG LAYER. Relatório Final - RT-004_209-535-2625_02. Relatório preparado para Fundação Renova, 2020.

Golder (2021). Atualização do Volume 10 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 13 e 14 – Revisão 00. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP.

Golder (2016). 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 SA. julho de 2016.

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

Janisch, J (2013) *Dictionary of Metrics for Physical Habitat: Definitions and Calculations Used for Watershed Health Monitoring and Related Studies*. Relatório N° 13-03-033 do Washington State Department of Ecology, Environmental Assessment Program, disponível em <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1303033.pdf> (acesso 09/12/2021).

Jones, J. L. (2006). Side channel mapping and fish habitat suitability analysis using lidar topography and orthophotography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(11), 1202.

Labbe, T.; Grotefendt, R.; Carter-Mortimer, A. and Jones, J. Ç. (2005). *Dosewallips River Habitat Assessment: Coupling High-Resolution Remote Sensing and Ground Surveys to Prioritize Aquatic Conservation, Olympic Mountains, Washington State*. Relatório preparado para o Departamento Americano de Assuntos Indígenas (USDI – Bureau of Indian Affairs). Dezembro de 2005.

Lactec (2020). Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO II – AMBIENTES AQUÁTICOS CONTINENTAIS. Diagnóstico de Danos. Curitiba, 2020.

Legleiter, C. (2003). Spectrally Driven Classification of High Spatial Resolution, Hyperspectral Imagery: A Tool for Mapping In-Stream Habitat. *Environmental Management* 32, 399–411 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0034-1>

Marcus WA. 2002. Mapping of instream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. *Journal of Geographical Systems* 4.

Marcus, W. A., Legleiter, C. J., Aspinall, R. J., Boardman, J. W., and Crabtree, R. L., (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams, *Geomorphology*, vol. 55, pp. 363–380, 2003. doi:10.1016/S0169-555X(03)00150-8.

Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596–611.

Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (1998). Channel processes, classification, and response. *River ecology and management*, 112, 1250–1263.

Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, S. G., and Watts, B. D. (2016). Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam.

Namikawa, Y., & Steenbrink, J. H. M. (1995). Global smoothing of Calabi-Yau threefolds. *Inventiones mathematicae*, 122(1), 403-419.

NHC (2012). *Peace Project Water Use Plan: Peace River Hydraulic Habitat Study*. Relatório preparado para BC Hydro, novembro de 2012.

NHC (2020). Atlas Geomorfológico para o Rio Gualaxo do Norte – Apêndice A: Relatório técnico sobre mapeamento de habitats físicos e de unidades geomorfológicas. Revisão 0. Relatório Técnico preparado para Fundação Renova. Novembro de 2020.

NHC (2021). Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Plano de trabalho. Revisão 02. Relatório Técnico preparado para Fundação Renova. Janeiro de 2021.

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.

Platts, W. S.; Megahan, W. F.; Wshall, G. W. (1983). *Methods for e evaluating stream, riparian, and biotic conditions*. GeTL. Tech. Rep. INT-138. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Semice, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1983. 70 p3

Raven, P. J.; Fox, P.; Everar, M., et. al (1997). River Habitat Survey: a new system to classify rivers according to their habitat quality. n book: *Freshwater Quality: Defining the indefinable*. Editora Stationery Office, Edinburgh, UK.

Rinaldi, M.; Belletti, B.; Berga Cano, M. I. et. al (2015). *Final report on methods, models, tools to assess the hydromorphology of rivers*. Deliverable 6.2, Relatório preparado em cinco partes para REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), um projeto de colaboração de grande escala financiado pela European Commission pelo 7th Framework Programme, acordo de financiamento 282656.

Silva, L.A. and Nazareno, N.R.X. (2009), Análise do padrão de exatidão cartográfica da imagem do Google Earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, p. 1723-1730. Abril de 2009.

Suska, K. and Parasiewicz, P. (2020). Application of the Mesohabitat Simulation System (MesoHABSIM) for Assessing Impact of River Maintenance and Restoration Measures. *Water* 12, no. 12: 3356. <https://doi.org/10.3390/w12123356>

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

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

Woodget, A.S., Austrums, R., Maddock, I.P. and Habit, E. (2017), Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. *WIREs Water*, 4: e1222. <https://doi.org/10.1002/wat2.1222>

Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D. et al. (2015). A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environ Earth Sci* 73, 2079–2100 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3558-1>

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.

Boothroyd, R.J., Williams, R.D., Hoey, T.B., Barrett, B. and Prasojo, O.A. (2020). Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. *WIREs Water*, 8: e21496. doi.org/10.1002/wat2.1496

Brown, L. (2014). Texture Shading: A New Technique for Depicting Terrain Relief.

Childs, C. (2004). Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. *ArcUser*, July-September, 3235. [online]. Disponível em: <http://webapps.fundp.ac.be/geotp/SIG/interpolating.pdf> (Acesso realizado em 27 março de 2017).

Coffman, D.K.; Malstaff, G.; e Heitmuller, F.T. (2011). *Characterization of geomorphic units in the alluvial valleys and channels of Gulf Coastal Plain rivers in Texas, with examples from the Brazos, Sabine, and Trinity Rivers, 2010*. Relatório preparado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. Geological Survey) Scientific Investigations Report 2011–5067, 31 p.

Curtis, J. A. e Guerrero, T. M. (2015). *Geomorphic Mapping to Support River Restoration on the Trinity River Downstream from Lewiston Dam, California, 1980–2011*. Relatório N° 2015–1047, preparado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em cooperação com Trinity River Restoration Project.

Geopixel (2019). *Serviços de monitoramento das ações de reabilitação ambiental das áreas impactadas entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves por meio de fotos aéreas, panorâmicas e índices de vegetação e geoprocessamento. Relatório Compilado semestral das campanhas de monitoramento Ref.: fev/19 a set/2019*. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São José dos Campos, 2019.

Gilvear D, Davids C & Tyler A (2004). The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology; River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, 20 (7), pp. 795-811. <https://doi.org/10.1002/rra.792>

Janisch, J (2013). *Dictionary of Metrics for Physical Habitat: Definitions and Calculations Used for Watershed Health Monitoring and Related Studies*. Relatório N° 13-03-033 do Washington State Department of Ecology, Environmental Assessment Program, disponível em <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1303033.pdf> (acesso 09/12/2021).

Jones, J. L. (2006). Side channel mapping and fish habitat suitability analysis using lidar topography and orthophotography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(11), 1202.

Labbe, T.; Grotefendt, R.; Carter-Mortimer, A. and Jones, J. Ç. (2005). *Dosewallips River Habitat Assessment: Coupling High-Resolution Remote Sensing and Ground Surveys to Prioritize Aquatic Conservation, Olympic Mountains, Washington State*. Relatório preparado para o Departamento Americano de Assuntos Indígenas (USDI – Bureau of Indian Affairs). Dezembro de 2005.

Legleiter, C. (2003). Spectrally Driven Classification of High Spatial Resolution, Hyperspectral Imagery: A Tool for Mapping In-Stream Habitat. *Environmental Management* 32, 399–411 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0034-1>

Marcus WA. (2002). Mapping of instream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. *Journal of Geographical Systems* 4.

Marcus, W. A., Legleiter, C. J., Aspinall, R. J., Boardman, J. W., and Crabtree, R. L., (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams, *Geomorphology*, vol. 55, pp. 363–380, 2003. doi:10.1016/S0169-555X(03)00150-8.

Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596–611.

Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (1998). Channel processes, classification, and response. *River ecology and management*, 112, 1250–1263.

NHC (2012). *Peace Project Water Use Plan: Peace River Hydraulic Habitat Study*. Relatório preparado para BC Hydro, novembro de 2012.

NHC (2021). Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: PLANO DE TRABALHO – Revisão 02. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo, janeiro de 2021.

NHC (2022). Mapeamento de habitats físicos nos trechos T06 à T11 e definição da condição de referência: Mapeamento dos Habitats para o ano de 2019 – Revisão 01. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo, janeiro de 2022.

Platts, W. S.; Megahan, W. F.; Wshall, G. W. (1983). *Methods for e evaluating stream, riparian, and biotic conditions*. GeTL. Tech. Rep. INT-138. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Semice, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1983. 70 p3

Raven, P. J.; Fox, P.; Everar, M., et. al (1997). River Habitat Survey: a new system to classify rivers according to their habitat quality. n book: *Freshwater Quality: Defining the indefinable*. Editora Stationery Office, Edinburgh, UK.

Rinaldi, M.; Belletti, B.; Berga Cano, M. I. et. al (2015). *Final report on methods, models, tools to assess the hydromorphology of rivers*. Deliverable 6.2, Relatório preparado em cinco partes para REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), um projeto de colaboração de grande escala financiado pela European Commission pelo 7th Framework Programme, acordo de financiamento 282656.

Silva, L.A. and Nazareno, N.R.X. (2009), Análise do padrão de exatidão cartográfica da imagem do Google Earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, p. 1723-1730. Abril de 2009.

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

Woodget, A.S., Austrums, R., Maddock, I.P. and Habit, E. (2017), Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. *WIRES Water*, 4: e1222. <https://doi.org/10.1002/wat2.1222>

Wright A, Marcus WA, Aspinal, R. (2000). Evaluation of multispectral, fine scale digital imagery as a tool for mapping stream morphology.

Worley (2019). Volume 10 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 13 e 14 – Revisão 3. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. Setembro de 2019.

WSP Golder (2022). Monitoramento intracalha de sedimentos - Março a Novembro de 2021 (Campanhas F, G e H) - Revisão 01. Relatório técnico N° RT-008_209-535-7742_01, preparado para Fundação Renova. São Paulo, 2022.

Apêndice A

**ANÁLISE E SELEÇÃO DE TRECHOS DE RIOS DA REGIÃO
PARA DEFINIÇÃO DOS VALORES DE REFERÊNCIA DE
PRESENÇA DE HABITATS FÍSICOS E
PRESENÇA DE MATERIAL GROSSEIRO
PARA O RIO GUALAXO DO NORTE**

Apêndice B

ANÁLISE E SELEÇÃO DAS IMAGENS UTILIZADAS NO MAPEAMENTO DE HABITATS FÍSICOS

Apêndice C

AEROLEVANTAMENTO E INSPEÇÃO DE CAMPO

Apêndice D

Procedimentos metodológicos

Apêndice E

ANÁLISE COMPARATIVA DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL DO MATERIAL PREDOMINANTE NA CAMADA SUPERFICIAL DO LEITO COM AMOSTRAS DE CAMPO

Apêndice F

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

Apêndice G

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Apêndice H

ANÁLISE DA PRESENÇA DE MATERIAL LENHOSO (LWD – LARGE WOOD DEBRIS) NA CALHA FLUVIAL

Apêndice I

MAPAS DOS DE HABITATS FÍSICOS DOS TRECHOS DE RIOS DA REGIÃO UTILIZADOS PARA DEFINIR A CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA DO RIO GUALAXO DO NORTE (T06 À T09)

Apêndice J

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS HABITATS FÍSICOS DOS TRECHOS DE RIOS DA REGIÃO UTILIZADOS PARA DEFINIR A CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA DO RIO GUALAXO DO NORTE (T06 À T09)

Apêndice K

MAPAS DOS DE HABITATS FÍSICOS PARA O ANO DE 2014 PARA DEFINIR A CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA DOS RIOS DO CARMO E DOCE (T10 E T11)

Apêndice L

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS HABITATS FÍSICOS PARA O ANO DE 2014 PARA DEFINIR A CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA DOS RIOS DO CARMO E DOCE (T10 E T11)

Apêndice M

MAPAS DOS DE HABITATS FÍSICOS PARA O ANO DE 2019

Apêndice N

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS HABITATS FÍSICOS PARA O ANO DE 2019

Apêndice O

MAPAS DOS DE HABITATS FÍSICOS PARA O ANO DE 2021

Apêndice P

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS HABITATS FÍSICOS PARA O ANO DE 2021

Apêndice Q

MAPAS COMPARATIVOS ENTRE 2019 E 2021