

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**

Fevereiro/2023



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

REVISÃO 02

Plano de Trabalho

PT-002_22-535-632_02

São Paulo / 2023

REVISÕES							
TE: A - PRELIMINAR C - PARA E - PARA CONSTRUÇÃO G - CONFORME CONSTRUÍDO CONHECIMENTO							
TIPO DE EMISSÃO: B - PARA APROVAÇÃO D - PARA COTAÇÃO F - CONFORME COMPRADO 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

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	8
2.1 Objetivos Específicos	8
2.2 Premissas, Exclusões e Limitações do Estudo	8
3 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA GEOMORFOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	11
3.1 Análise dos Dados Disponíveis em Outros Estudos (Pré e Pós Rompimento).....	11
3.2 Caracterização Geomorfológica dos Segmentos do Rio Doce a Montante da UHE Risoleta Neves	12
3.3 Mapeamento Geomorfológico das Principais Feições Fluviais	15
3.4 Coleta de dados em campo.....	17
3.5 Análise Integrada dos Cenários de Alterações Geomorfológica a Montante da UHE Risoleta Neves	21
4 RESULTADOS ESPERADOS	22
5 CRONOGRAMA	23
6 EQUIPE TÉCNICA	24
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
ANEXO 1 – Relatório Técnico: Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão (RT-023_159-515-2282_01-J)	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Confluência dos Rios Gualaxo do Norte e Rio do Carmo na cidade de Barra Longa-MG.....	5
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	7
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	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais bases de dados utilizadas no trabalho	11
Tabela 2 – Parâmetros geomorfométricos avaliados para caracterização do curso d'água	15
Tabela 3 – Classes geomorfológicas serão utilizadas para classificar o sistema fluvial do Rio Doce.	17
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)	18
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).....	19

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)
--

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

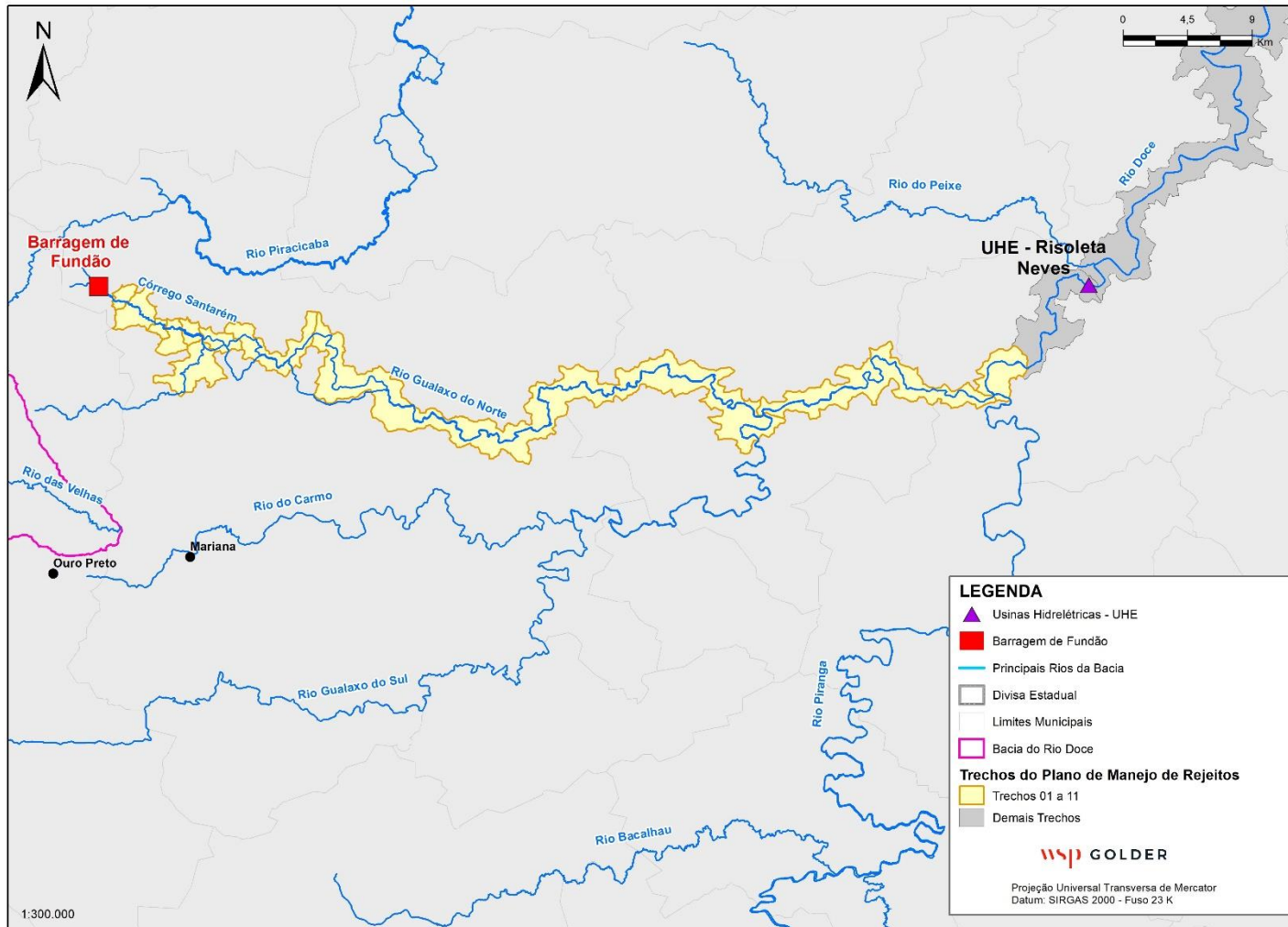
sem que haja extravasamento da calha regular do canal, especialmente nas margens ou em bancos de areia. Posteriormente à passagem da onda de rejeitos ocorreu remobilização de rejeitos depositados no sistema hídrico afetado, tanto em trechos a montante quanto a jusante da UHE Risoleta Neves, em função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



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.

2.2 Premissas, Exclusões e Limitações do Estudo

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

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.

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 matriciais produzidos para a elaboração do trabalho

BASE DE DADOS	FONTE	DESCRIÇÃO
Barragem de Fundão (RT-023_159-515-2282_01-J) (Golder, 2016a)		
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 ortofotografias;
- ✓ Vazões médias e vazões 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 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), 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 Wm (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, 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.

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

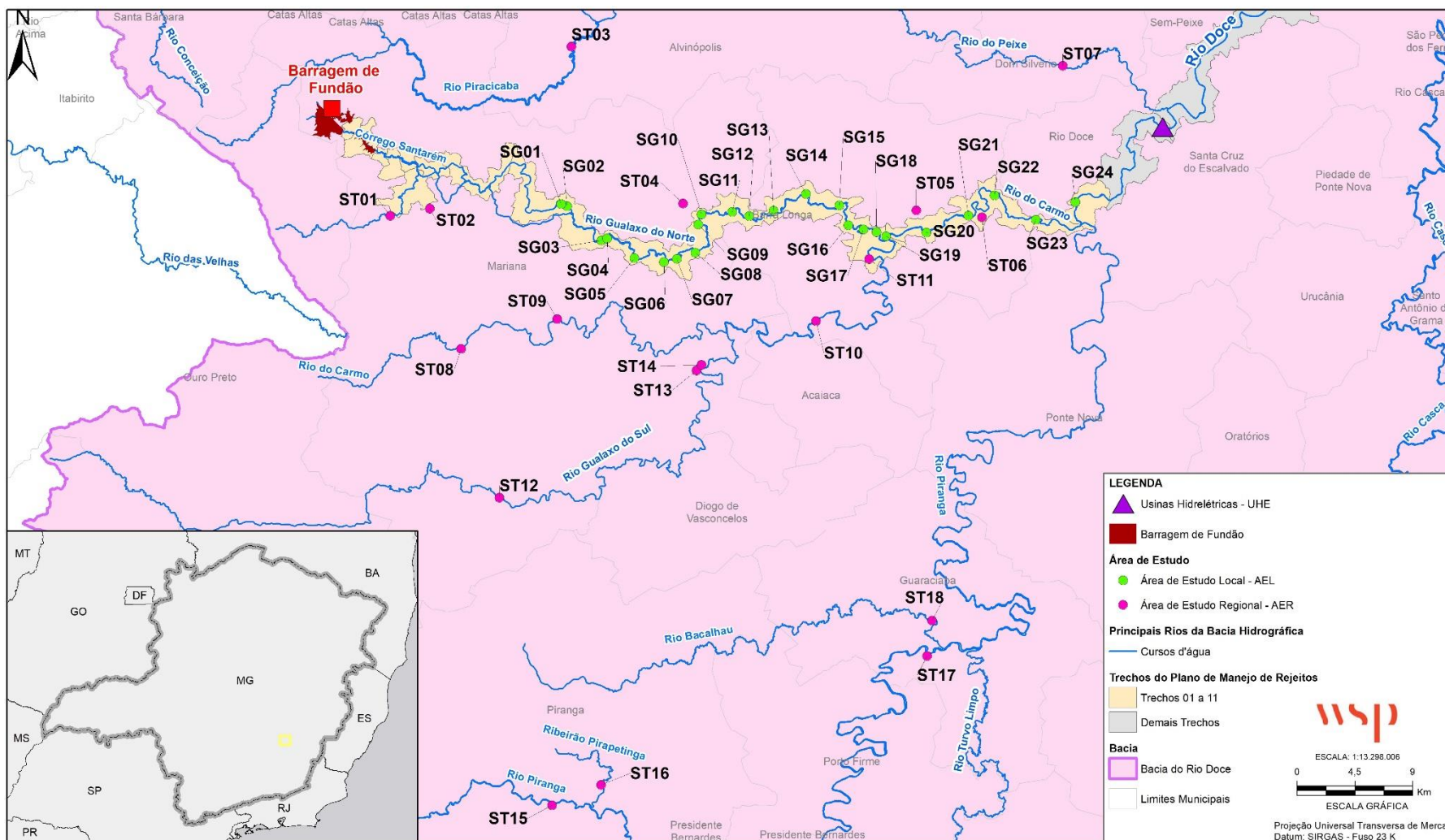
Tabela 5 – Coordenadas de pontos de visitas em tributários não afetados pelo rompimento da barragem de Fundão que foram avaliados em 2016^(a) (UTM, SIRGAS2000 23S)

AVALIAÇÃO DE CAMPO DE TRIBUTÁRIO NÃO AFETADOS	LESTE	NORTE	NOME DO RIO
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).

4 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.

5 CRONOGRAMA

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

ATIVIDADE	MÊS 1	MÊS 2	MÊS 3	MÊS 4	MÊS 5	MÊS 6	MÊS 7	MÊS 8	MÊS 9	MÊS 10	MÊS 11	MÊS 12
Aquisição de imagens ¹												
Análise de dados disponíveis												
Visitas de Campo												
Caracterização Geomorfológica												
Mapeamento Geomorfológico de Feições												
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

PROFISSIONAL	FORMAÇÃO	FUNÇÃO
Andreia Garcia	Ecóloga	Diretora do Projeto
Matheus Ramin	Engenheiro Ambiental e Urbano, MSc	Gerente do Projeto
Antônio Freitas	Engenheiro Químico, PhD	Revisor Sênior
Viviane Bhering	Engenheira Civil	Revisor Sênior (Hidrologa)
Dan Ciobotaru	Hidrologo / Geomorfólogo	Especialista em Geomorfologia
Pedro Almeida	Engenheiro Agrônomo, MSc	Elaboração dos Trabalhos de Campo e Relatório
Leticia Priolli	Engenheira Ambiental e Urbana em formação	Produtos Cartográficos
Rodrigo Utima	Pós-graduação em geoprocessamento	Geoprocessamento

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. 2016a.
- 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/2022a.
- 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.
- LACTEC. Área de Passagem e deposição da Lama de rejeitos no vale do rio Doce. 2020.
- PEKEL, J. F. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**. 2016. doi:10.1038/nature20584
- RHAMA. Análise Integrada sobre o Transporte de Sedimentos e Alterações Geomorfológicas a Jusante da UHE Risoleta Neves. Revisão nº 02. Setembro 2020.
- 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.



**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:

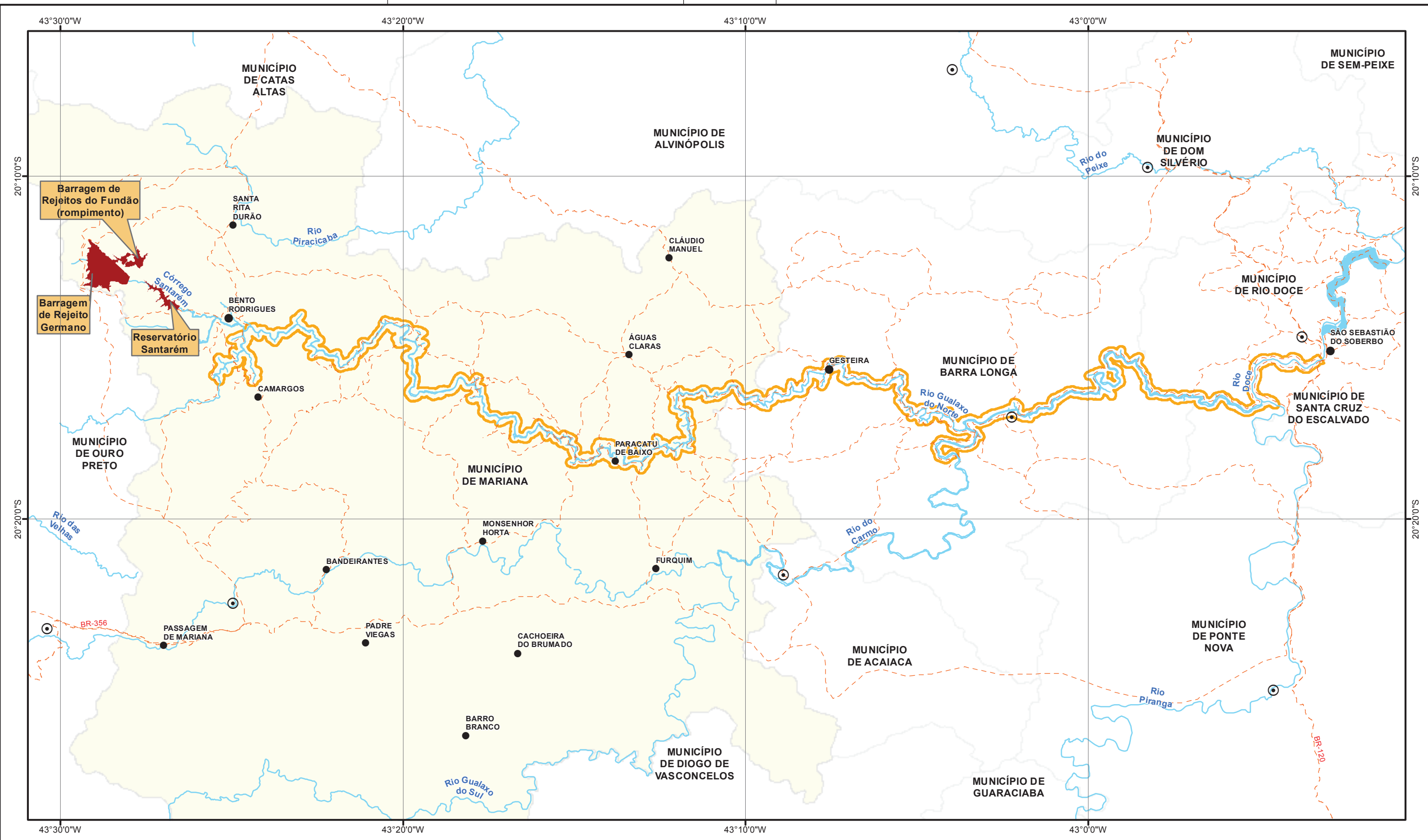
- **Área de Estudo Local (AEL)** – A AEL compreende os trechos de rios diretamente afetados pelo rompimento da barragem de rejeitos e consiste de duas partes: i) uma parte a montante inclui o Córrego Santarém, desde o dique S3 até a confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte e trechos 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



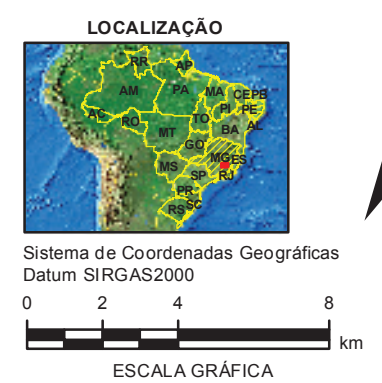
em i) tributários menores nas bacias que drenam para a AEL, e ii) cursos d'água de tamanho similar adjacentes à AEL e inseridos na bacia do Rio Doce. Exemplos de riachos e rios analisados neste estudo incluem os rios do Carmo (a montante da confluência com Rio Gualaxo do Norte), Rio Gualaxo do Sul, Rio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



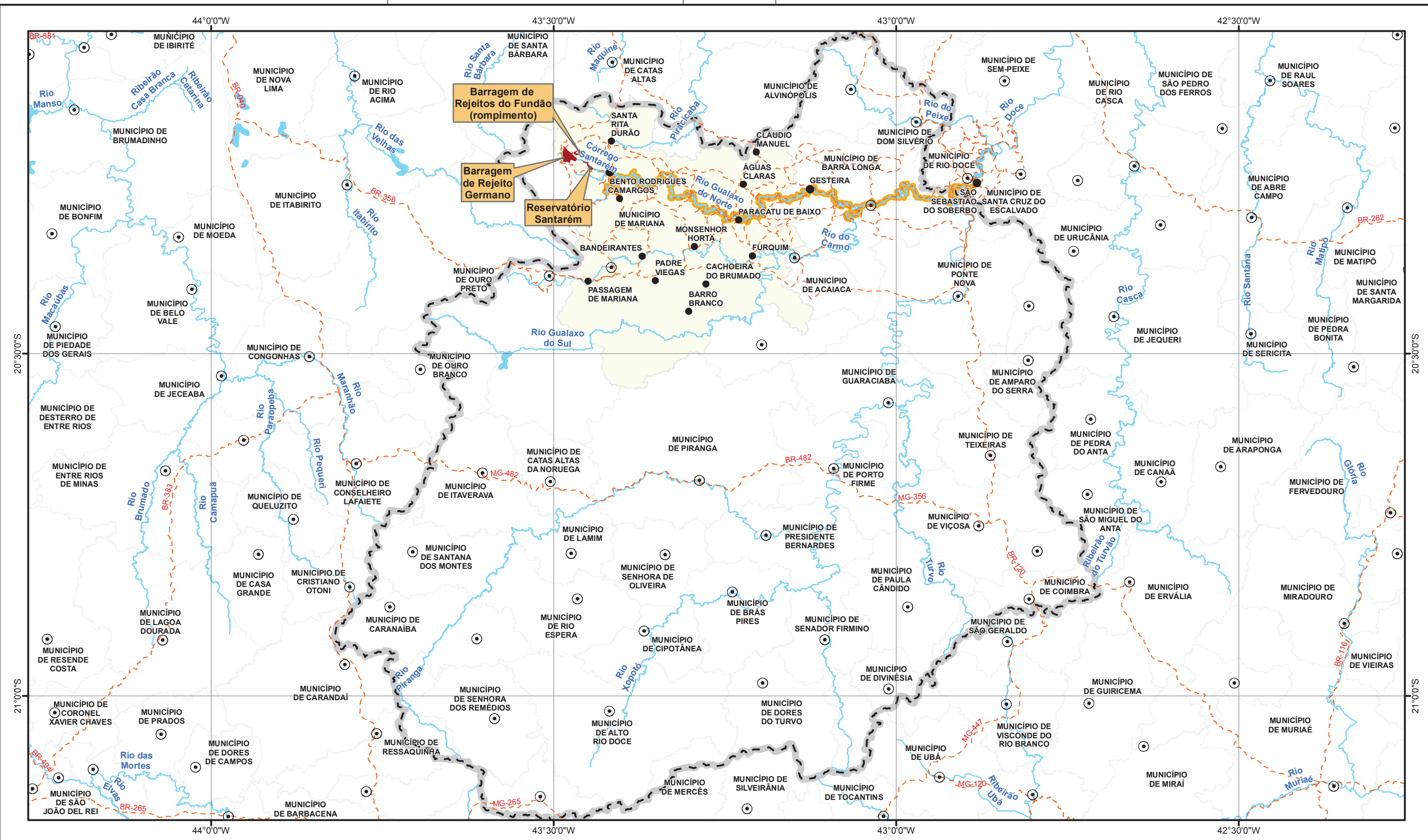
- LEGENDA**
- ⊙ Sede Municipal
 - Distritos
 - Curso D'Água
 - - - Estradas de Acesso
 - Corpo D'Água
 - ▭ Área de Estudo Local
 - Barragens de Rejeito
 - ▭ Município de Mariana
 - ▭ Limite Municipal



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™.

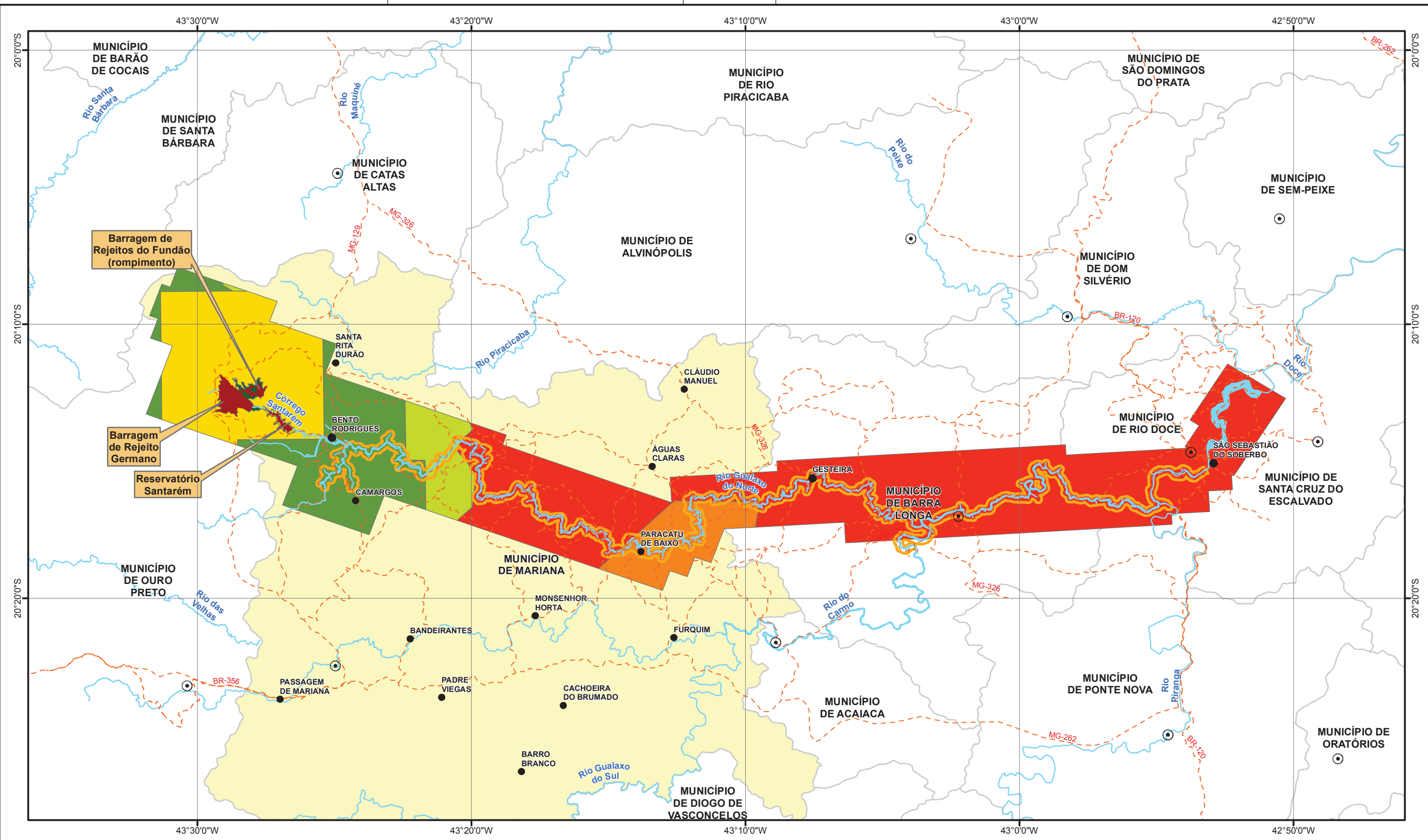
As principais características ao longo dos cursos d'água foram observadas em tela, em uma escala de detalhamento visual que variou de 1:3.000 a 1:10.000. As principais características observadas e mapeadas ao longo dos cursos d'água foram:

- 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**.

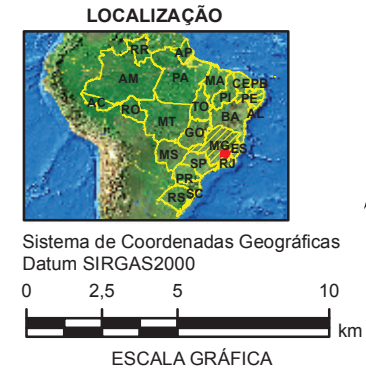
Tabela 3.4.1: Fontes de imagens de satélite anteriores ao rompimento.

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	



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 localização 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

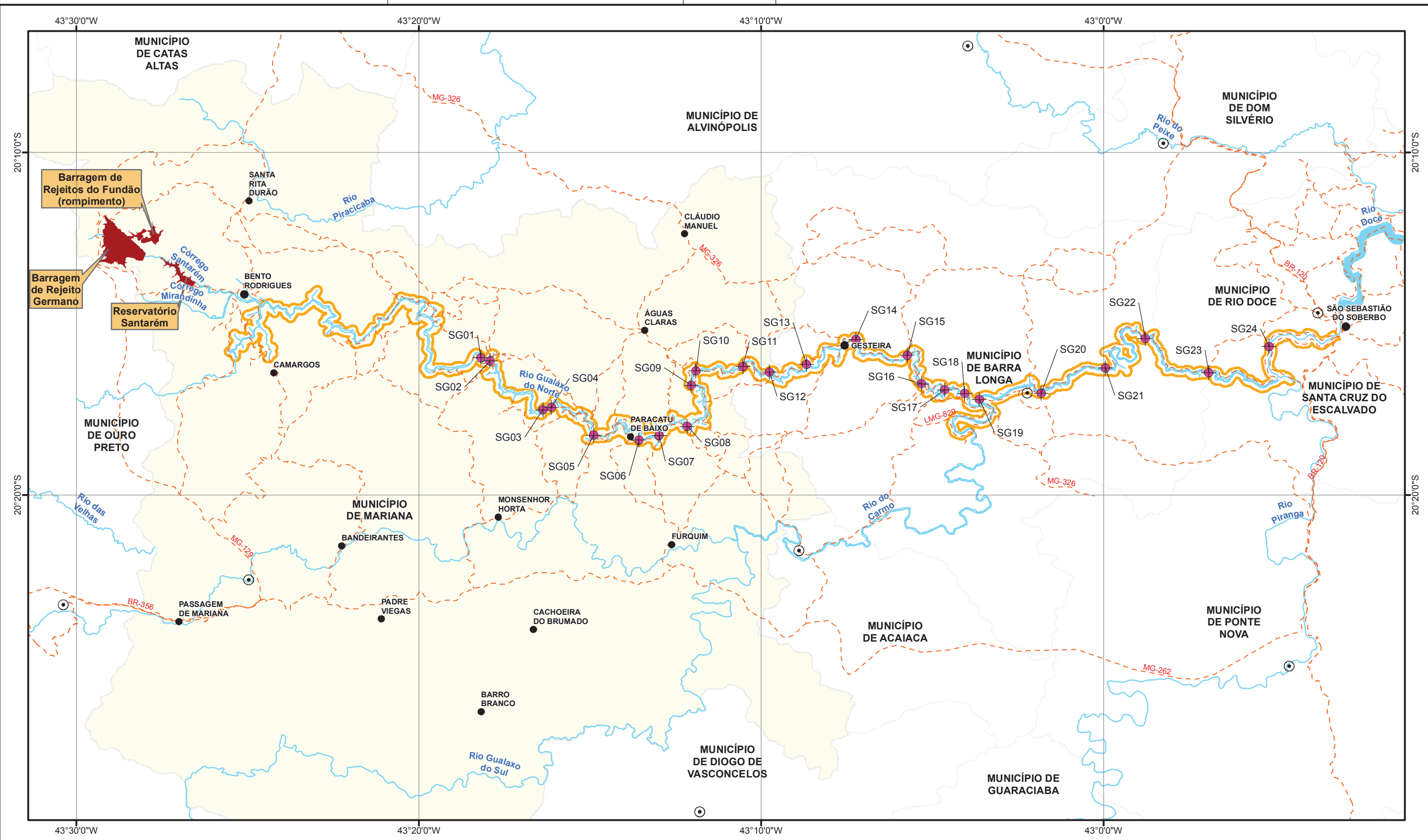


AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

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 acompanhar 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

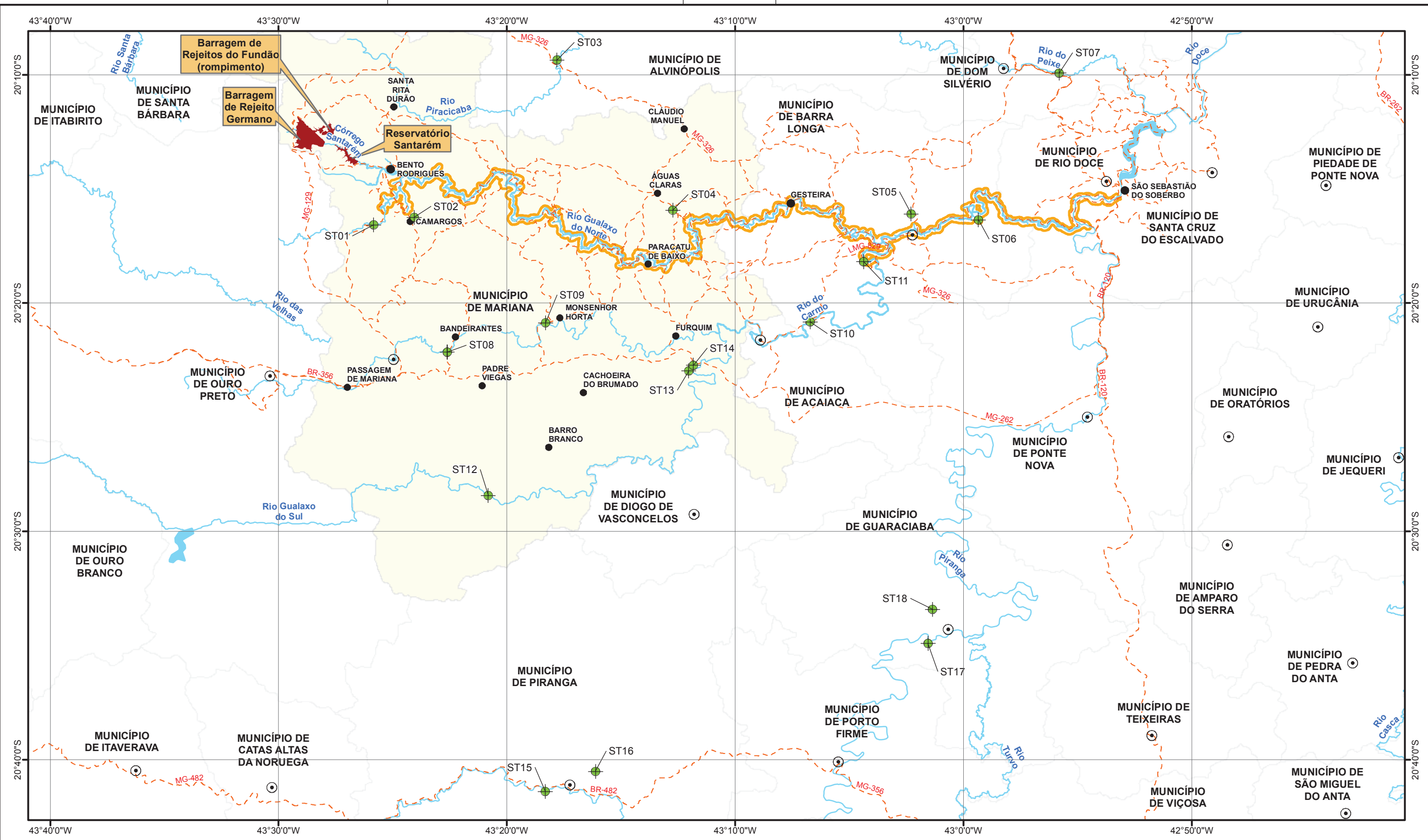
Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000

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
- Sede Municipal
- Distritos
- Curso D'Água
- Estradas de Acesso
- 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 REGIONAL**

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



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



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>

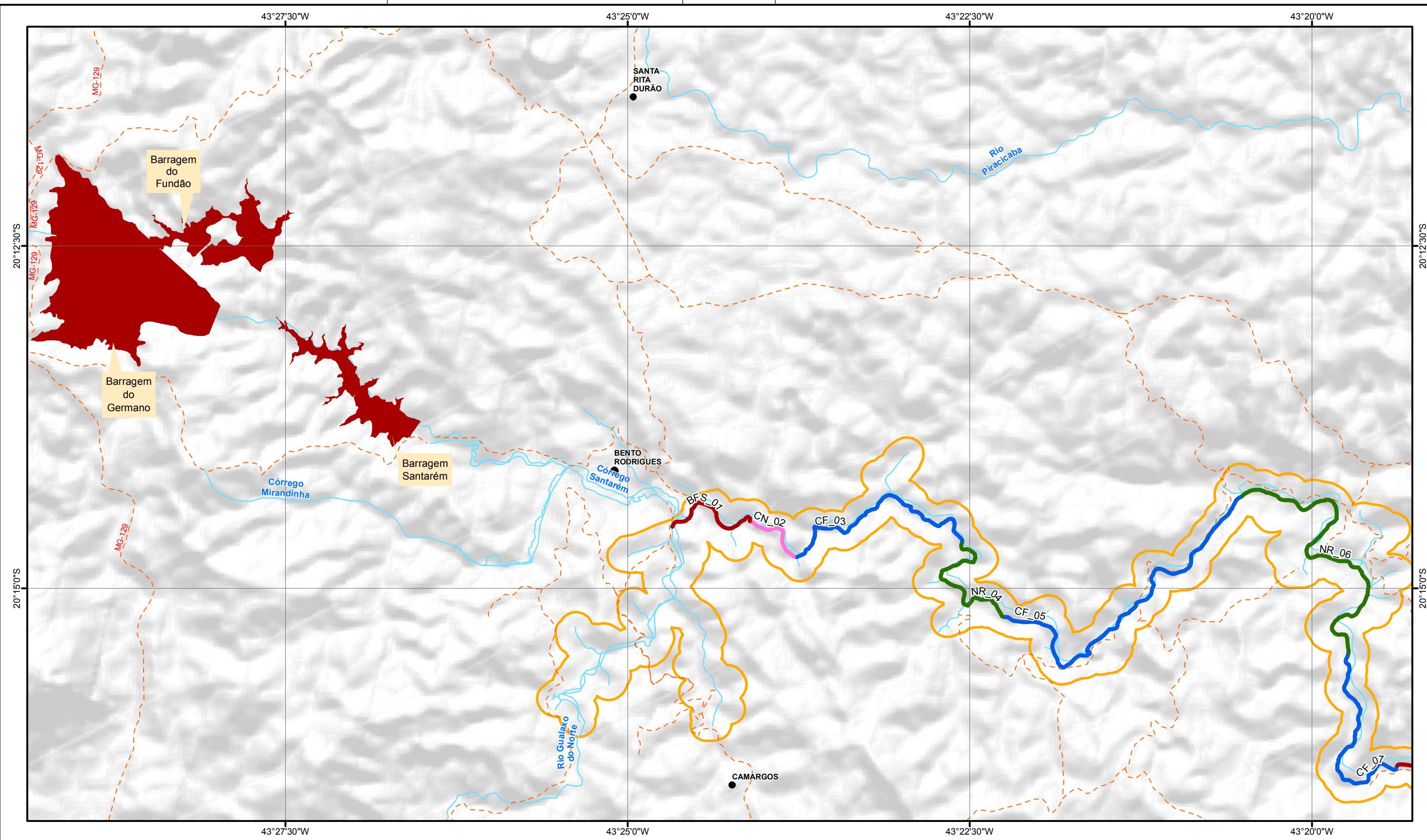


Tipo de Trecho	Descrição dos Critérios
	Ilhas e canais laterais podem se desenvolver.
	As margens de rio são compostas principalmente de material fino (aluvial). As margens são vegetadas e relativamente estáveis. A curva externa do meandro pode ter erosão ativa.
	Os gradientes de canais típicos são menores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

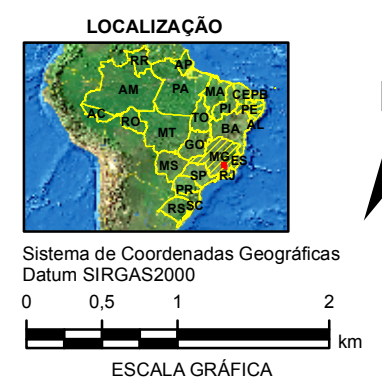
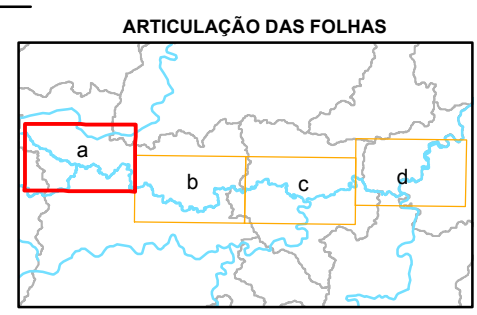
Observou-se que a distribuição dos trechos-tipos ao longo do rio principal geralmente segue um padrão alternado entre trechos com planícies de inundação geralmente mais largas (p.ex., BFS, BFL), trechos com planícies de inundação geralmente mais estreitas e trechos sem planície de inundação (p.ex., CN, 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.

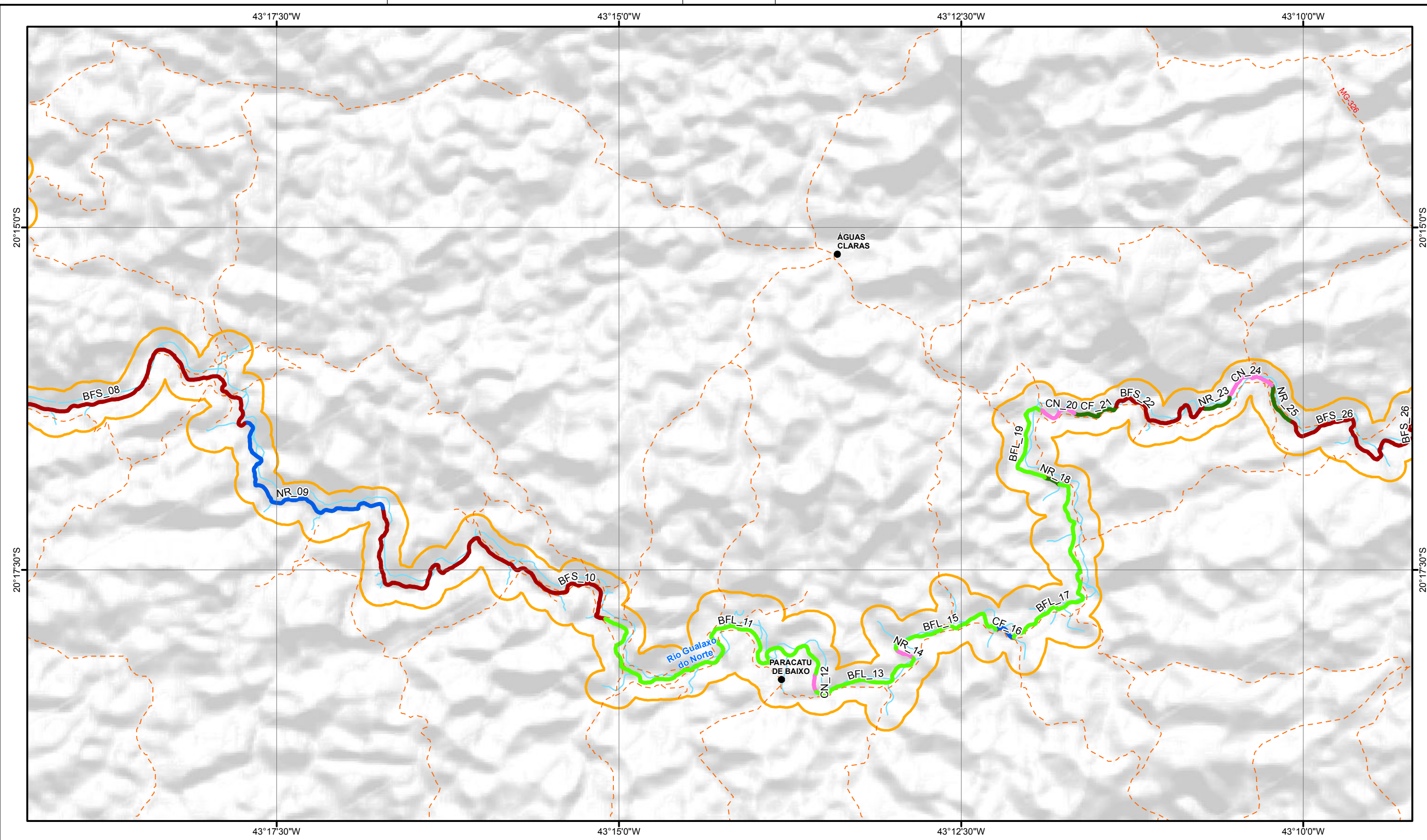
Os trechos de rio identificados pela análise documental são apresentados na **(Tabela 3.5.3)**. A distribuição espacial dos trechos é mostrada na **(Figura 3.5.1)**.



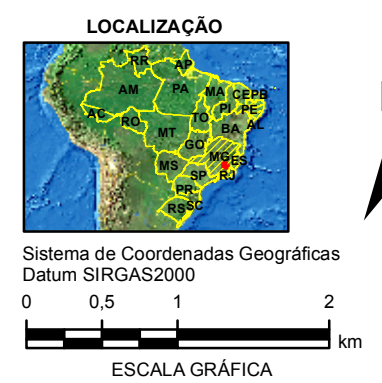
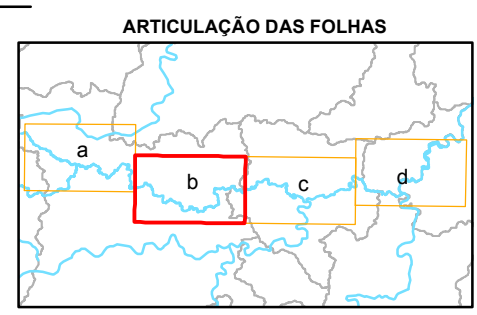
- LEGENDA**
- Estradas de Acesso
 - Trechos de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local



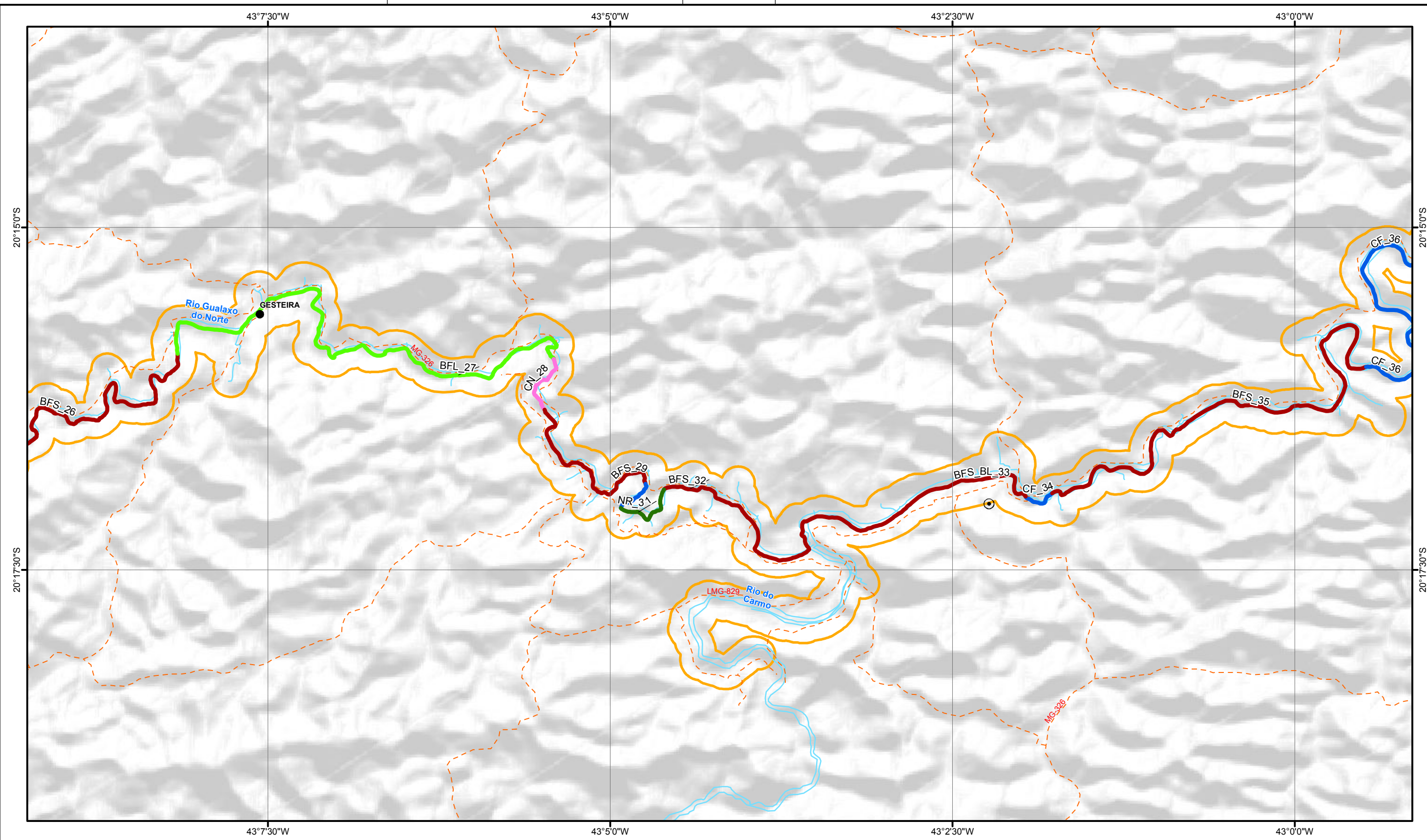
PROJETO:	ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA		
TÍTULO:	TRECHOS DE RIO NA ÁREA DE ESTUDO		
	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA: 1:50.000
	GIS:	NTEFE	outubro/2016
	REV:	DC	00
Figure 3.4.1 a			



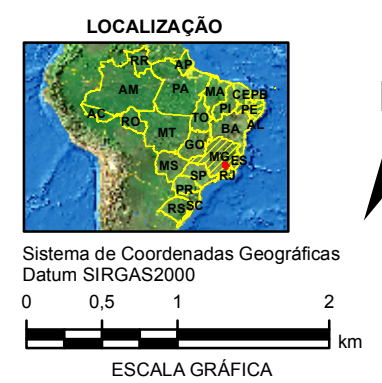
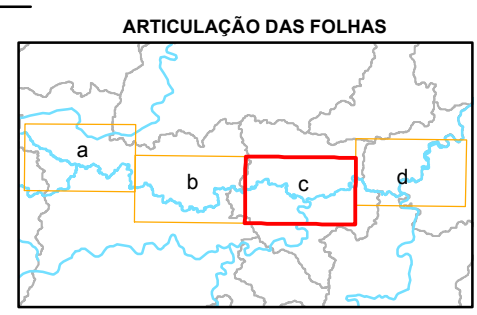
- LEGENDA**
- Estradas de Acesso
 - Trechos de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local



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 3.4.1 b			

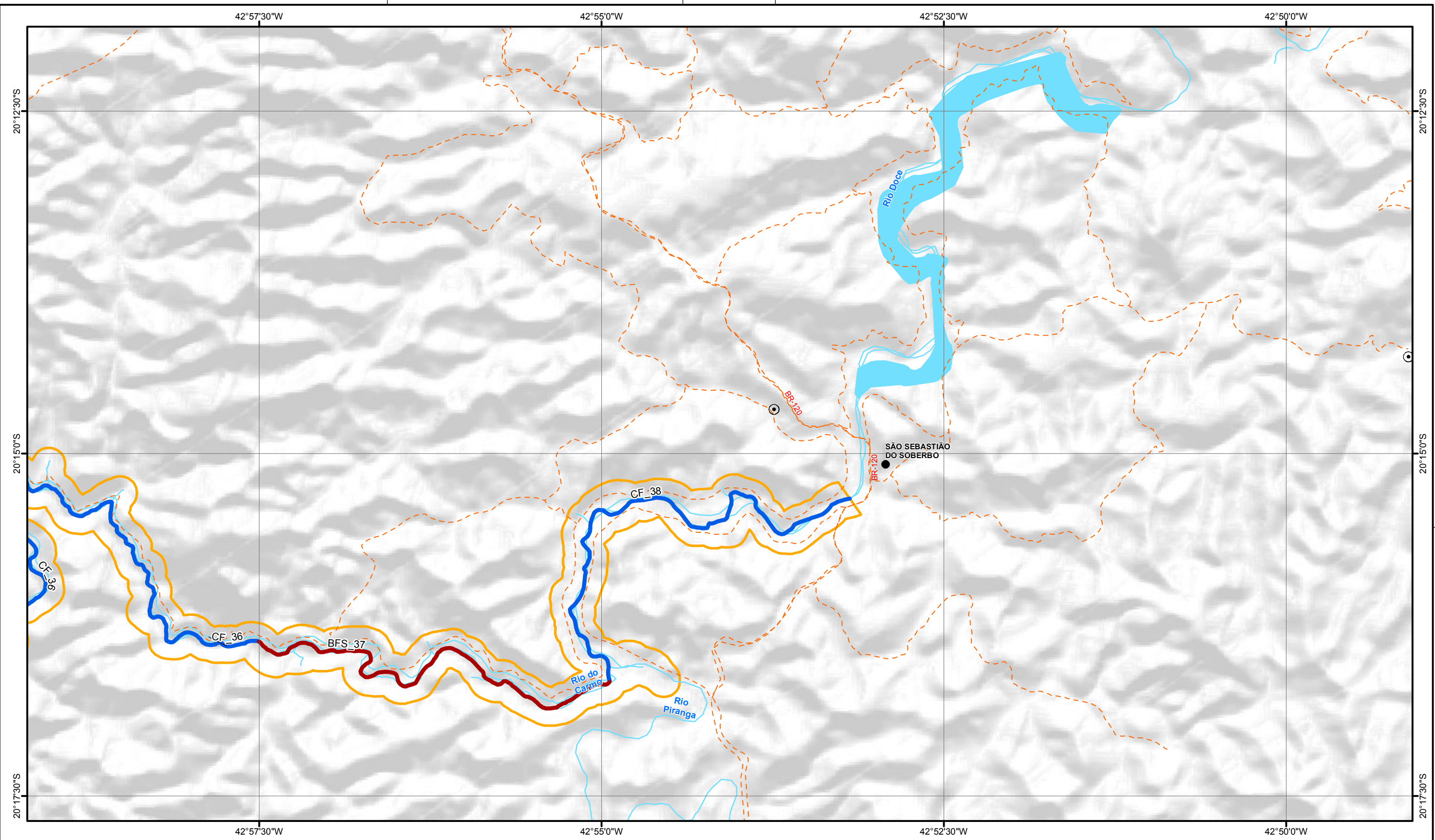


- LEGENDA**
- Estradas de Acesso
 - Trechos de Rio
 - Curso D'Água
 - Corpo D'Água
 - Barragens de Rejeito
 - Área de Estudo Local



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	Figure 3.5.1 c
REV:	DC	00	

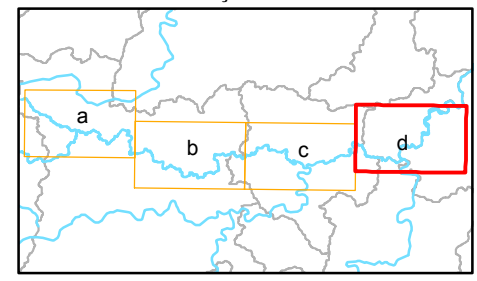




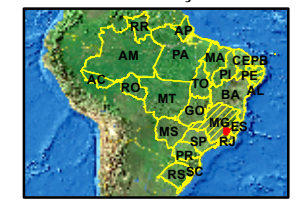
LEGENDA

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

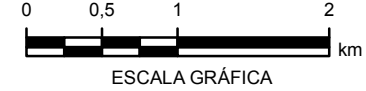
ARTICULAÇÃO DAS FOLHAS



LOCALIZAÇÃO



Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000



ESCALA GRÁFICA



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

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



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

Figure 3.4.1 d



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.

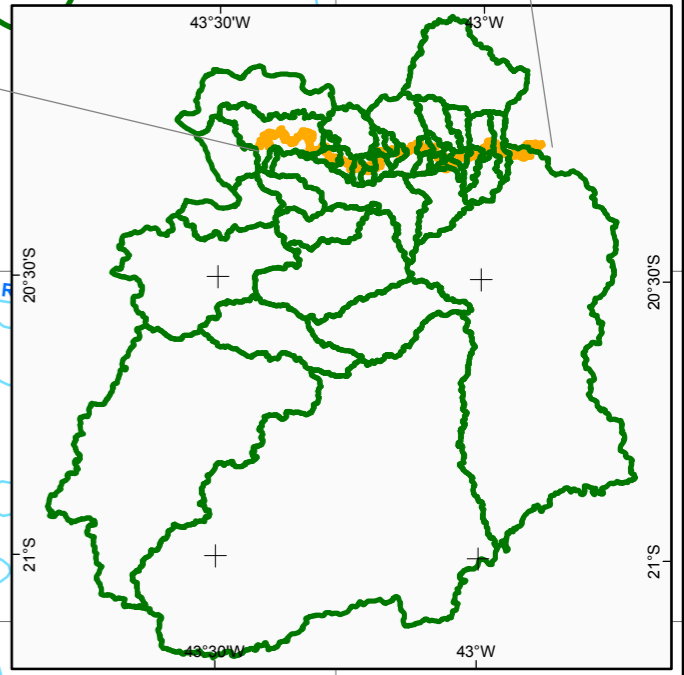
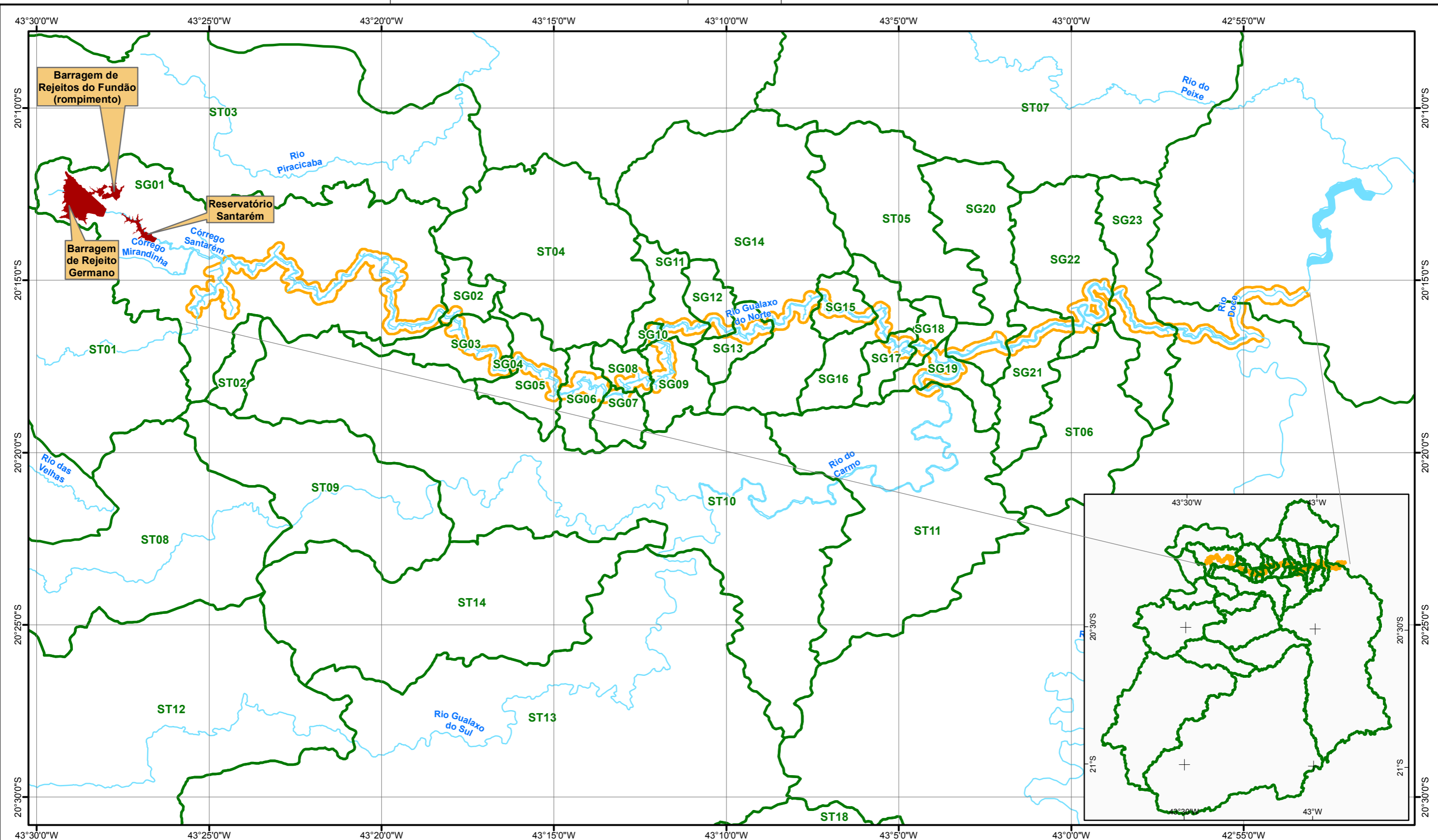
A variação na largura do canal parece ser mais fortemente controlada pela variação no formato do vale circundante e pela extensão pela qual as litologias subjacentes controlam a formação do canal do rio. O sobrevoo de helicóptero, realizada em agosto de 2016, identificou fortes controles geológicos do 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



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.

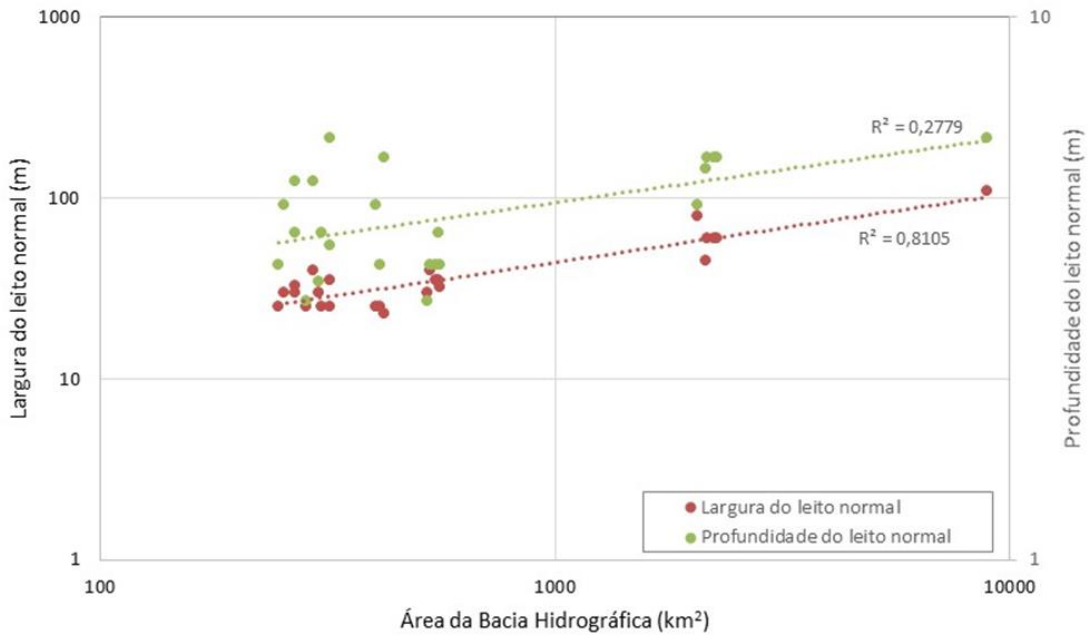


Figura 3.5.3: Variação de largura do leito menor fluvial e profundidade da seção fluvial para pontos dentro da AEL.

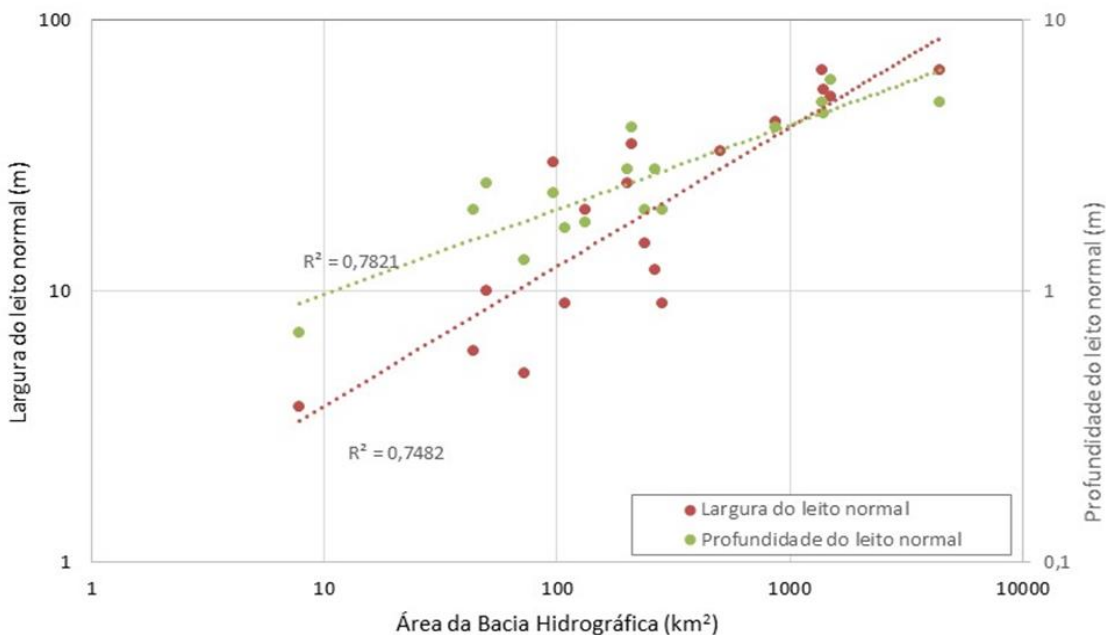


Figura 3.5.4: Variação de largura do leito menor fluvial e profundidade da seção fluvial para pontos dentro da AEL, porém dentro da AER.



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.

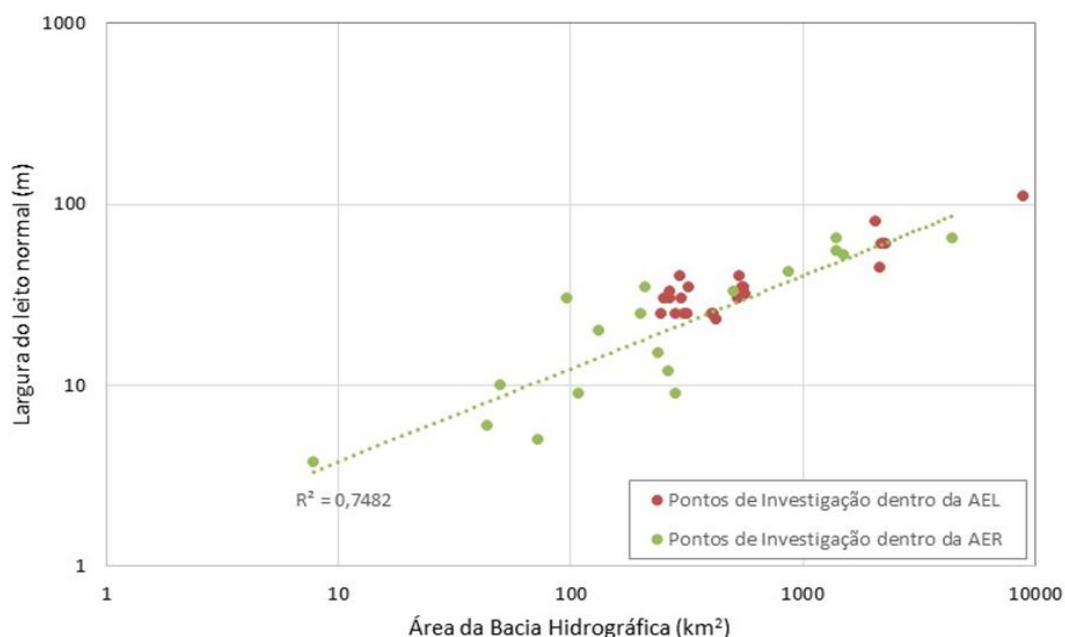


Figura 3.5.5: Análise regional de largura do leito menor rio para todos os pontos investigados (pontos na AEL em vermelho, pontos na AER em verde).



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.

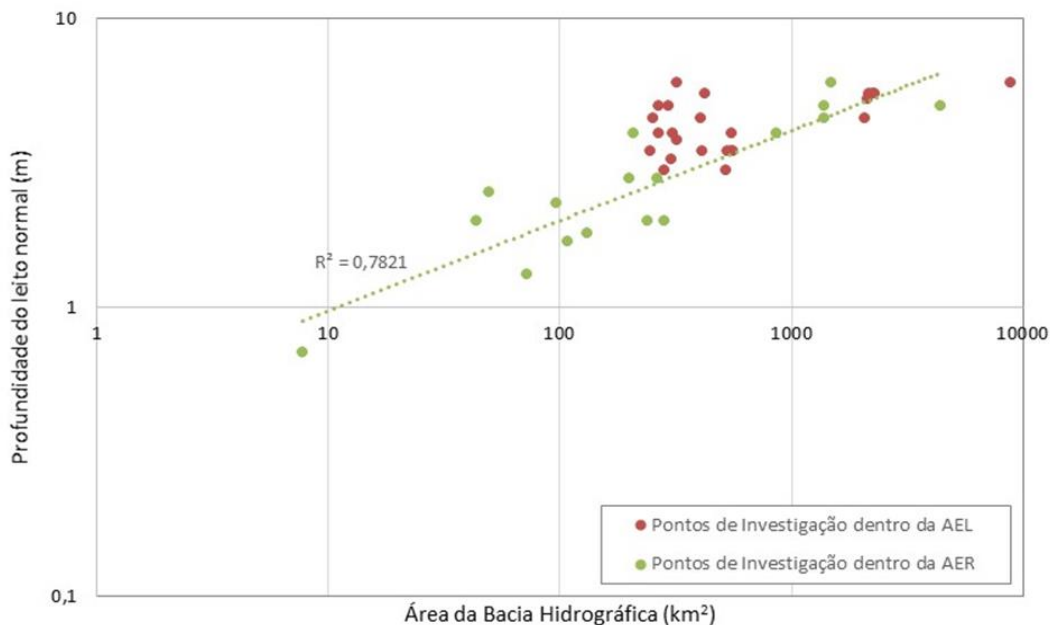


Figura 3.5.10: Análise regional de profundidade do leito menor do rio para todos os pontos pesquisados (pontos na AEL em vermelho, pontos na AER em verde).



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**).

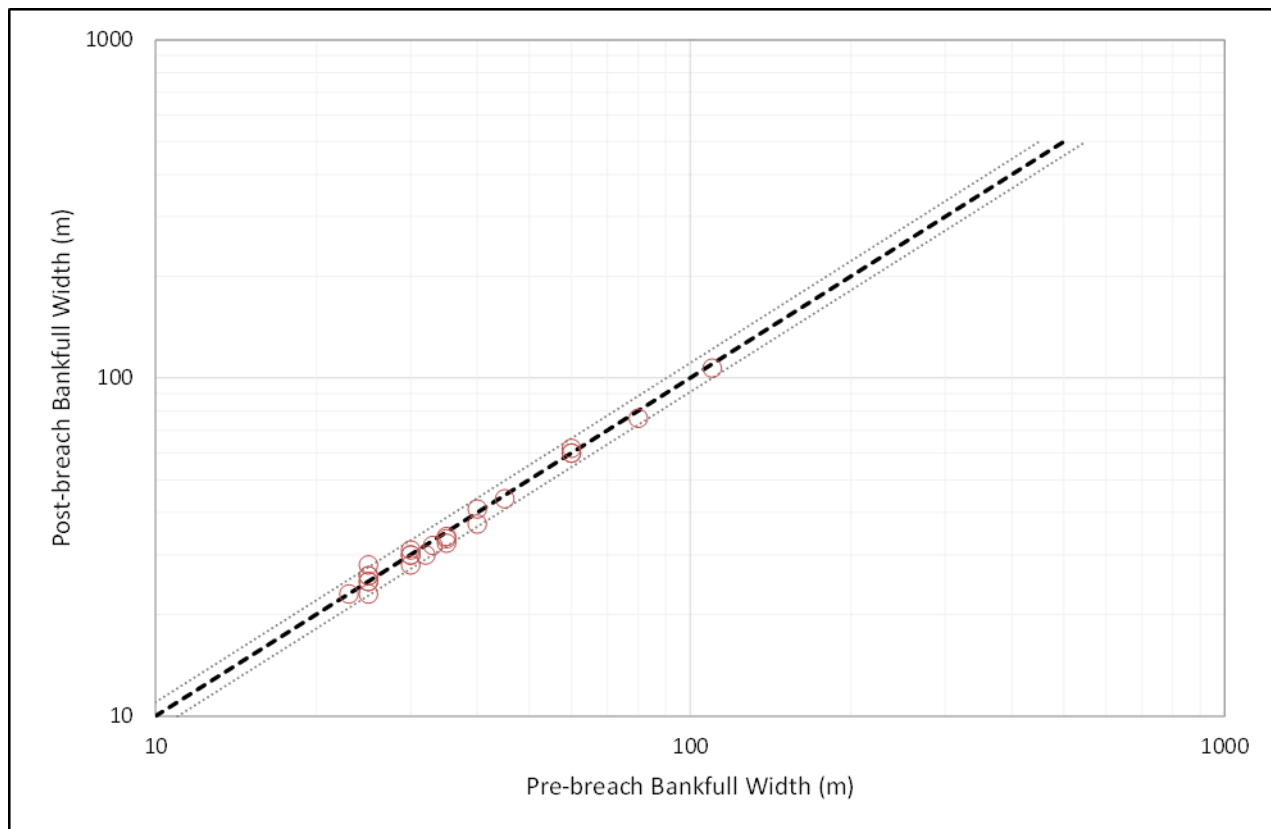


Figura 3.5.11: Comparação de larguras do leito menor pré e pós-rompimento; a linha representa uma comparação 1 a 1, com limites de $\pm 10\%$.

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**).

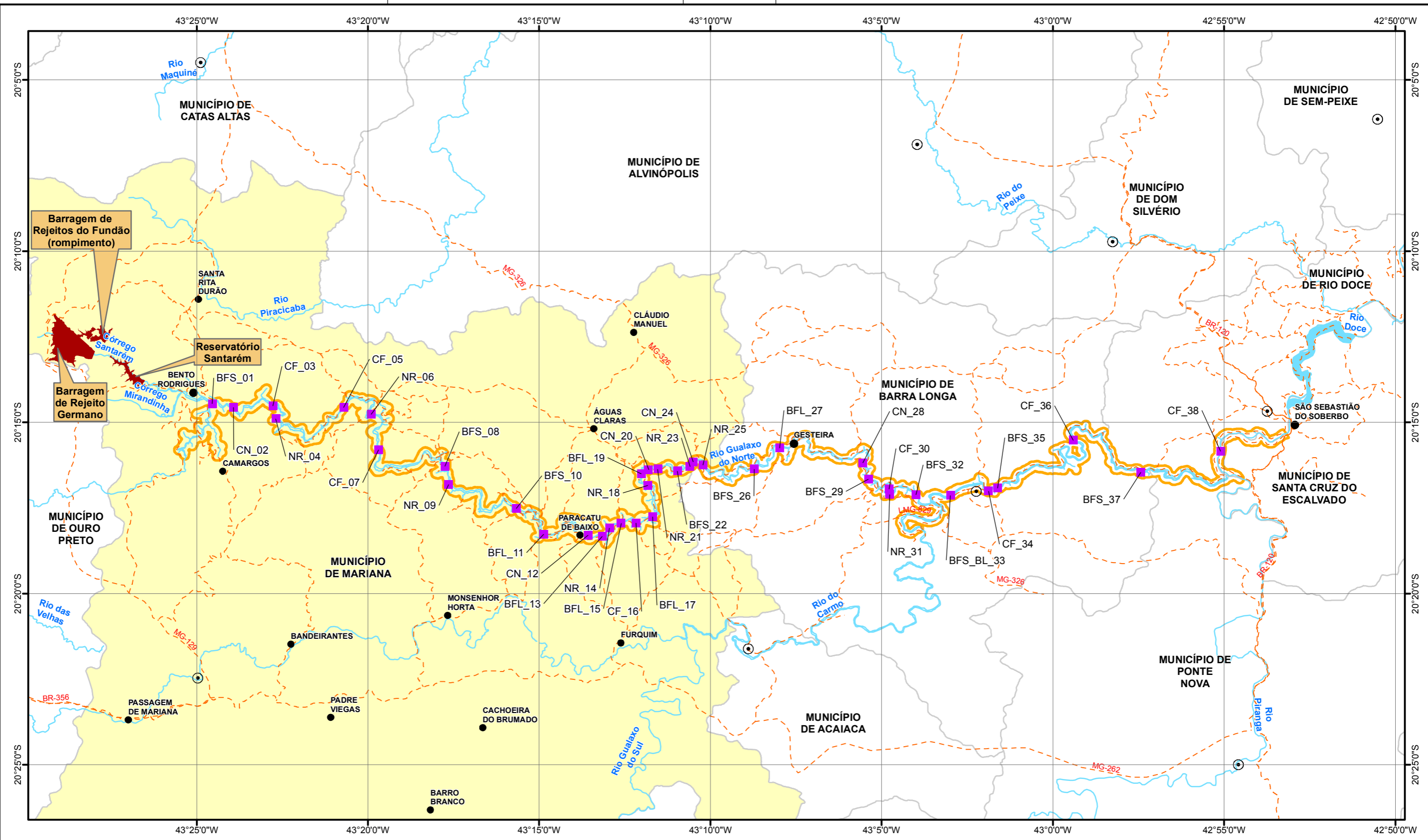
Tabela 3.5.6: Largura do Leito menor Pré-Rompimento de Trechos Fluviais Geomorfológicos.

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
REV	DC	00

Figura 3.5.12





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.

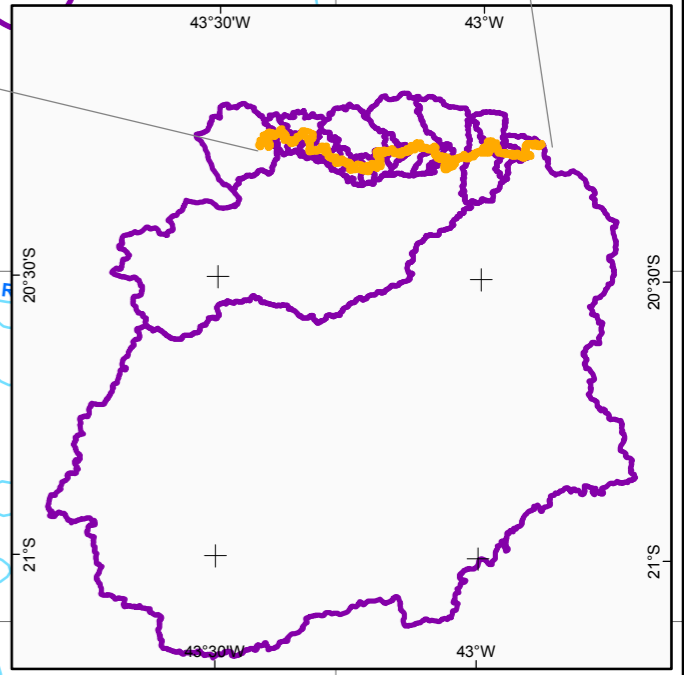
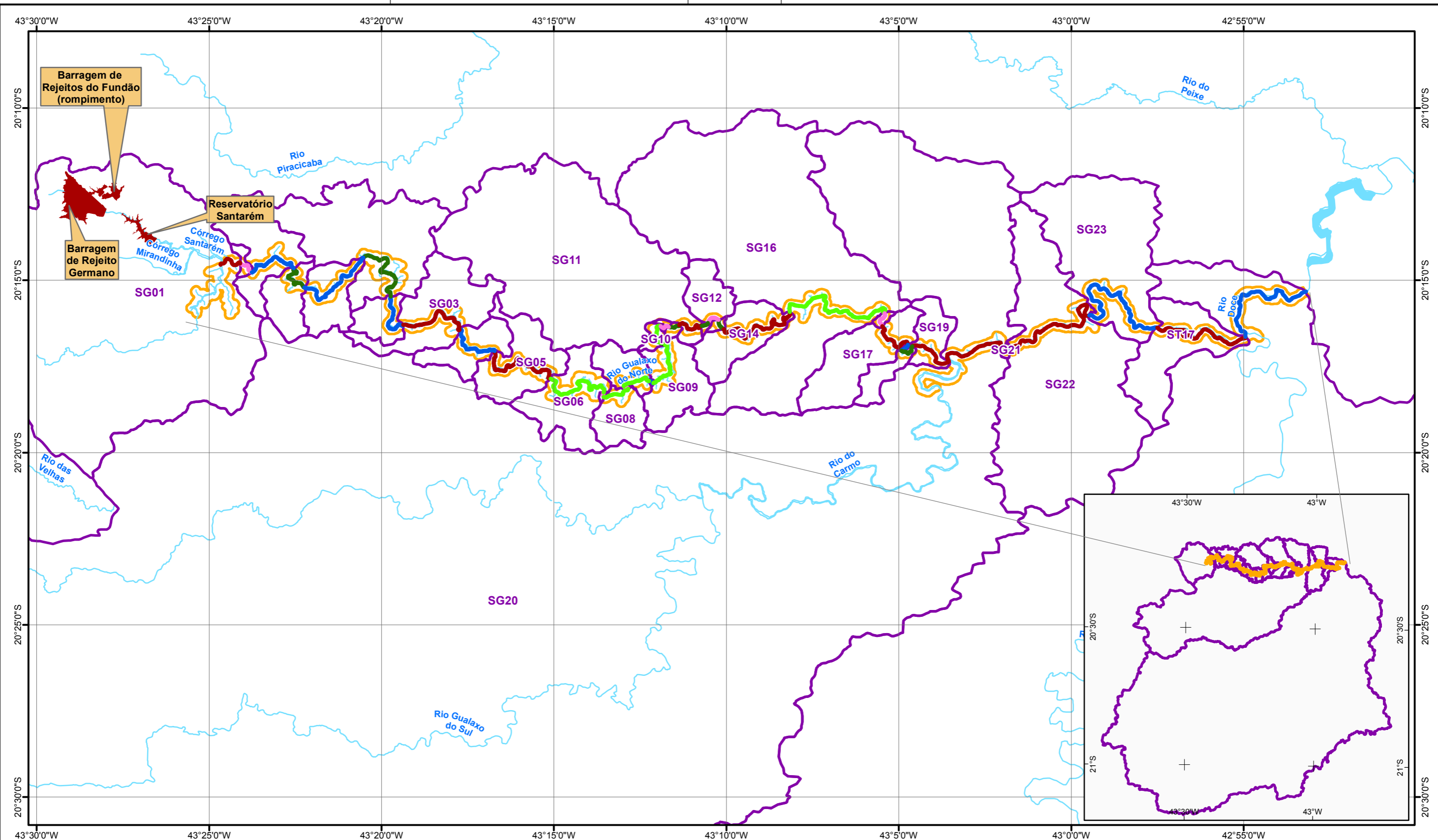


AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

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

0 2 4 8 km

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.

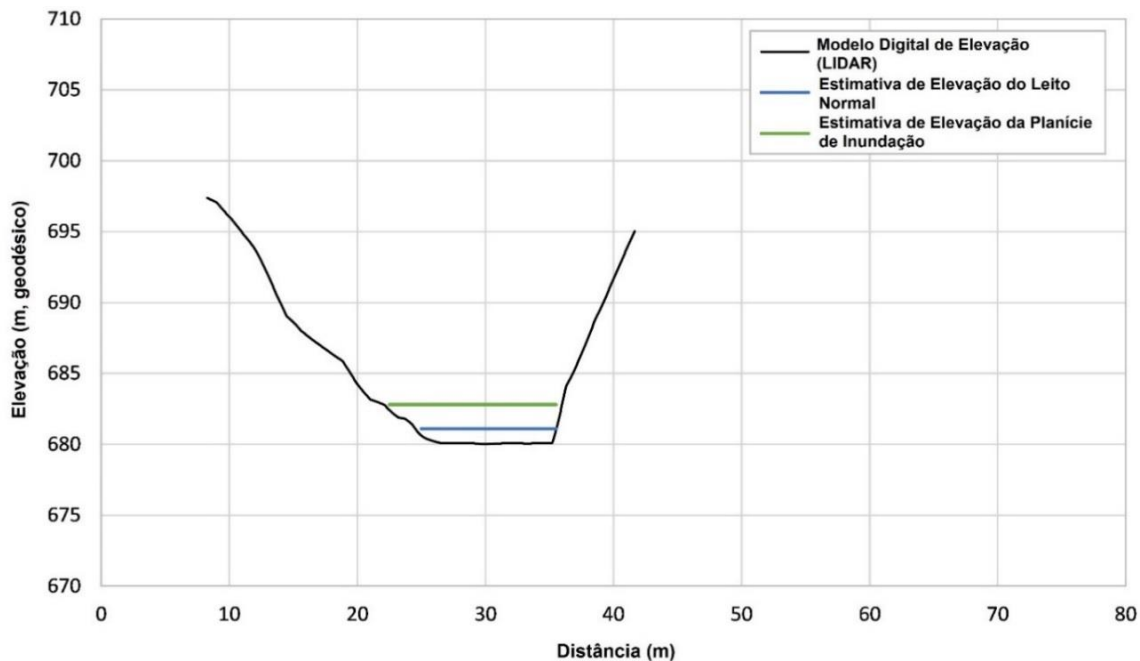


Figura 3.5.14: Trecho Fluvial do Tipo Cânion – Seção Transversal de Canal Típica (Típica seção transversal do canal na estação de rio 1,72km).



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

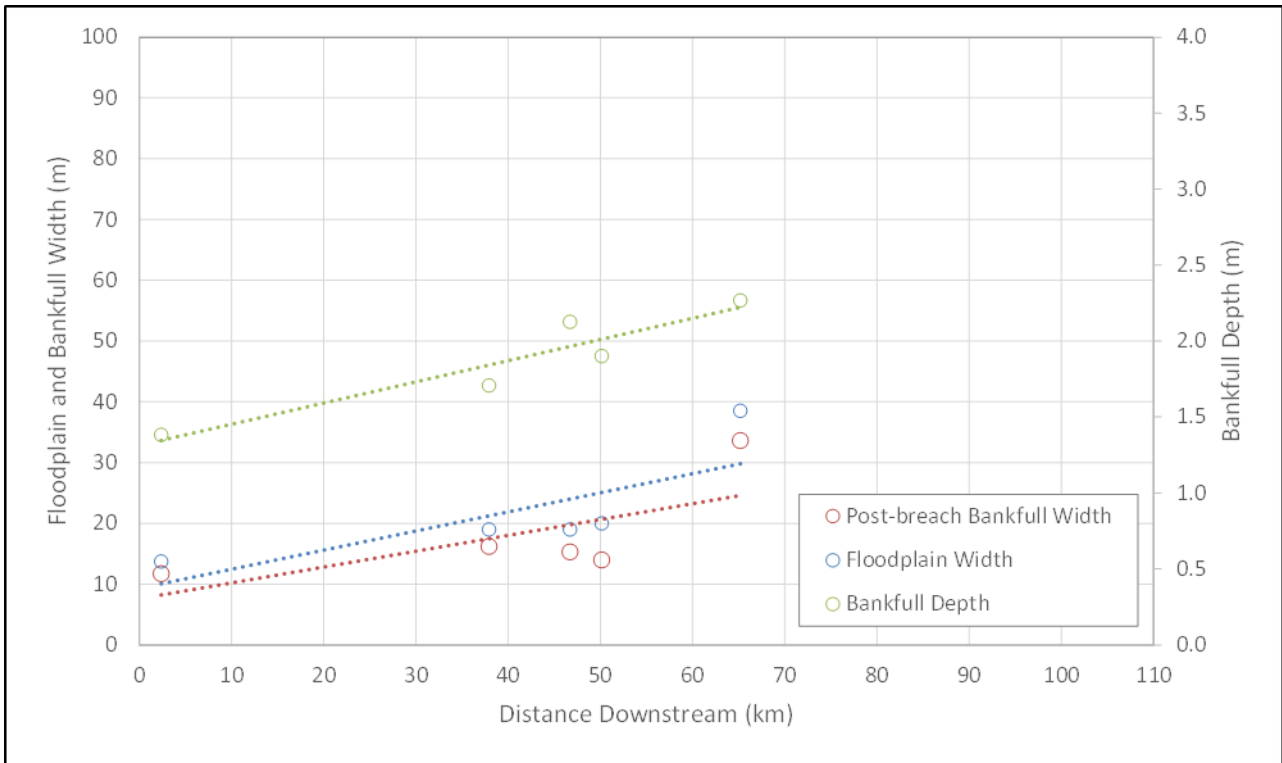


Figura 3.5.15: Trecho Fluvial do Tipo Cânion – Variação da geometria do canal em função da distância a jusante.

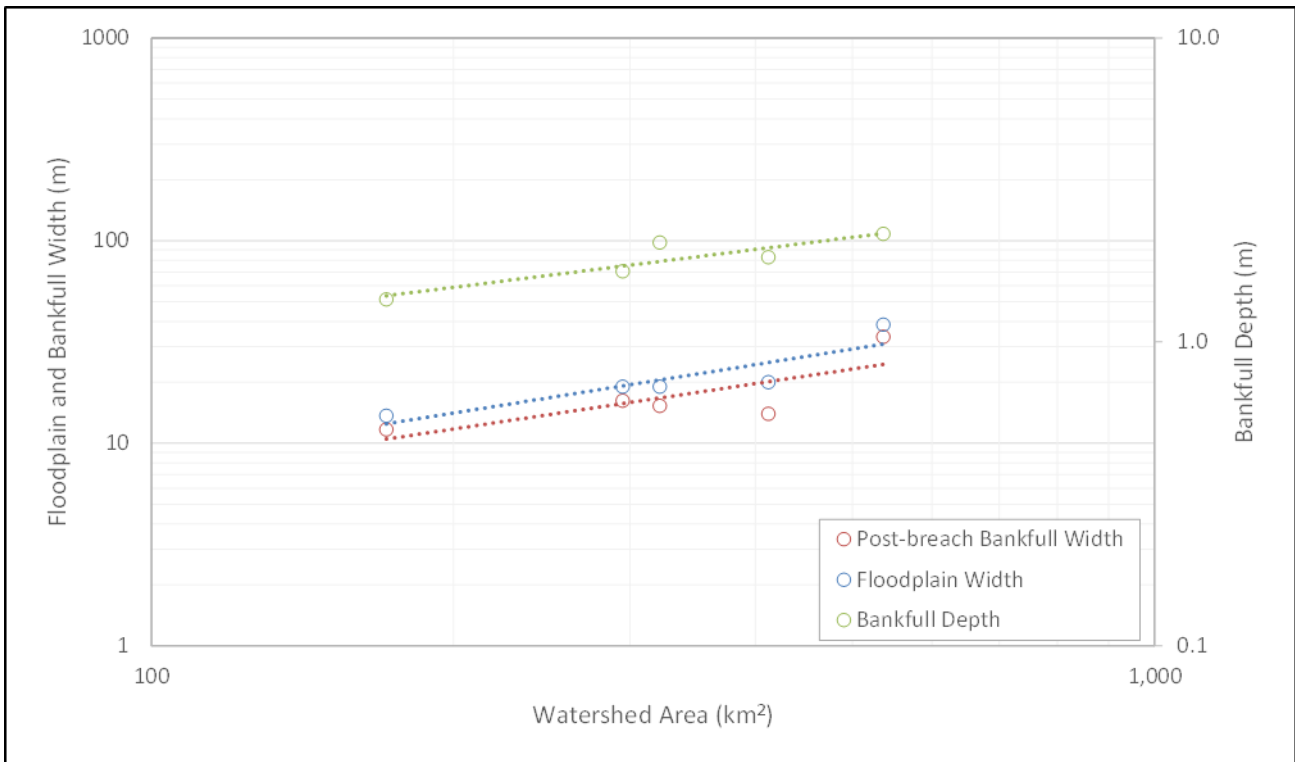


Figura 3.5.16: Trecho Fluvial do Tipo Cânion – Variação da geometria do canal em função da área da bacia de drenagem.



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.

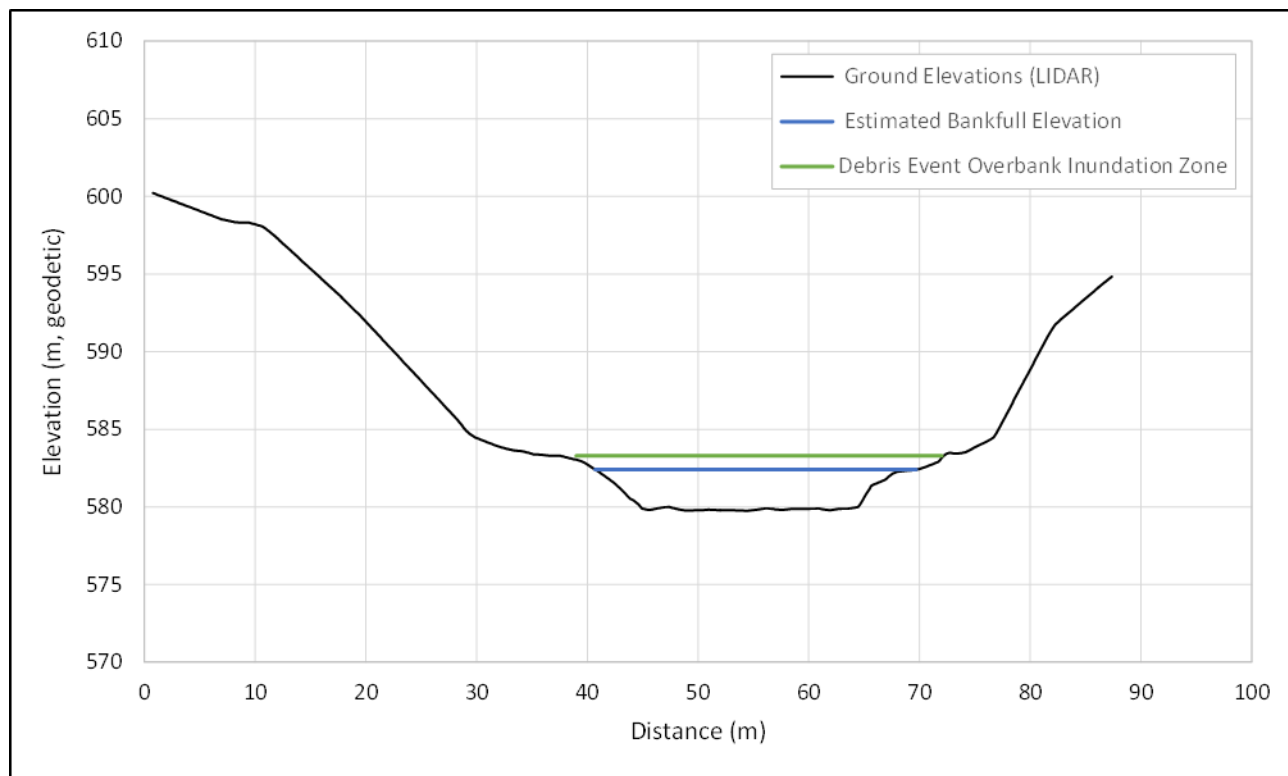


Figura 3.5.17: Trecho de Rio Confinado – Seção transversal de canal típica (Típica seção transversal do canal na estação de rio 11,8 km).



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

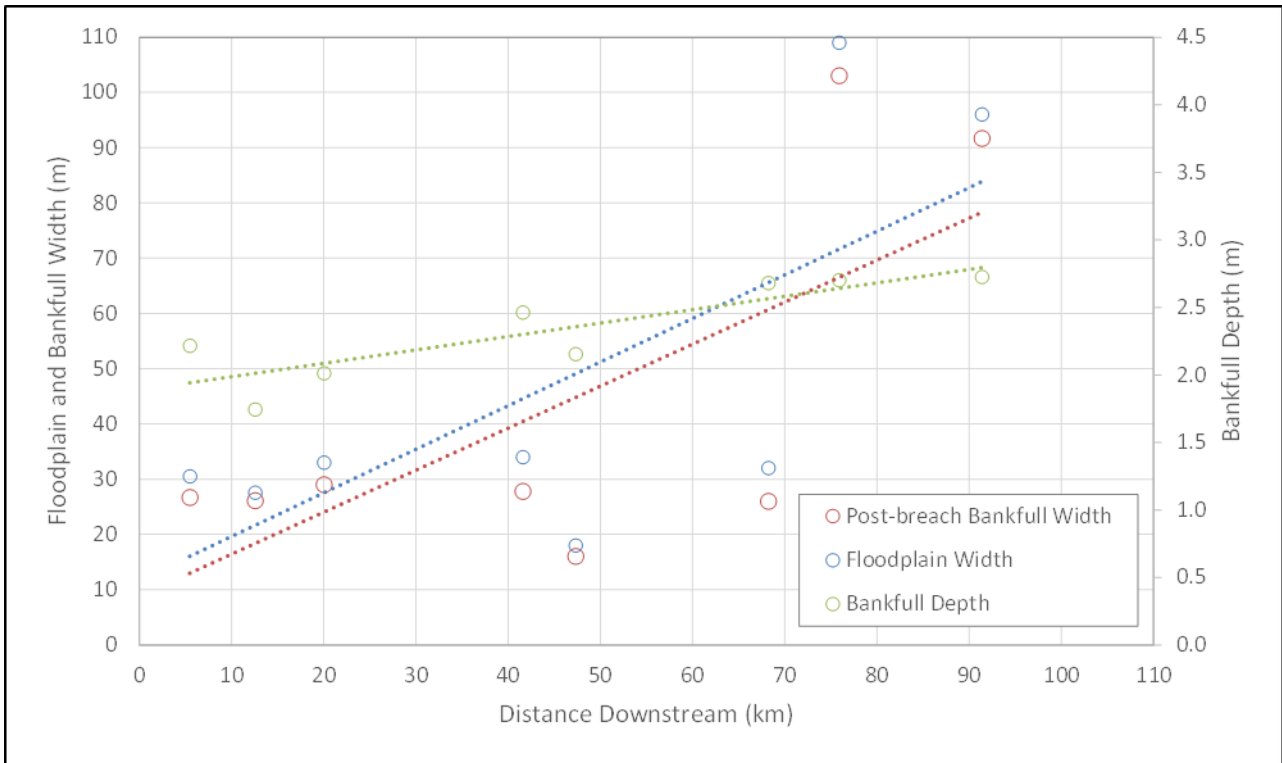


Figura 3.5.18: Trecho de Rio Confinado – Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

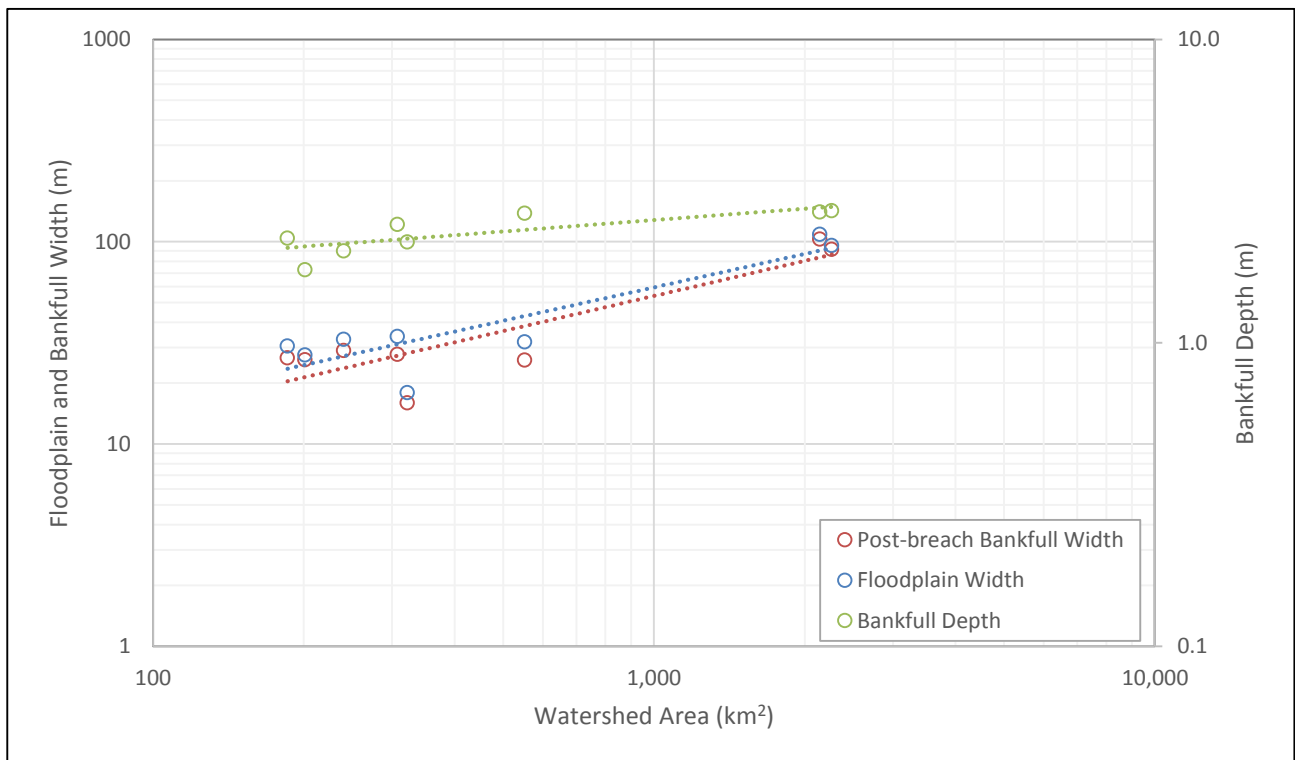


Figura 3.5.19: Trecho de Rio Confinado – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



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.

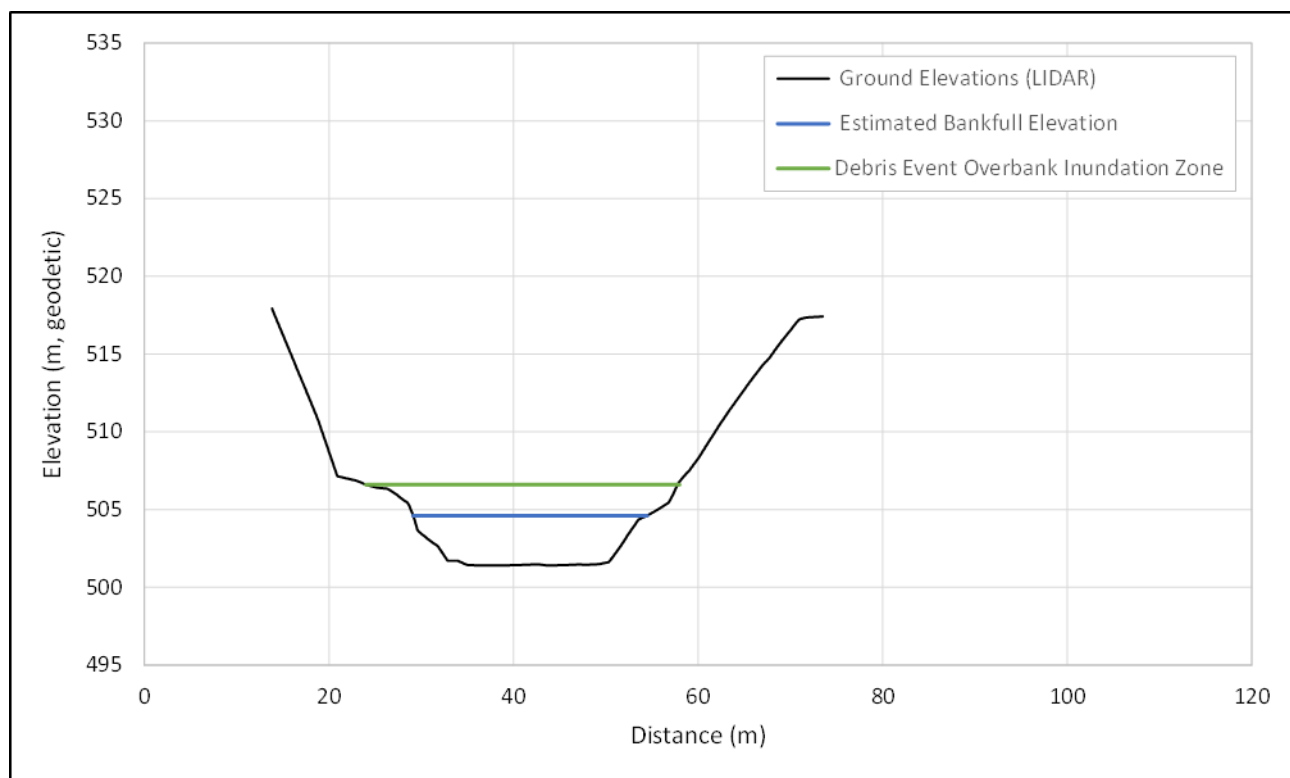


Figura 3.5.20: Trecho de rio estreito – Seção transversal de canal típica (Típica seção transversal do canal na estação de rio 44,41km).



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

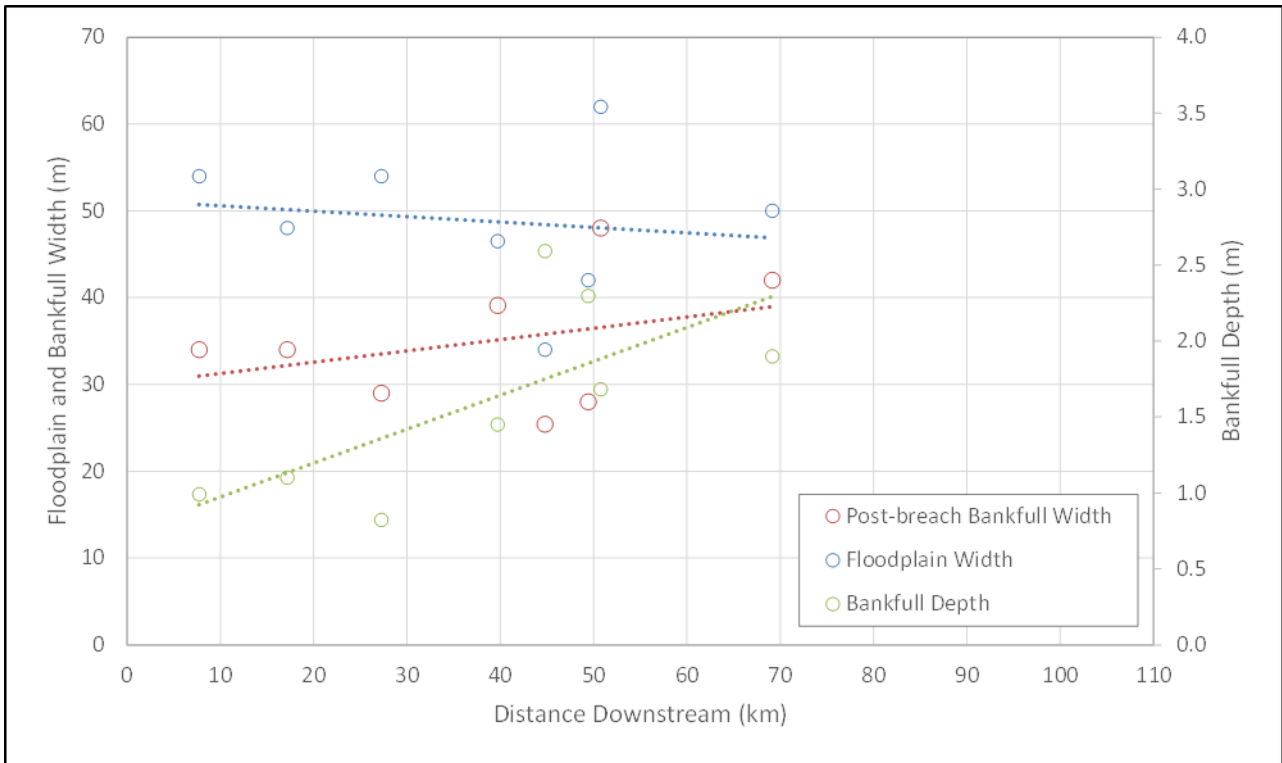


Figura 3.5.21: Trecho de Rio Estreito - Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

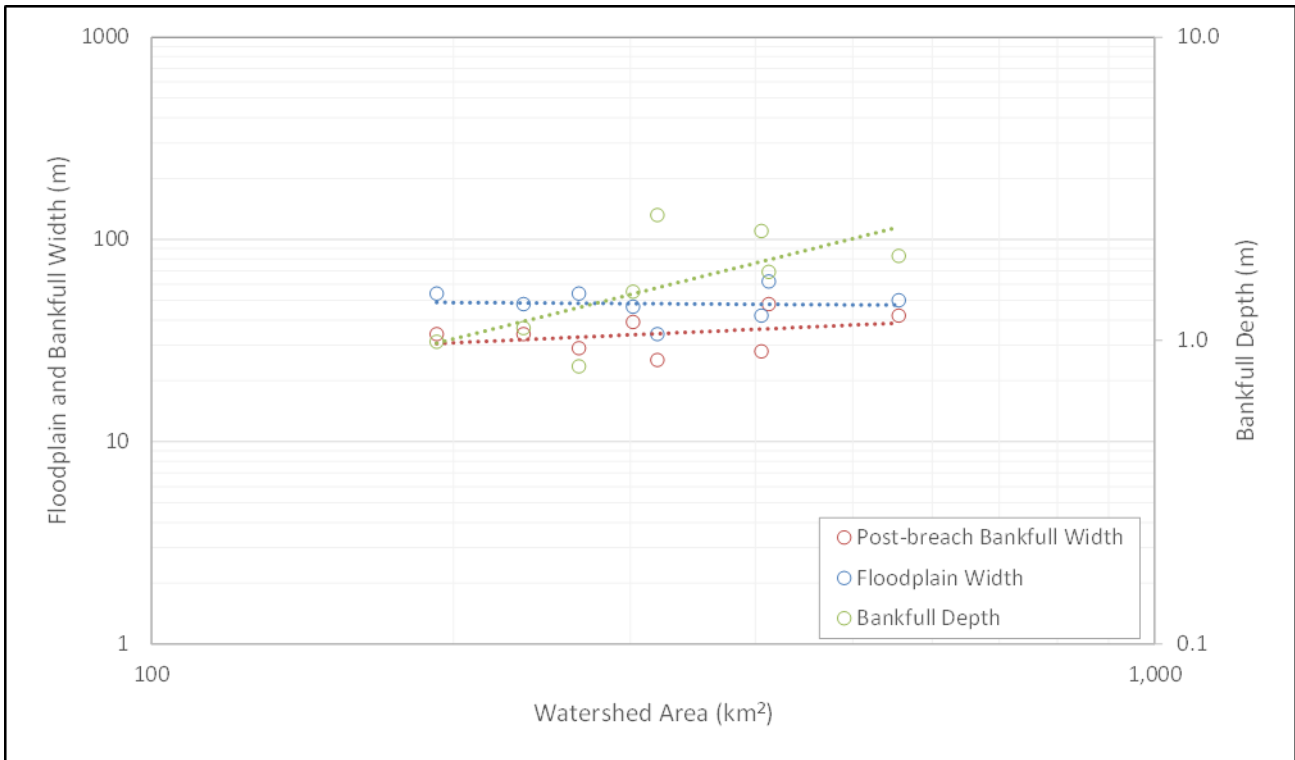


Figura 3.5.22: Trecho de rio estreito – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



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.

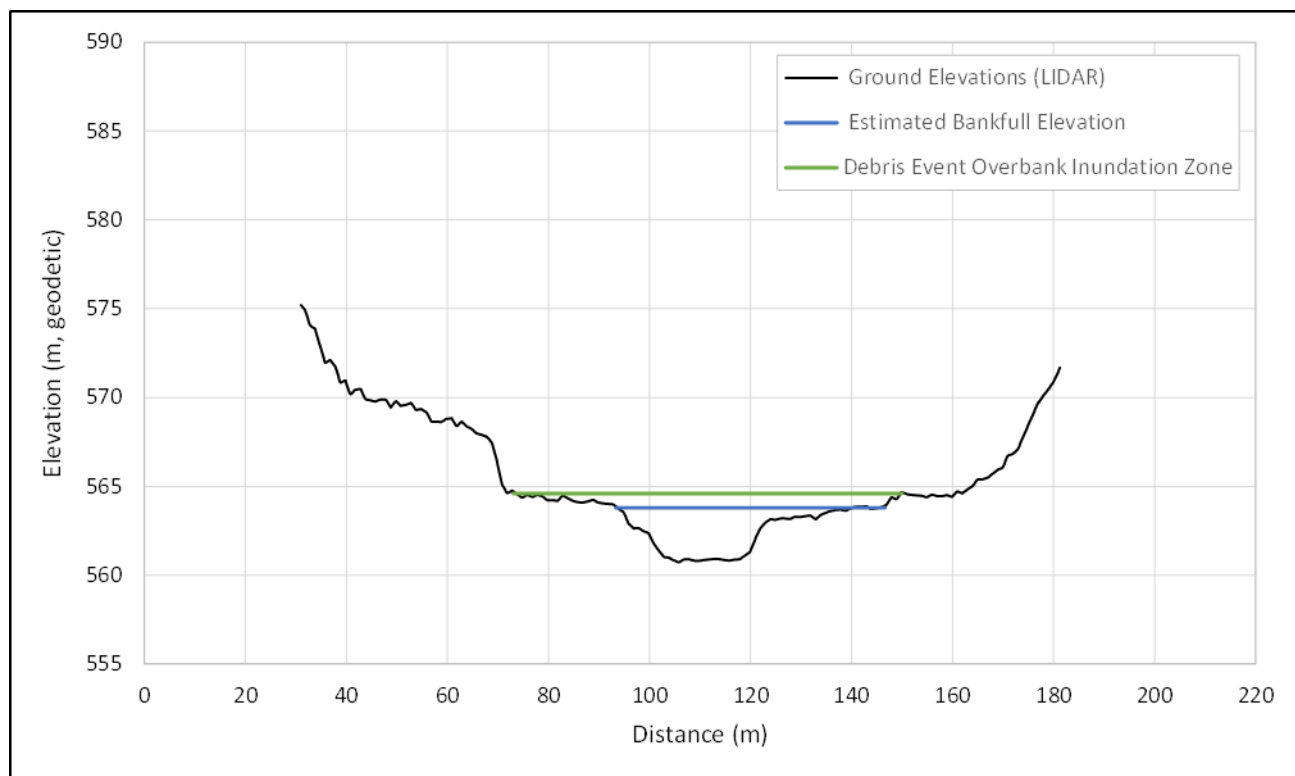


Figura 3.5.23: Trecho de Rio Largo com planície de inundação pequena – Seção transversal de canal típica na estação de rio 23,63 km.



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

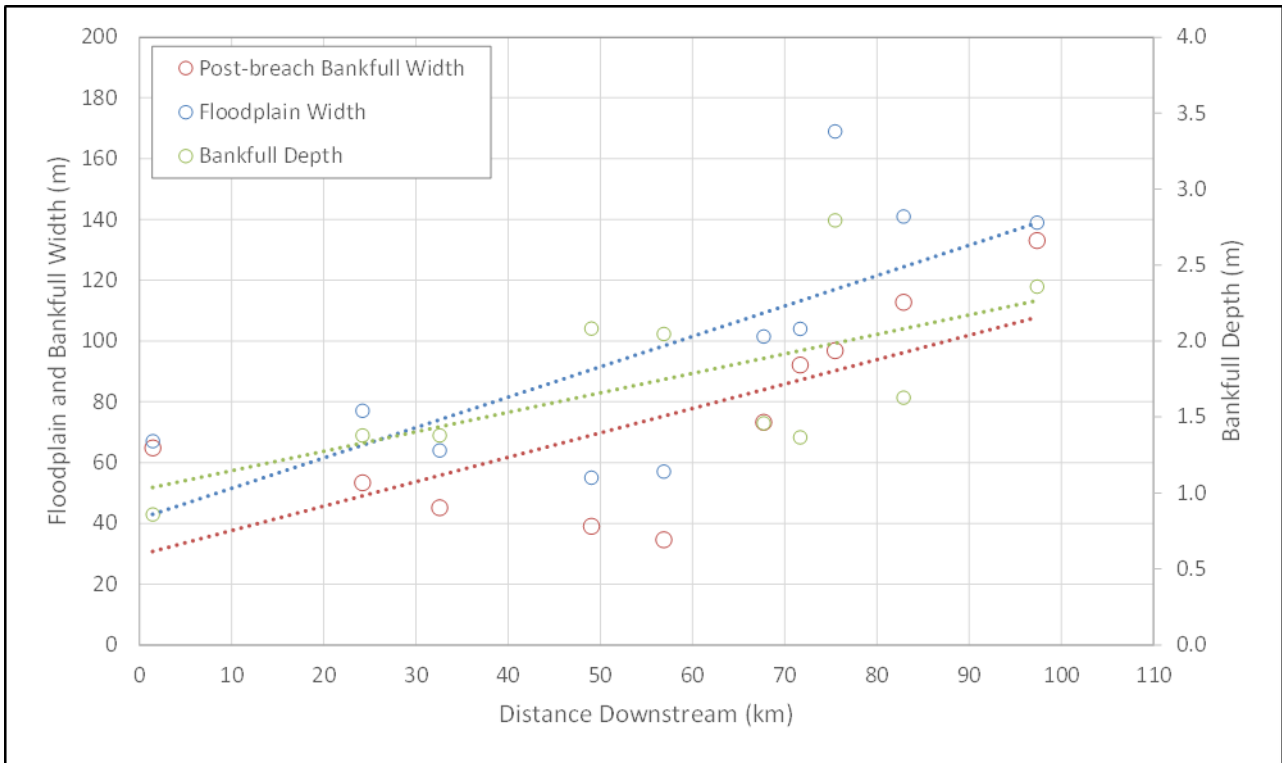


Figura 3.5.24: Trecho de Rio Largo com planície de inundação pequena – Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

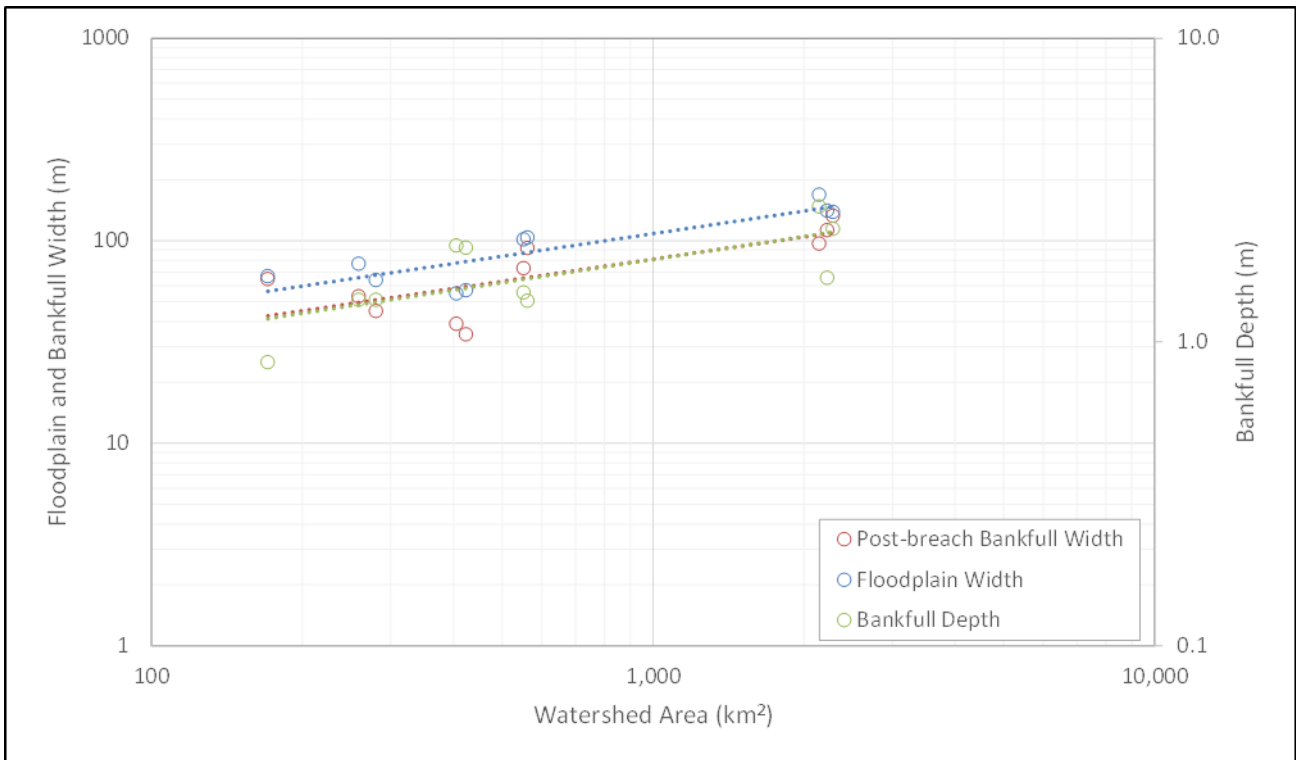


Figura 3.5.25: Trecho de Rio Largo com planície de inundação pequena – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



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.

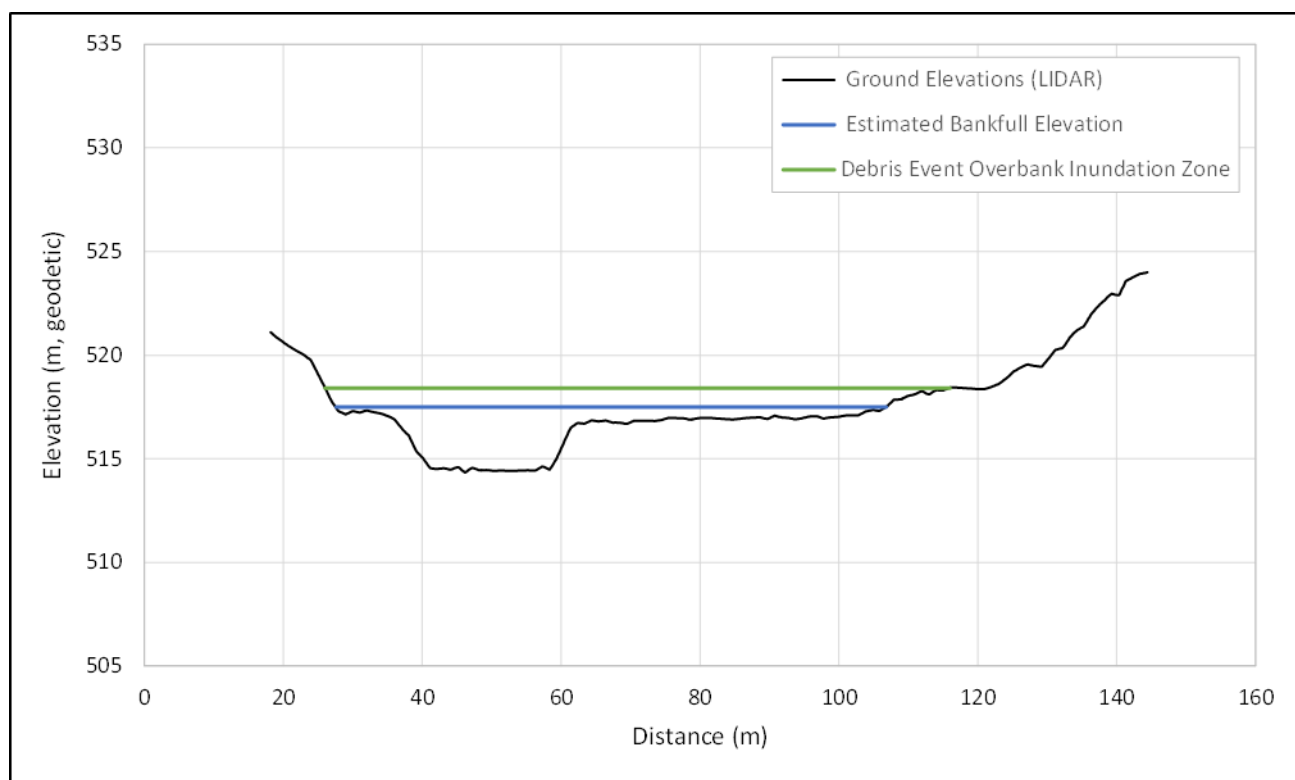


Figura 3.5.26: Trecho de Rio Largo com planície de inundação grande – Seção transversal de canal típica na seção de rio 38,41 km.



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

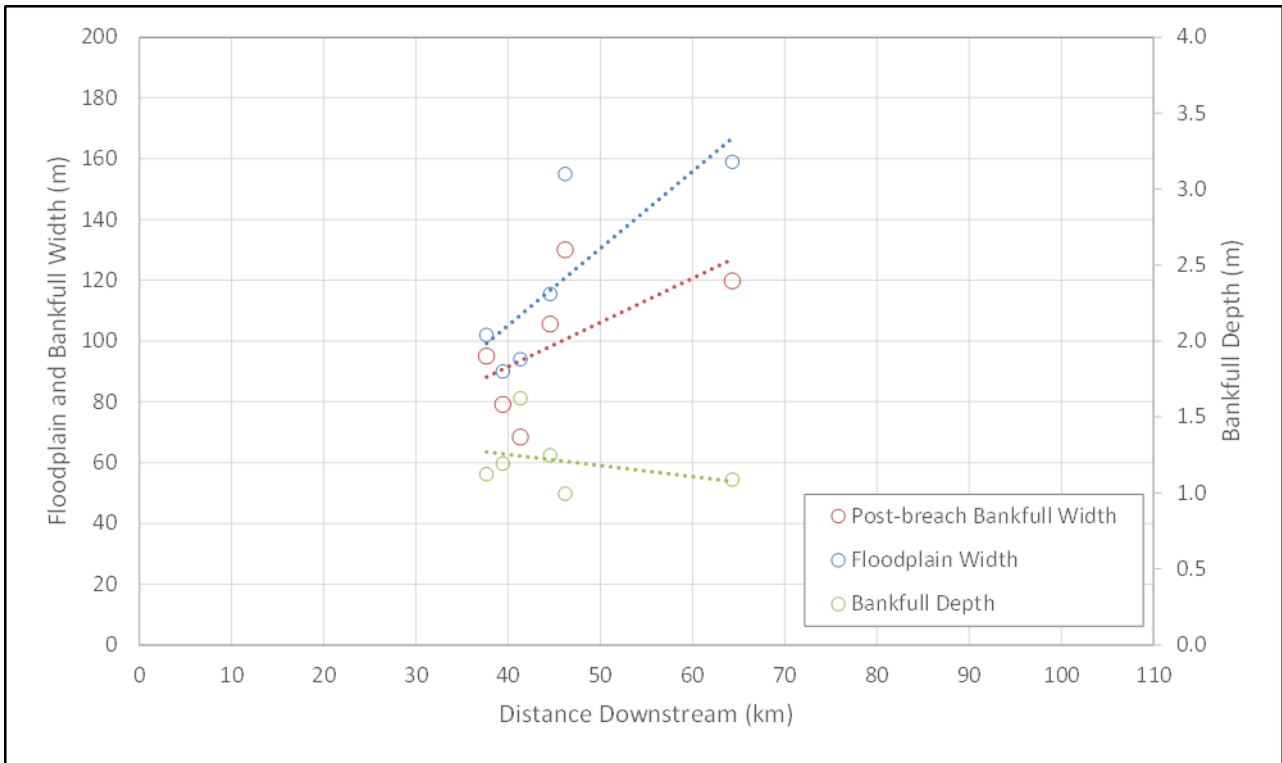


Figura 3.5.27: Trecho de Rio Largo com planície de inundação grande – Variação da geometria do canal com a distância a jusante.

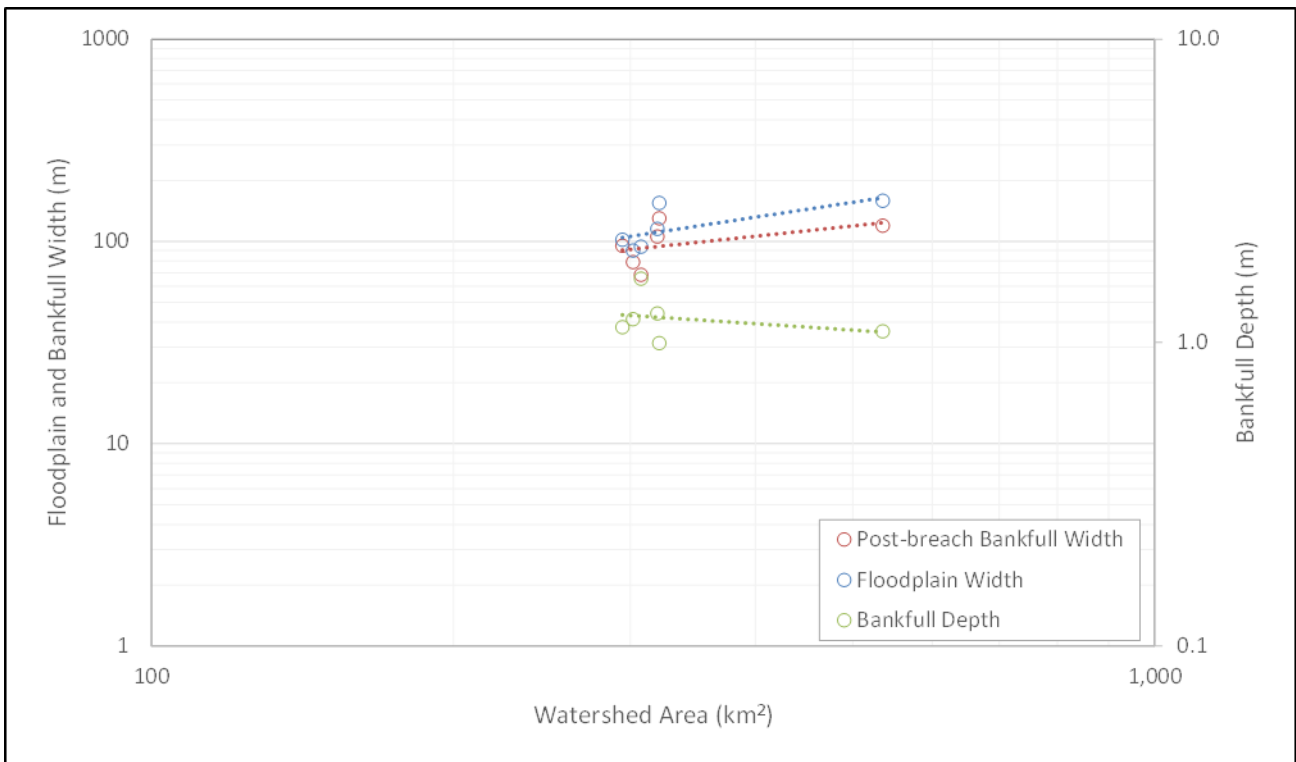


Figura 3.5.28: Trecho de Rio Largo com planície de inundação grande – Variação da geometria do canal com a área da bacia.



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.

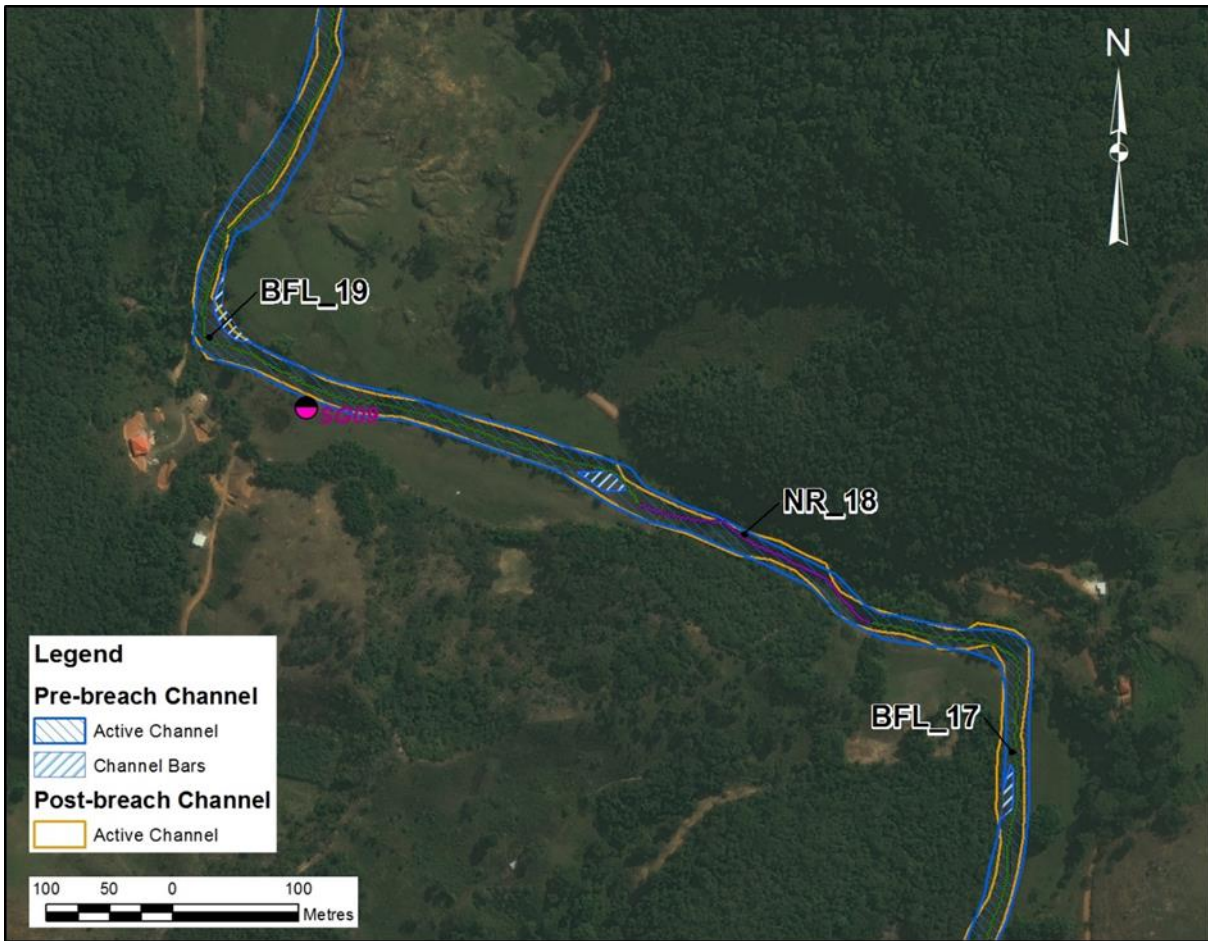


Figura 3.5.29: Delimitação do Canal Ativo Pré-Rompimento para Trechos de Rio com Planícies de inundação Estreitas (Trecho NR_18).

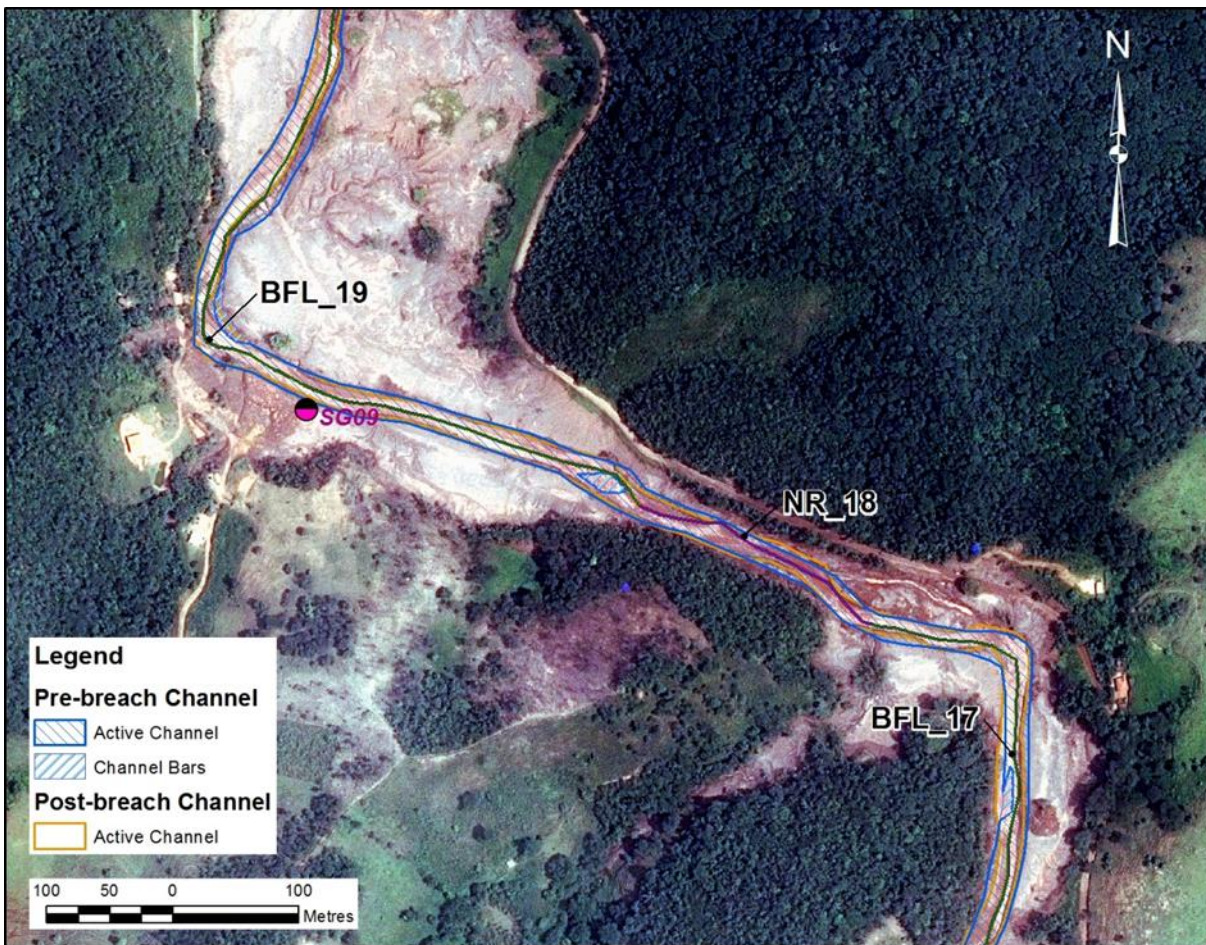


Figura 3.5.30: Delimitação do Canal Ativo Pós- Rompimento para Trechos de Rio com Planícies de inundações Estreitas.

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.

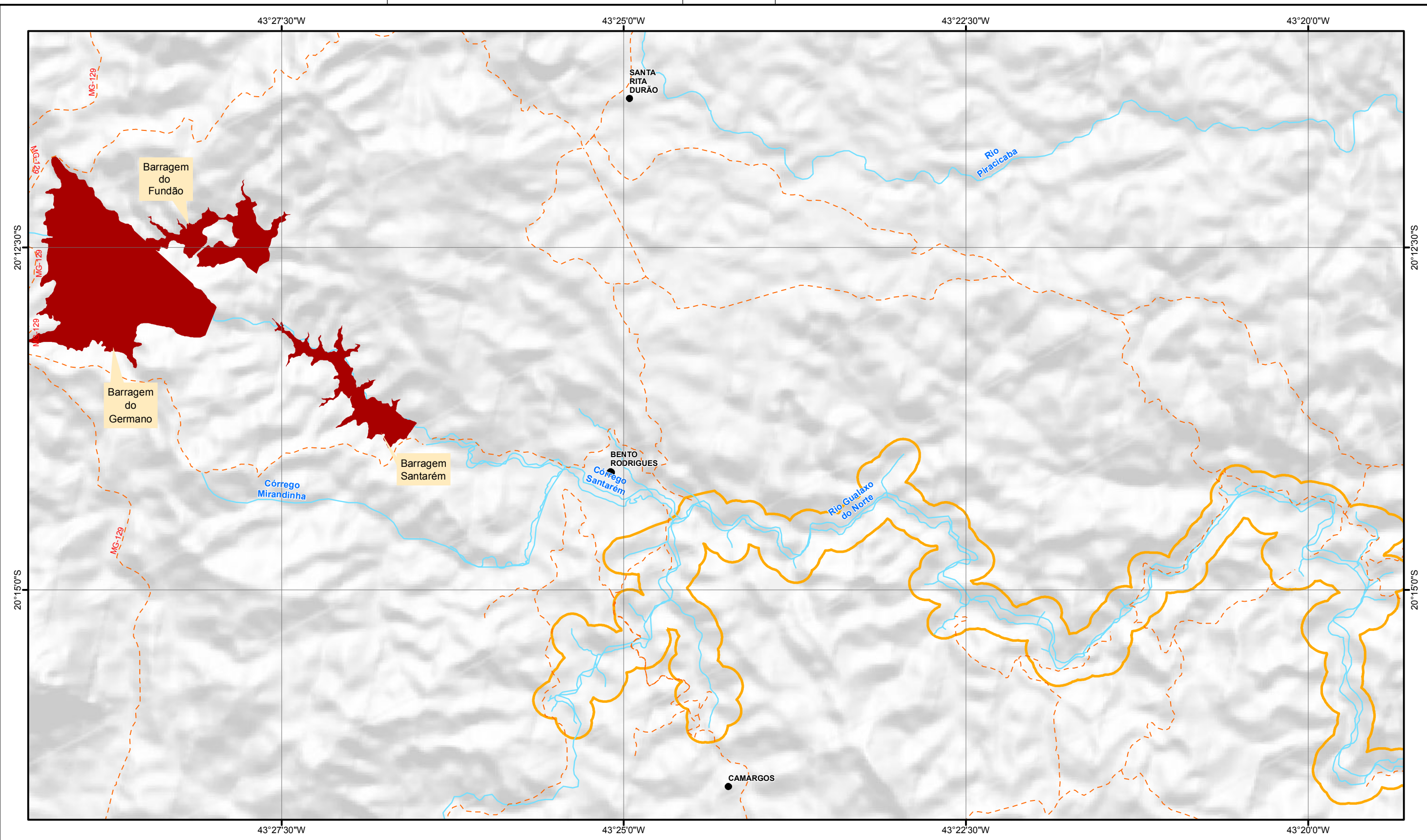
Em geral, trechos de cânion (CN) pareciam ter sofrido uma menor erosão das margens como resultado do fluxo de rejeitos. As margens nos trechos de cânion apresentavam leito rochoso abundante, sendo resistente à erosão. A não ser pela perda da vegetação ciliar e de solos nas encostas, a margem fluvial 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

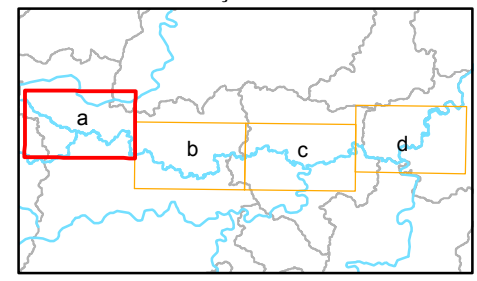
Erosão da margem do rio levou a formação de margens erosivas, geralmente localizados na face externa da curva do rio. Margens erosivas são fontes naturais de sedimentos fluviais relacionados a processos naturais de meandros fluviais e formação de planície de inundação e são encontrados em locais onde 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**).



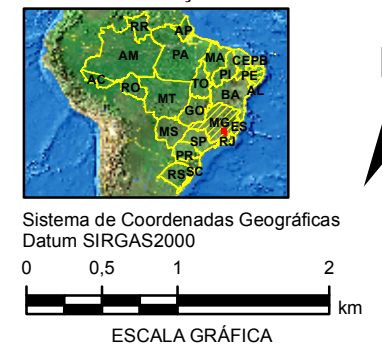
LEGENDA

- 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

ARTICULAÇÃO DAS FOLHAS



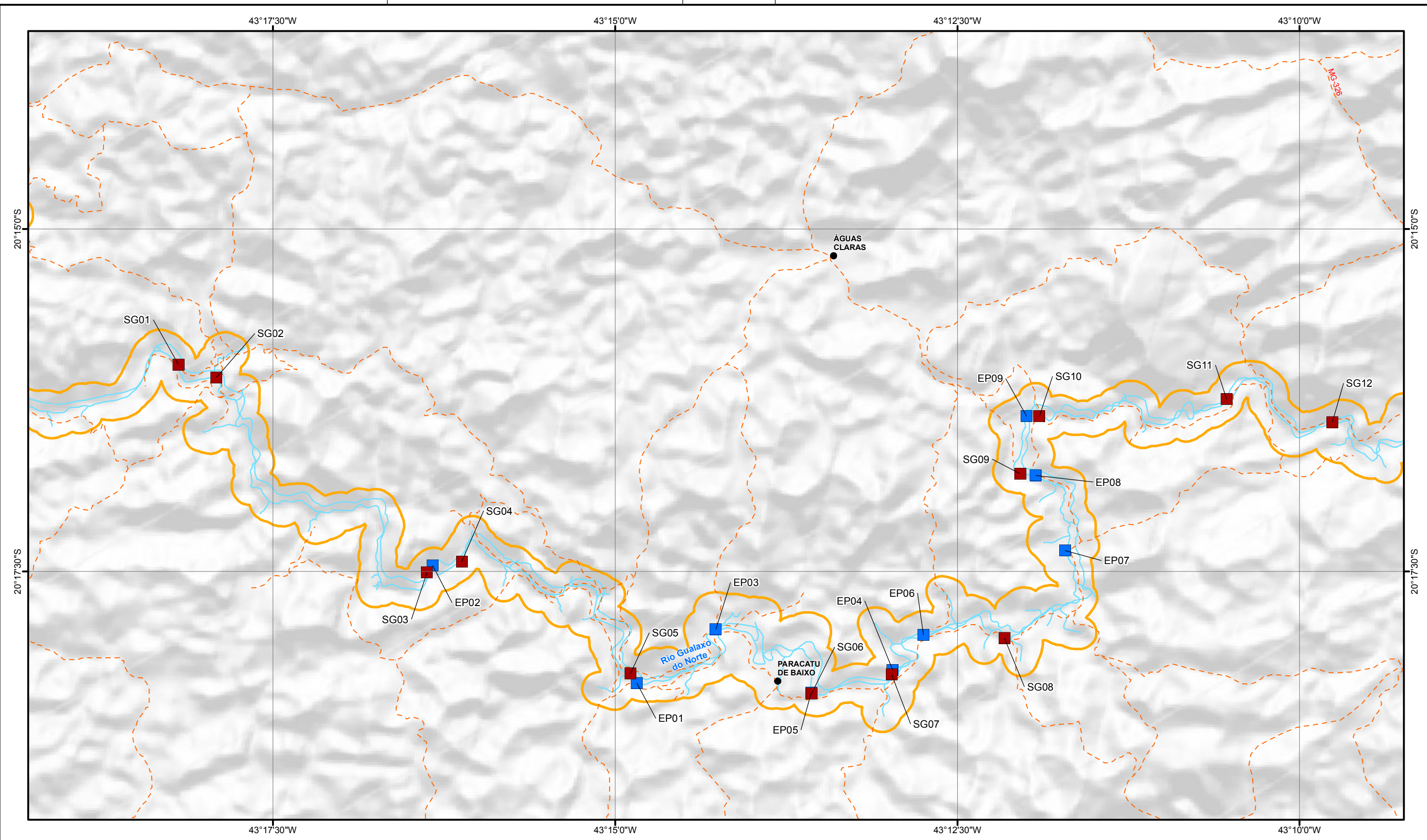
LOCALIZAÇÃO



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

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

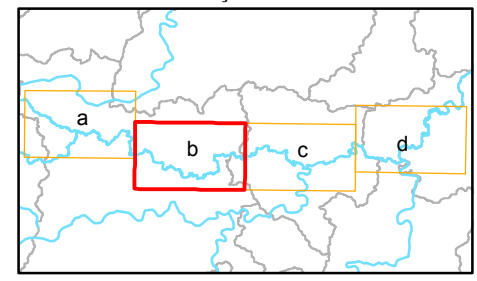
	PROJETO:	169-515-2282	ESCALA:	1:50.000
	GIS:	NTFE	outubro/2016	Figura 3.5.36 a
	REV:	DC	00	



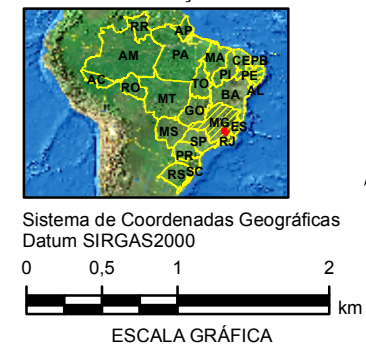
LEGENDA

- ⊙ 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



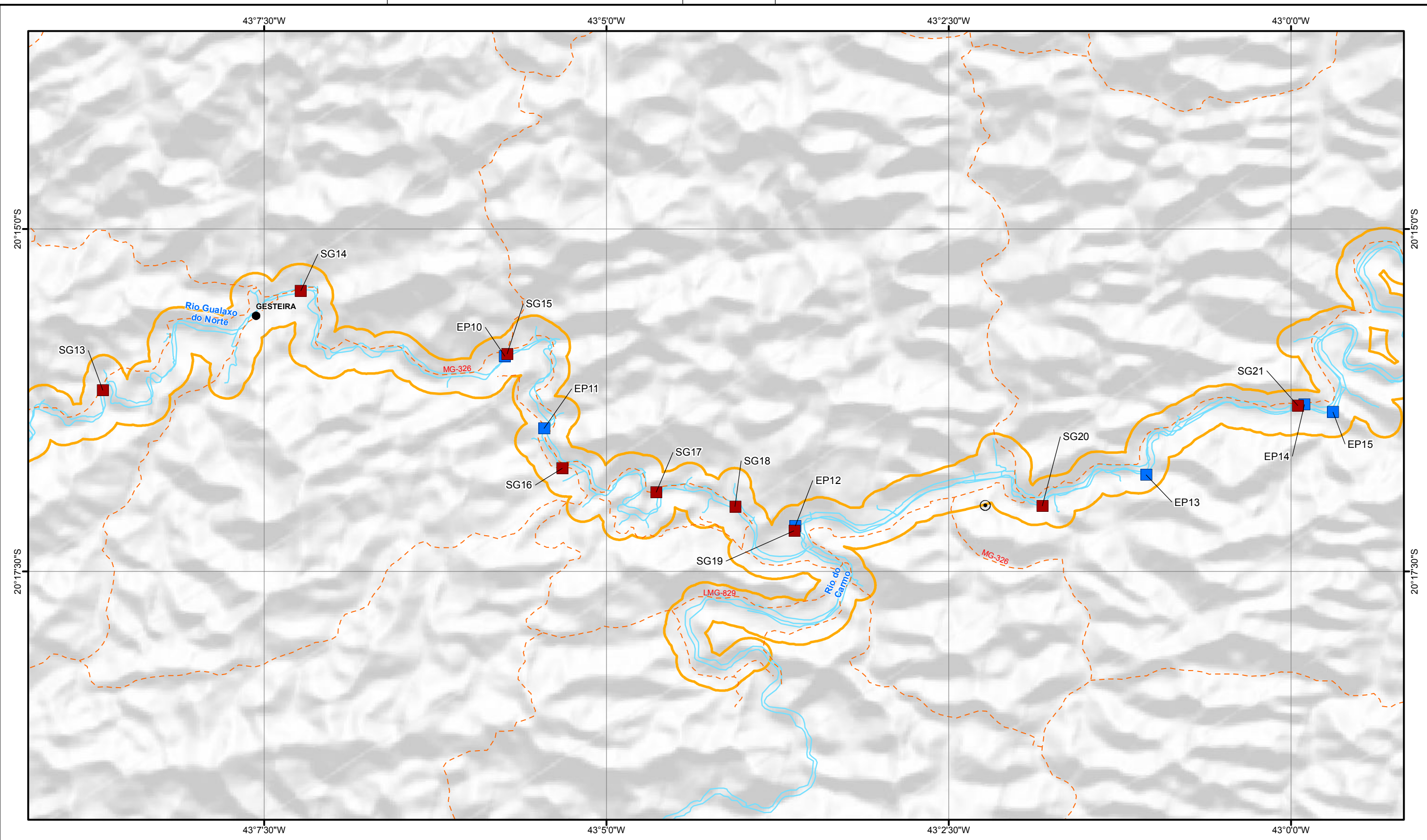
PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

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

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



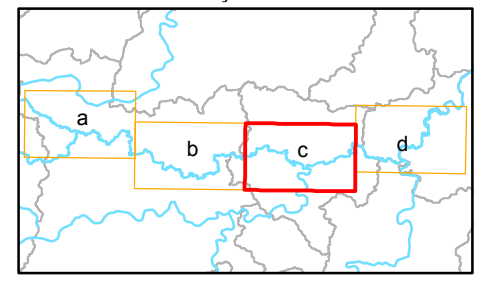
Figura 3.5.36 b



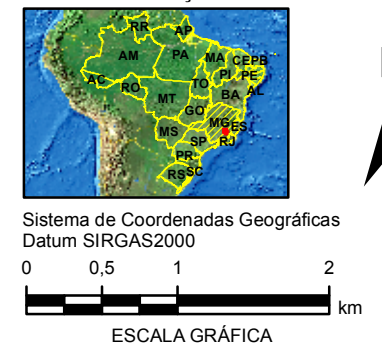
LEGENDA

- ⊙ 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



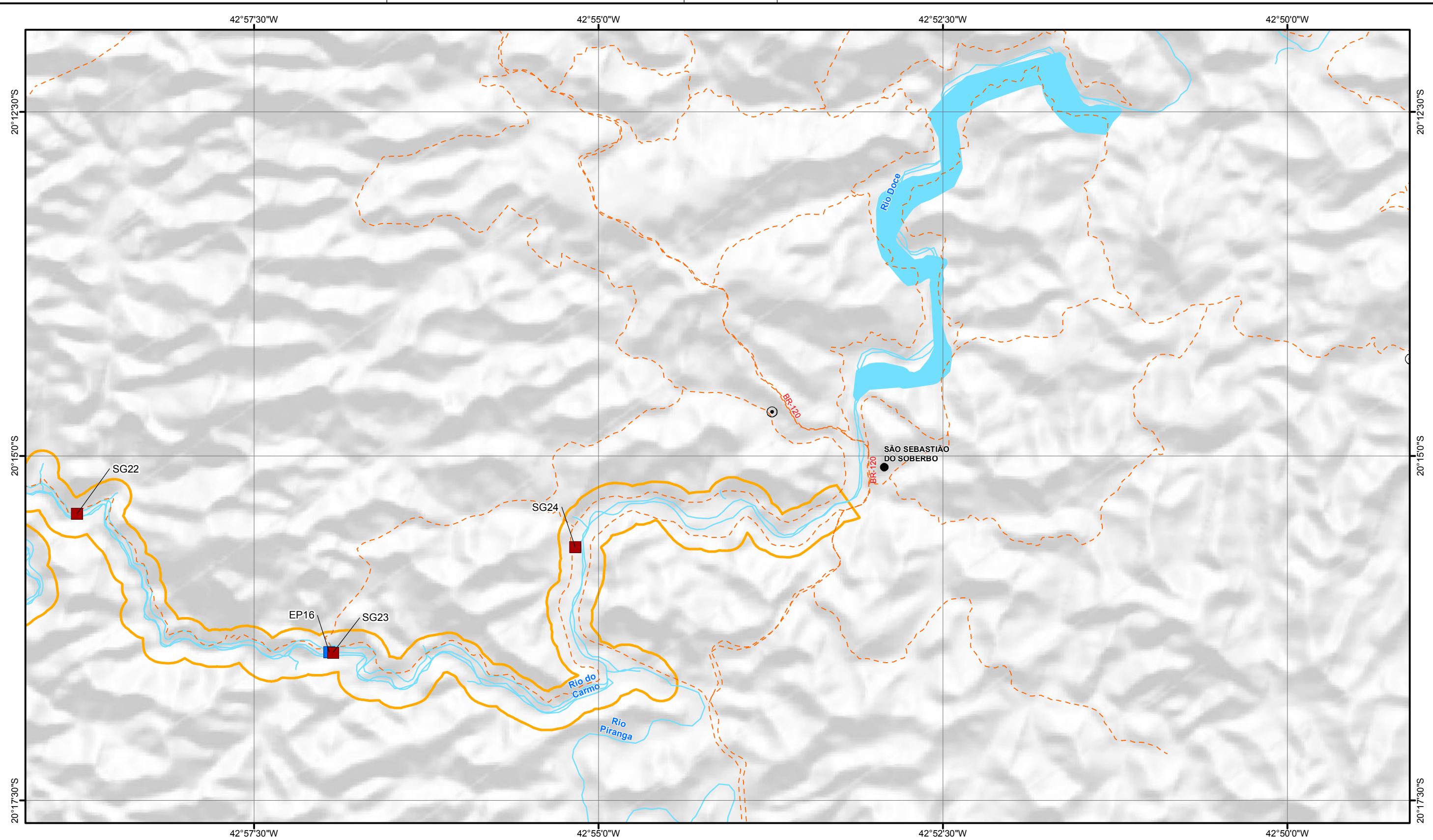
PROJETO: **ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO - AVALIAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA**

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



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

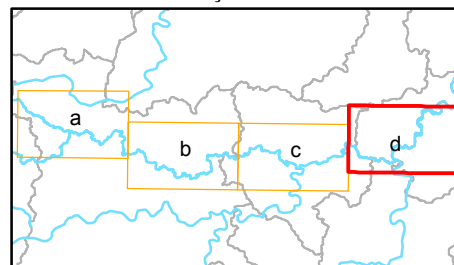
Figura 3.5.36 c



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



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 EROSIÃO**



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	249,100	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 (m ³)	Volume Estimado (m ³)	Volume Estimado de Alta Erosão (m ³)	Volume Estimado de Média Erosão (m ³)
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

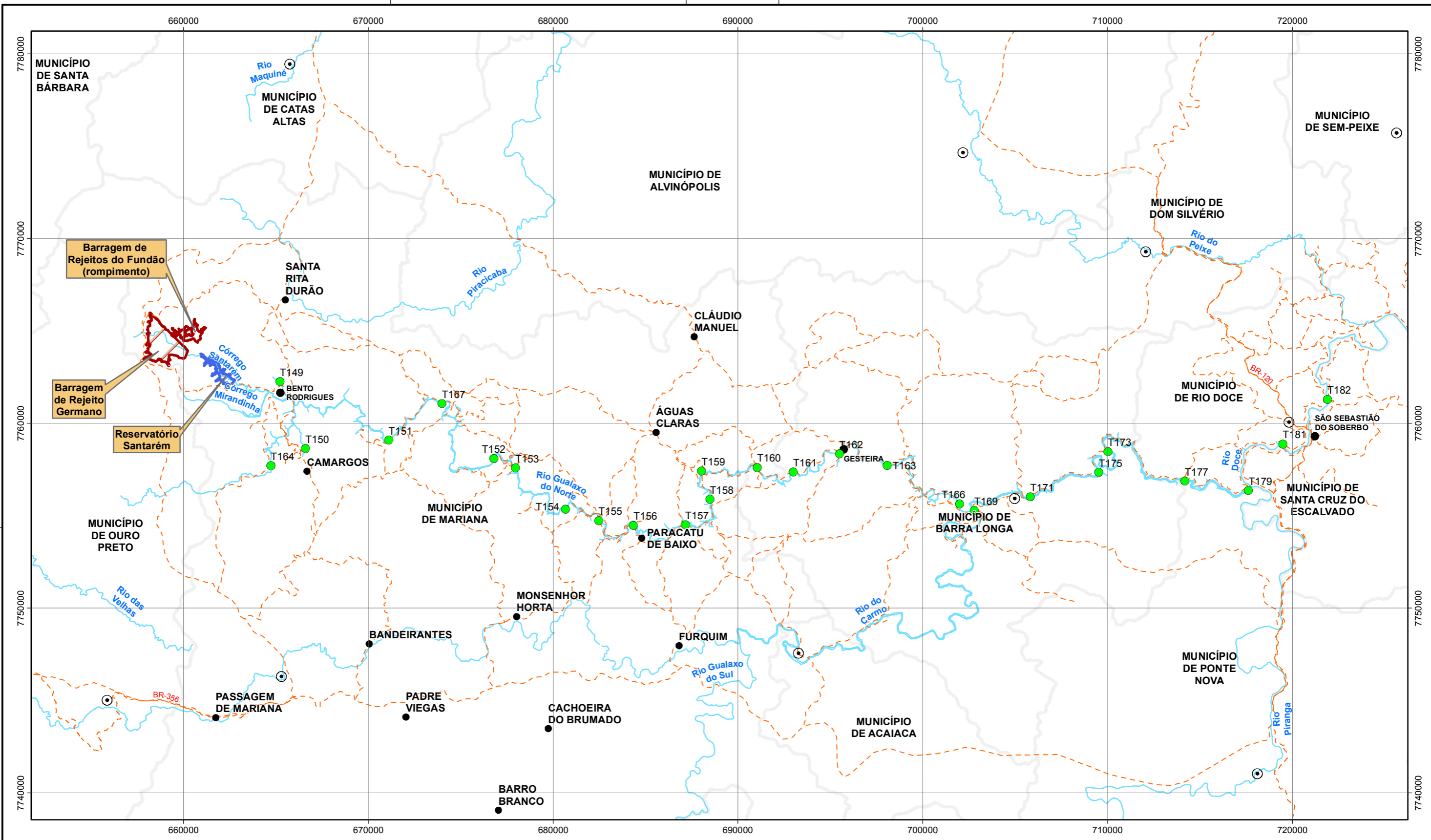


camada de seixos, formando o pavimento do leito (*lag layer*). Abaixo dessa camada, provavelmente rocha alterada ou sedimentos aluviais em trechos aluviais. A profundidade máxima de rejeitos pode registrar a profundidade máxima da erosão durante o evento de rompimento. Entretanto, os rejeitos depositados 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



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
REV	DC	00



Figura 3.5.39



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.

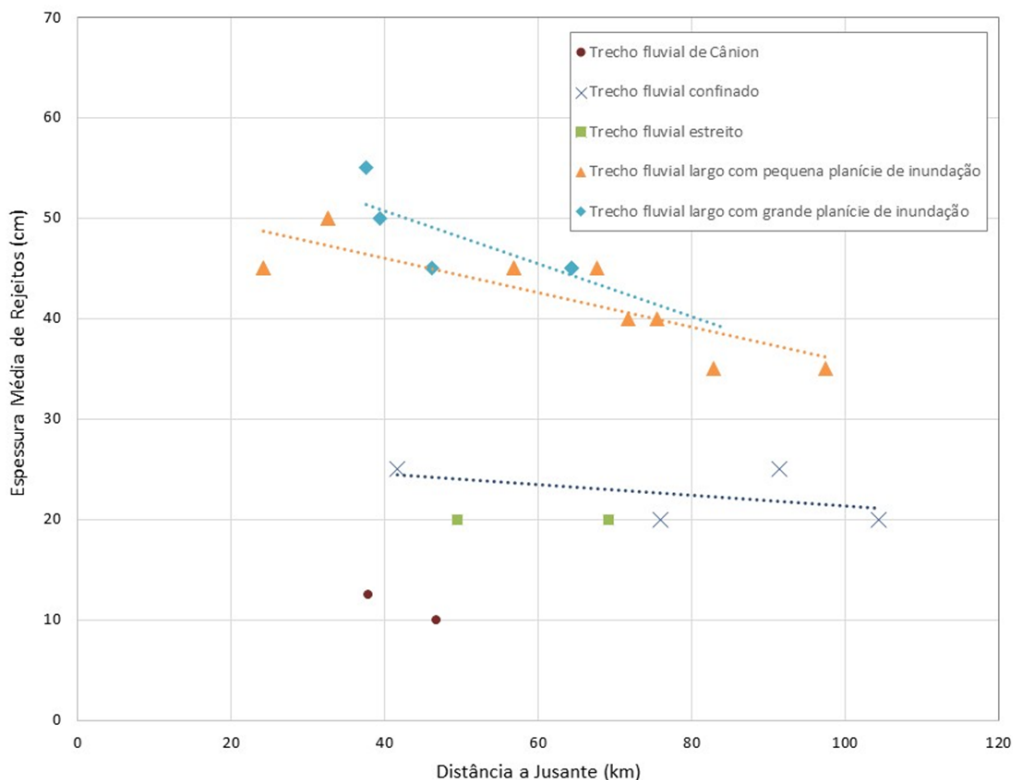


Figura 3.5.40: Espessura média de rejeitos observada, por tipo de trecho fluvial.

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



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.

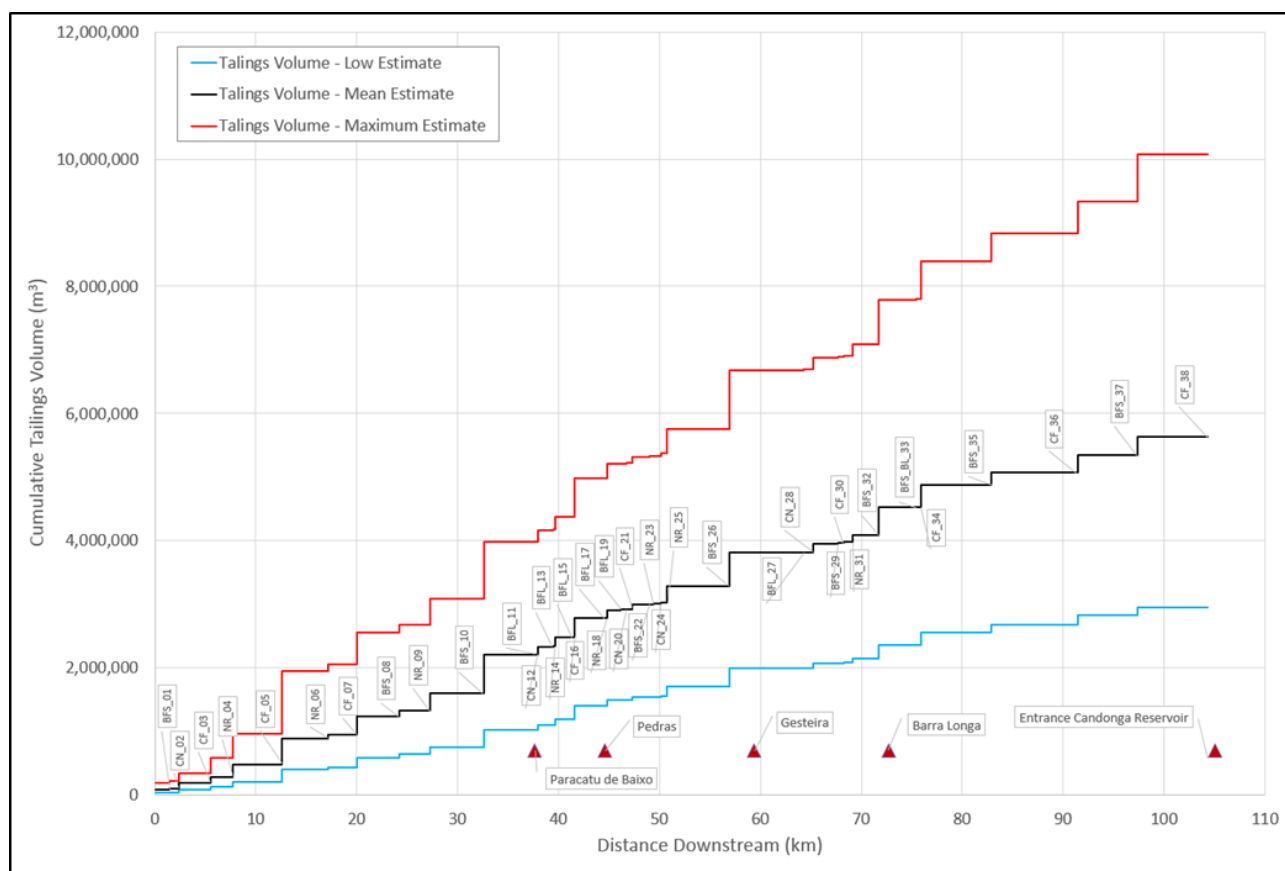


Figura 3.5.41: Volumes acumulados de rejeitos em função da distância a jusante para cada trecho fluvial a partir da confluência do Córrego Santarém com o Rio Gualaxo do Norte até o Reservatório de Candonga (principais localidades mostradas em caráter referencial).

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.

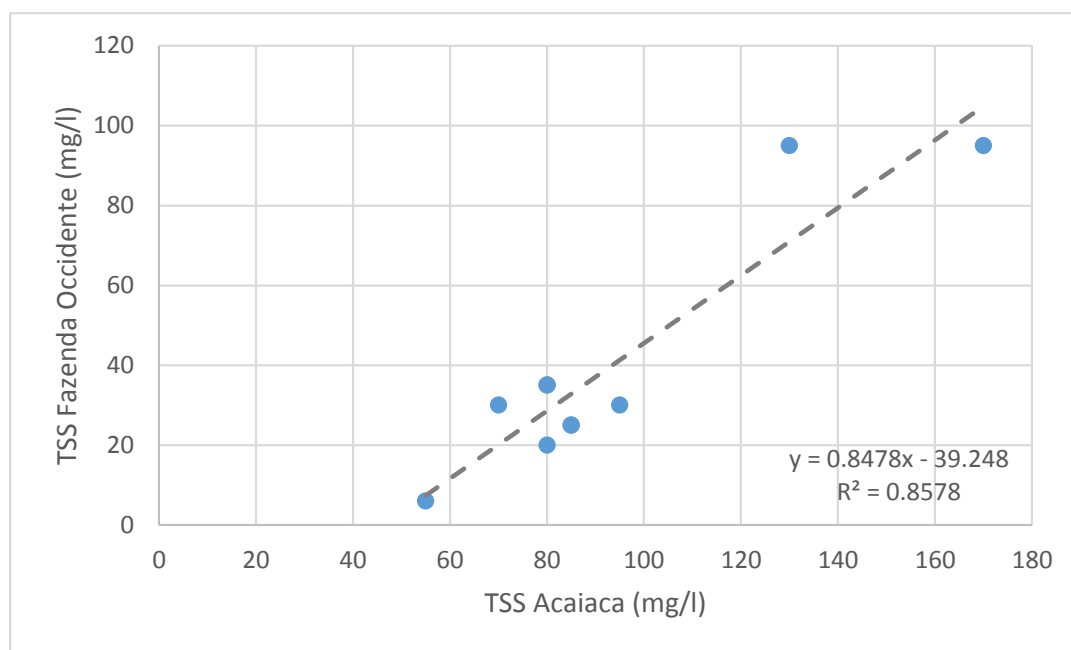


Figura 3.5.42: Correlação de medições de turbidez entre as estações Fazenda Ocidente e Acaiaca, Condições pré-rompimento.

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	140
		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

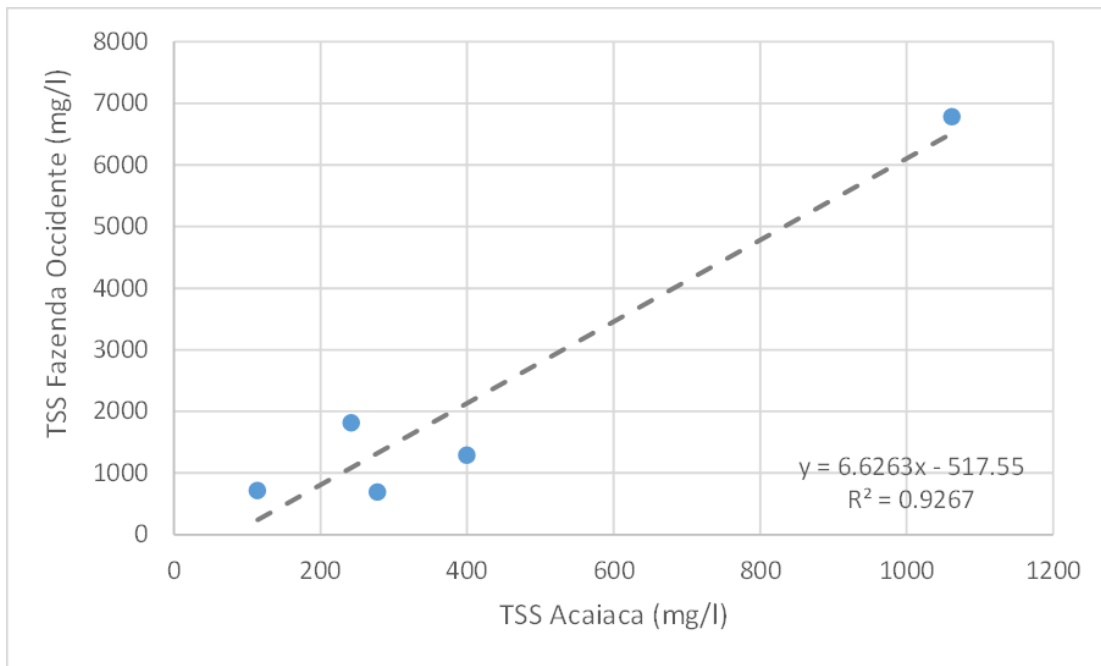


Figura 3.5.43: Correlação de medições de turbidez entre as estações Fazenda Ocidente e Acaiaca, Condições pós-rompimento. Legenda: SST = Sedimento Suspenso Total.

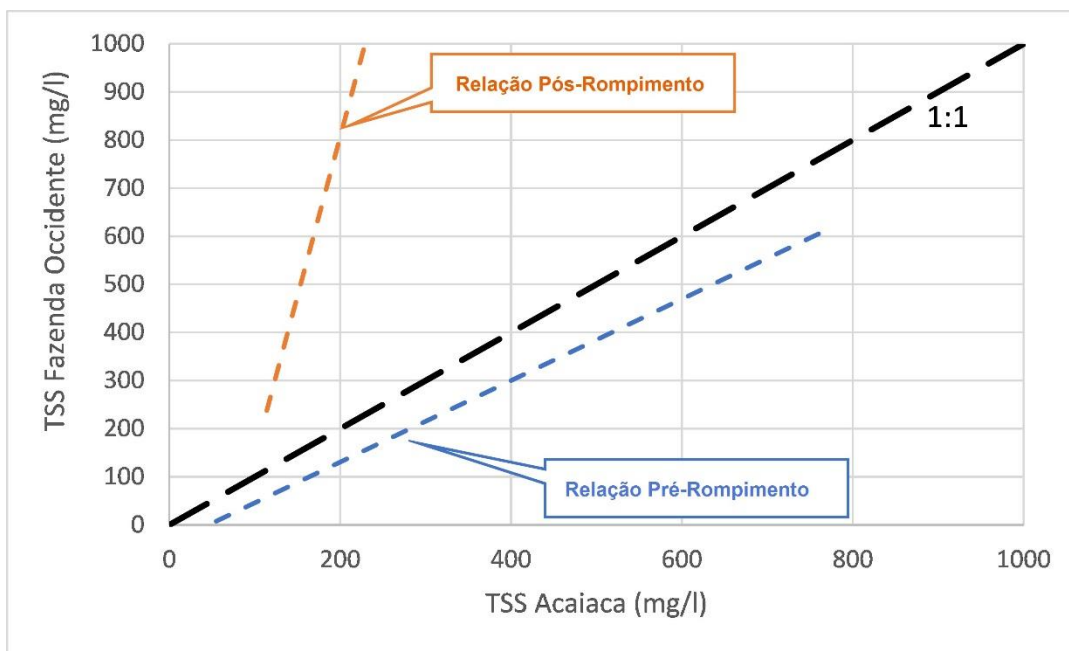


Figura 3.5.44: Relação da carga de sedimentos antes e após o rompimento entre as estações Fazenda Ocidente e Acaiaca. Legenda: SST = Sedimento Suspenso Total.

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 $B = IL(1 - T_e)E_h$
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**.

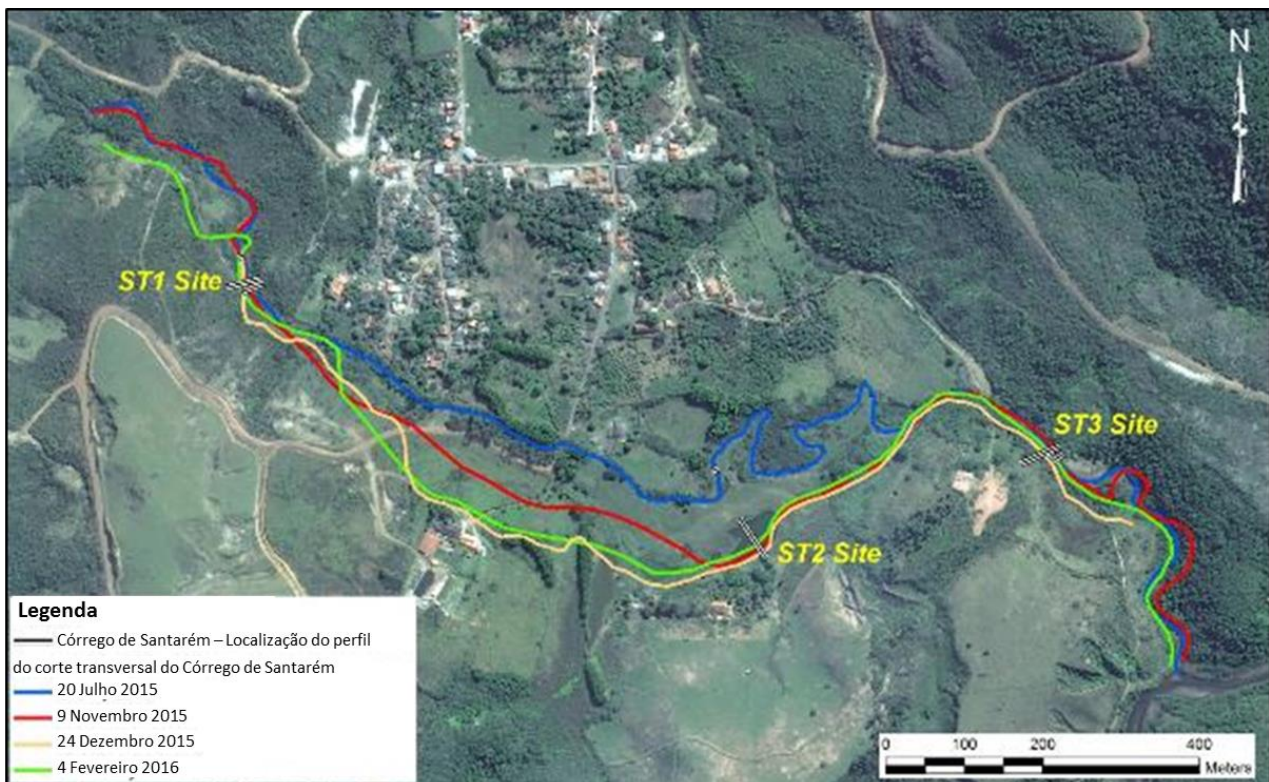


Figura 3.5.45: Localização dos perfis de seções transversais na bacia de drenagem do Córrego Santarém.

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

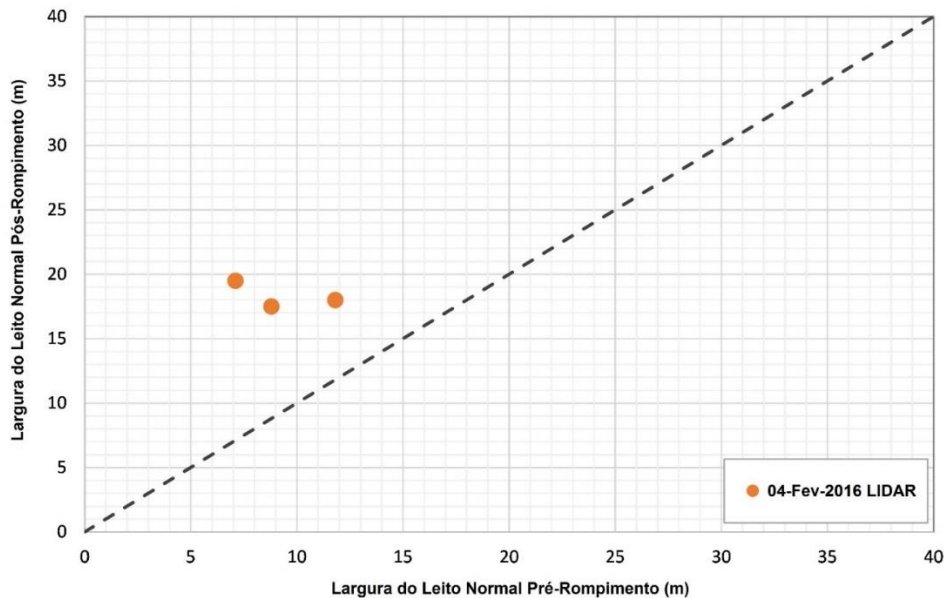


Figura 3.5.46: Variações na Largura do Leito menor do Córrego Santarém antes e após o rompimento.

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.

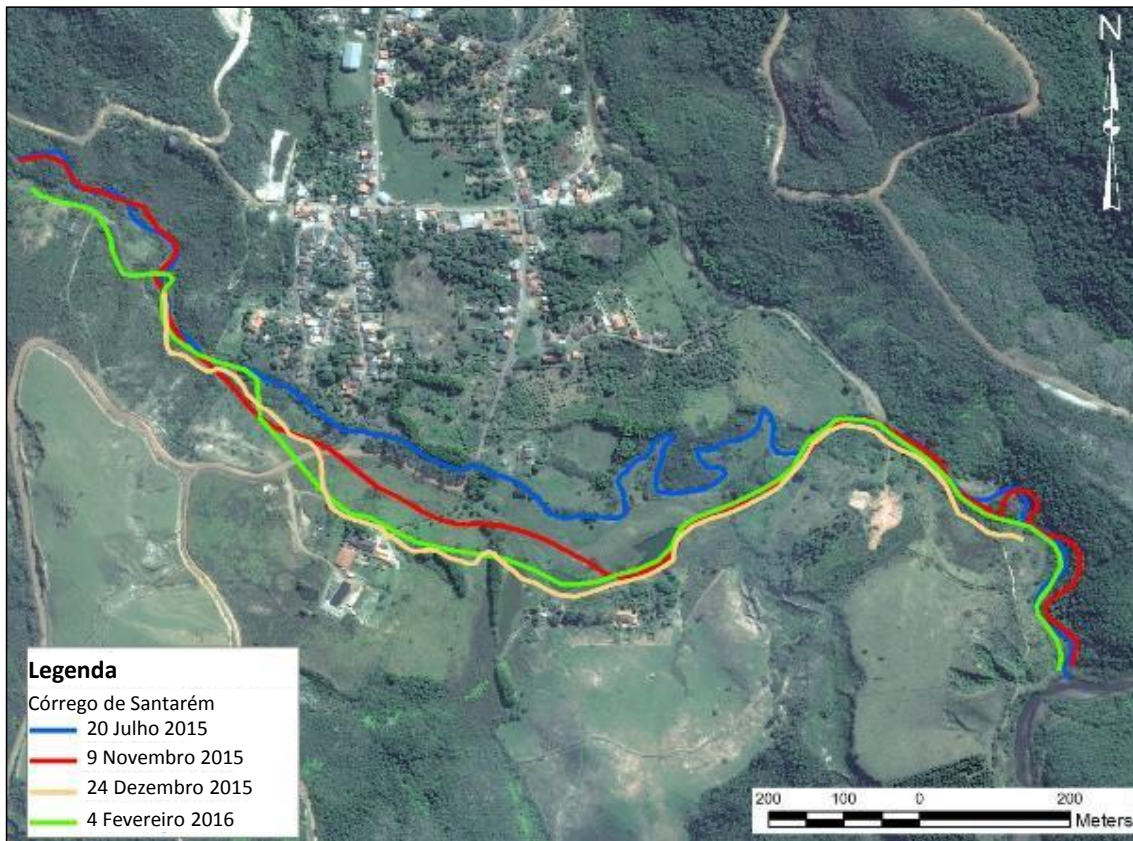


Figura 3.5.47: Delimitação do eixo do canal do Córrego Santarém nas condições pré-rompimento.

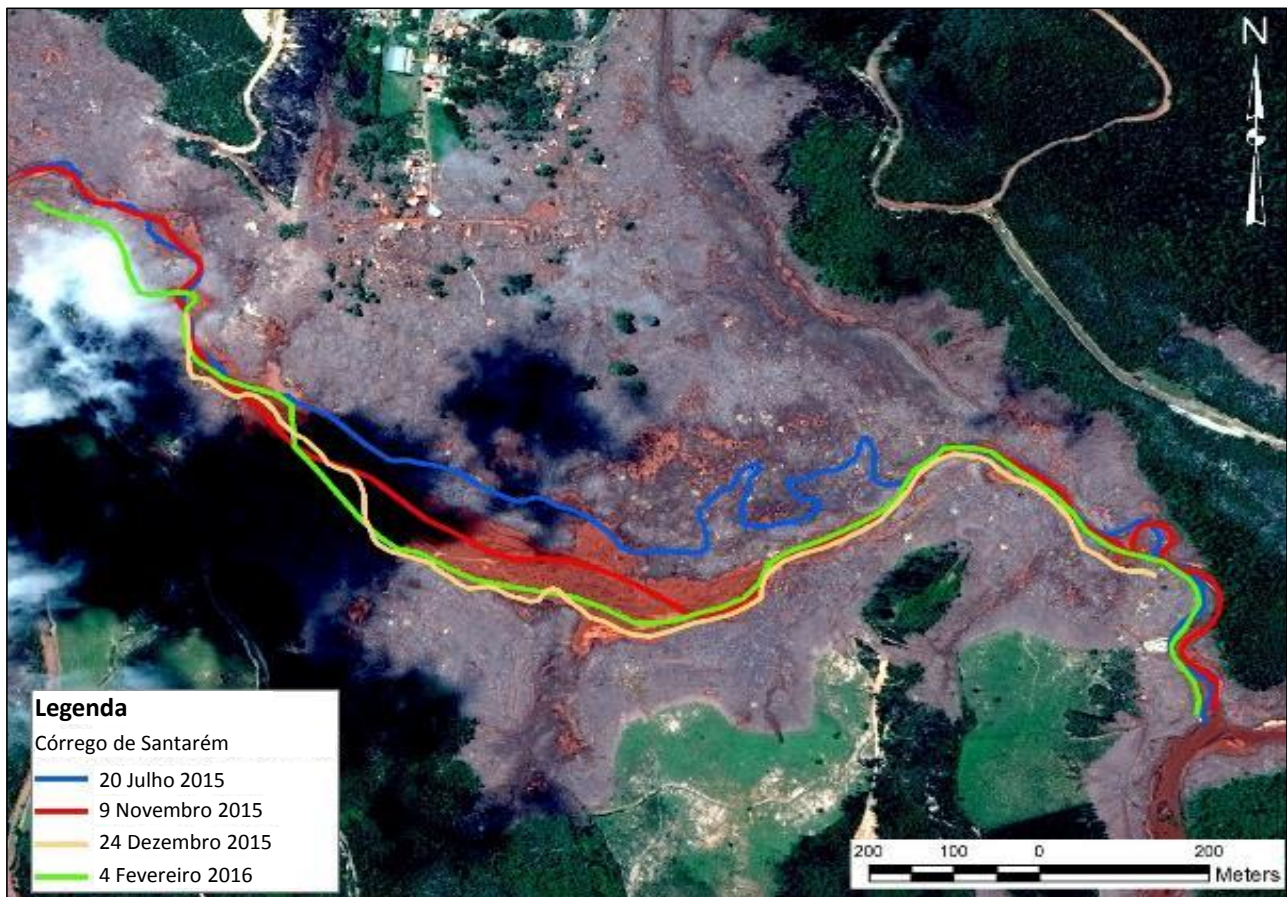


Figura 3.5.48: Delimitação do eixo do canal do Córrego Santarém nas condições pós-rompimento.

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.

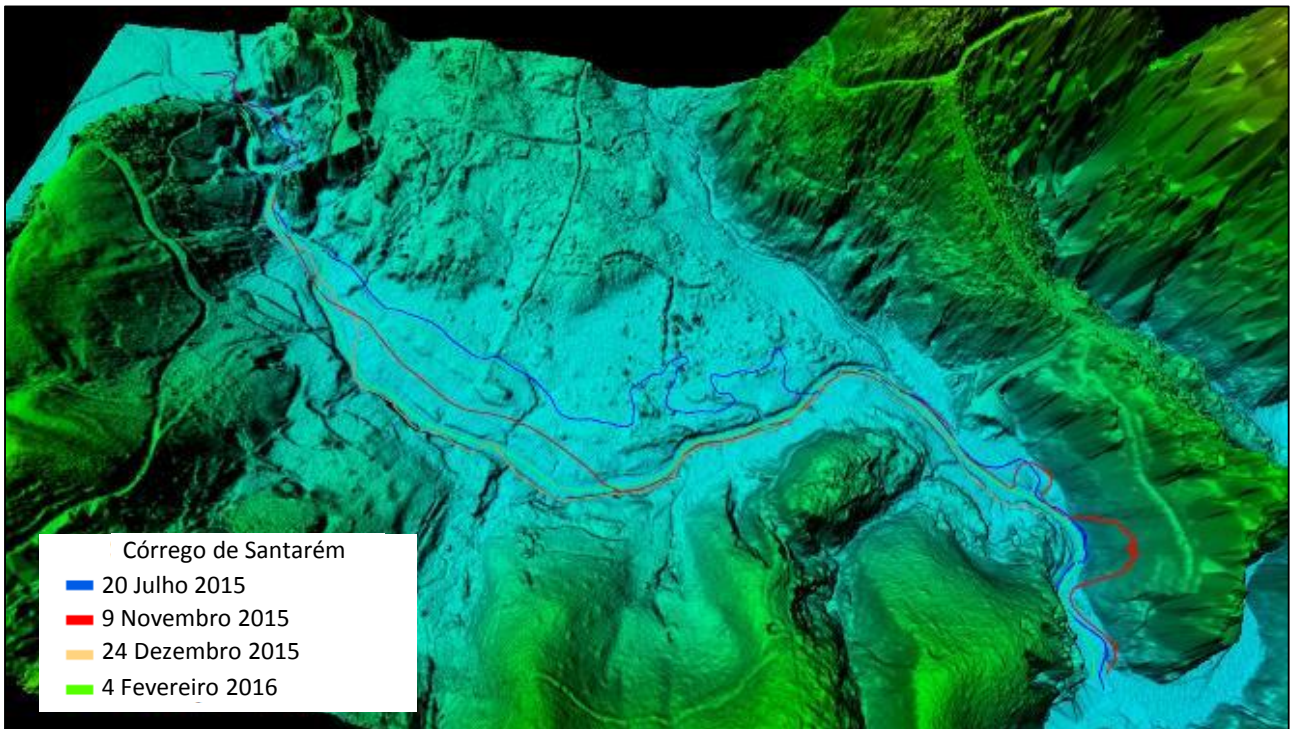


Figura 3.5.49: Renderização 3D da delimitação do eixo do canal do Córrego Santarém nas condições pós-rompimento a partir de LIDAR em 4 de fevereiro de 2016.

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

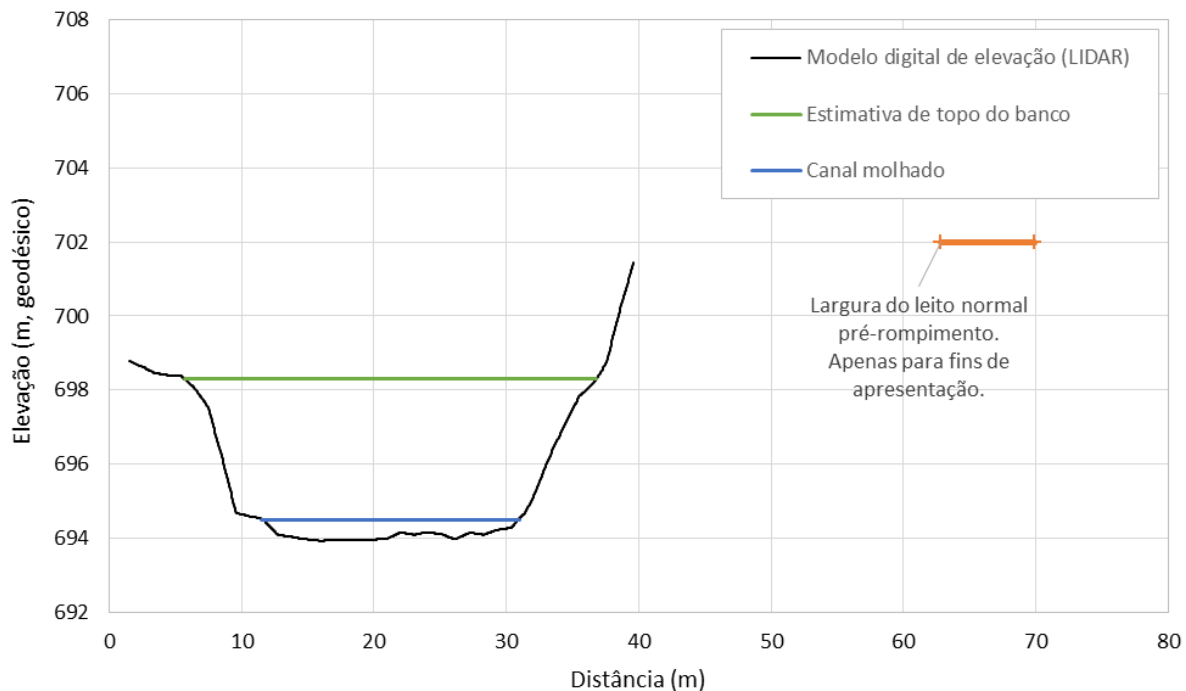


Figura 3.5.50: Seção transversal do canal do Córrego Santarém no ponto ST1, pós-rompimento. Largura do leito menor pré-rompimento é mostrado apenas para fins de comparação; elevação meramente ilustrativa.

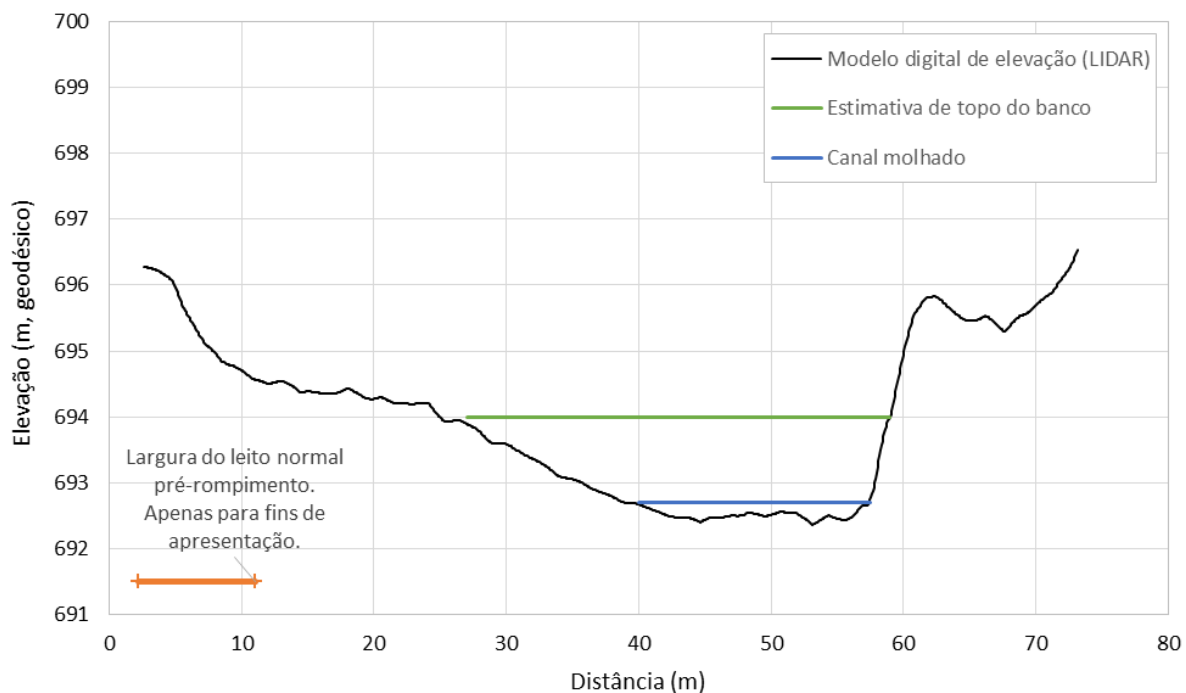


Figura 3.5.51: Seção transversal do canal do Córrego Santarém no ponto ST2, pós-rompimento. Largura do leito menor pré-rompimento é mostrado apenas para fins de comparação; elevação meramente ilustrativa.

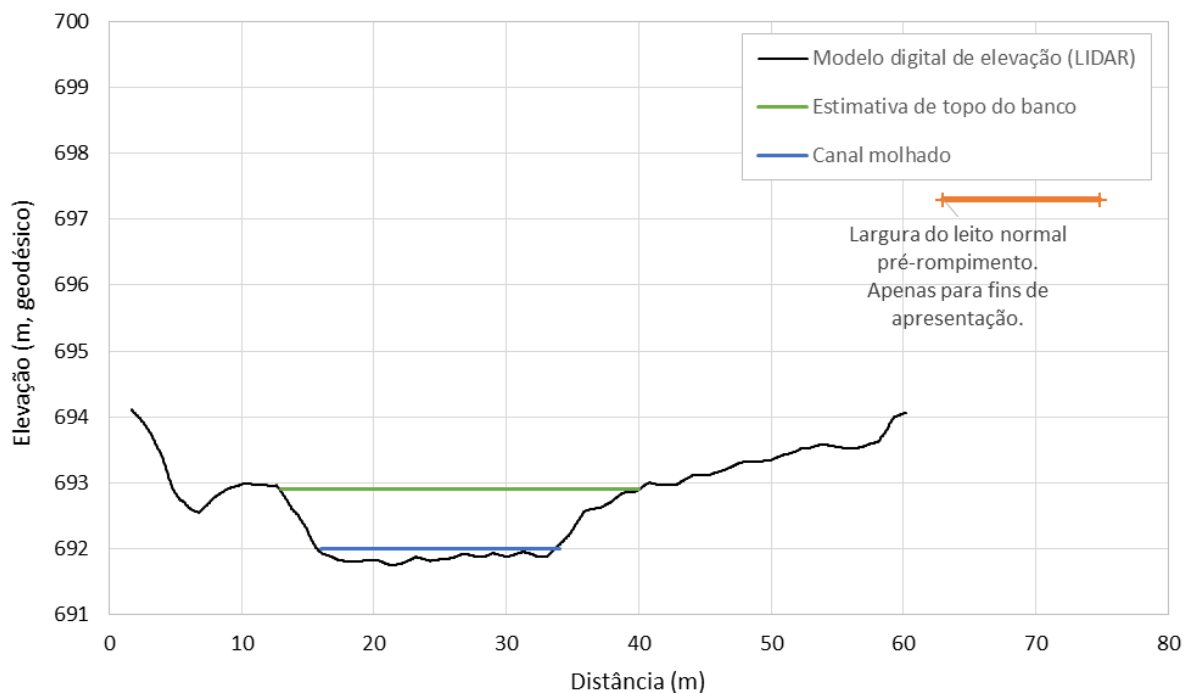


Figura 3.5.52: Seção transversal do canal do Córrego Santarém no ponto ST3, pós-rompimento. Largura do leito menor pré-rompimento é mostrado apenas para fins de comparação; elevação meramente ilustrativa.

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

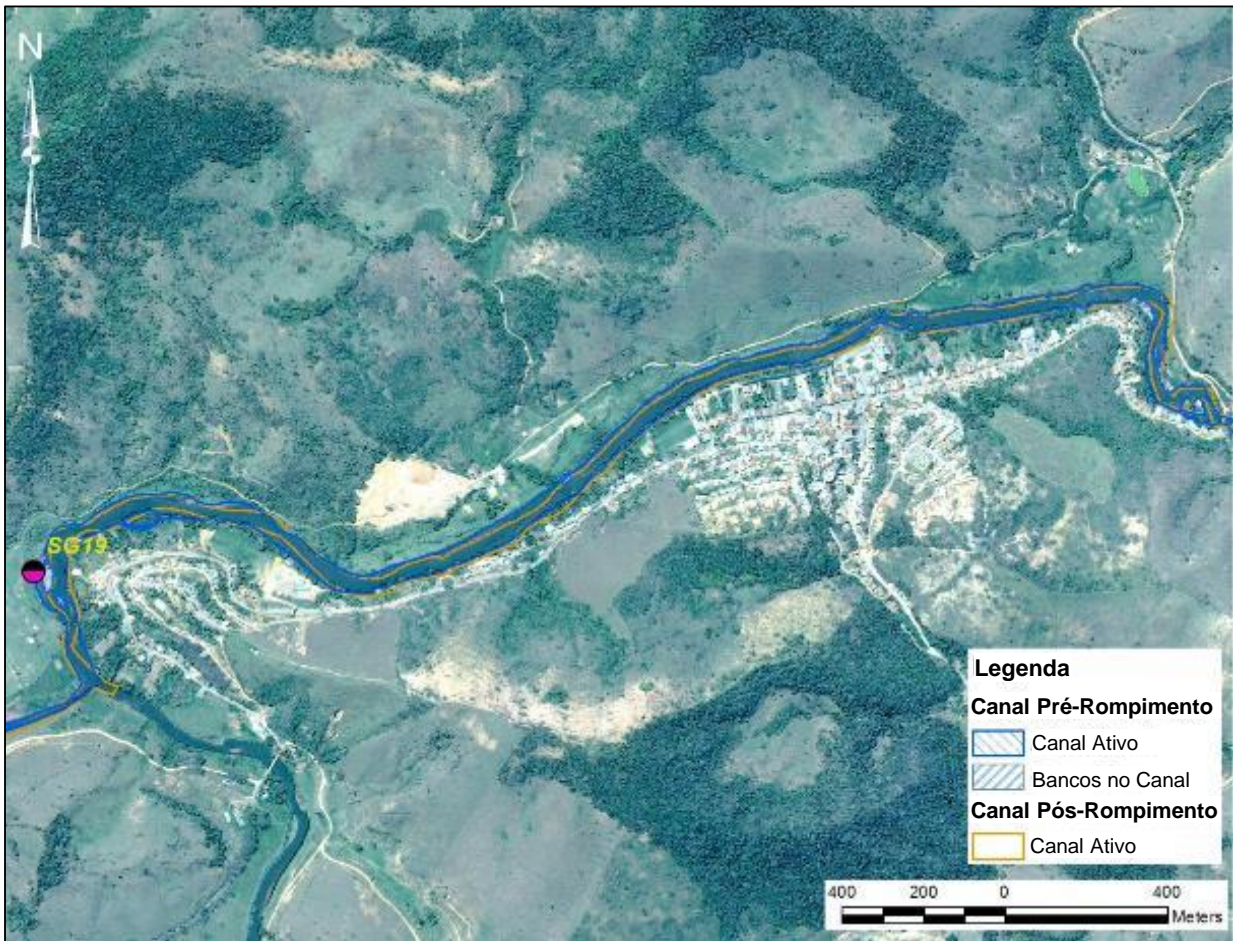


Figura 3.5.53: Delimitação do canal próximo a Barra Longa para as condições pré-rompimento.



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.

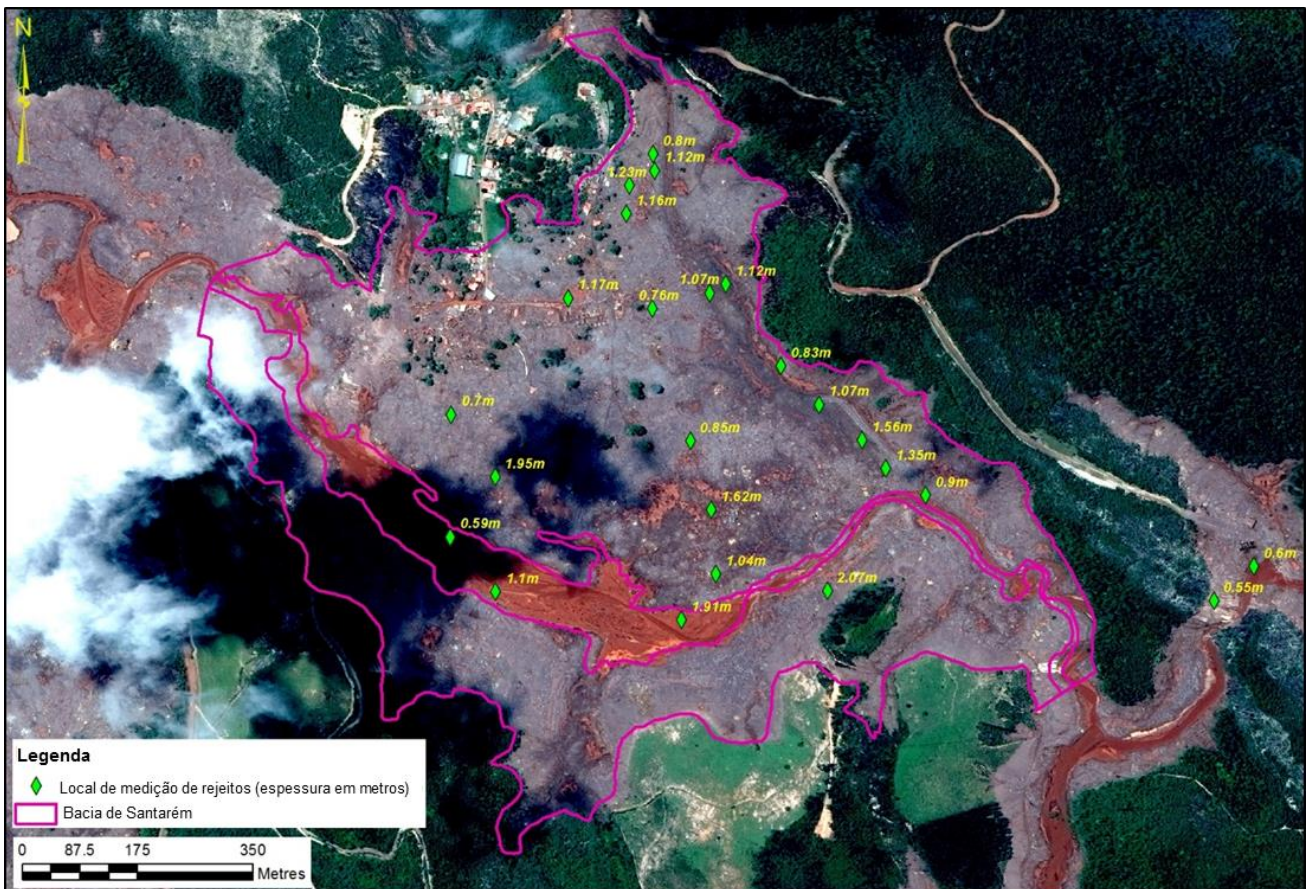


Figura 3.5.55: Pontos de medição de espessura de rejeito na Bacia do Córrego Santarém.

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.



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

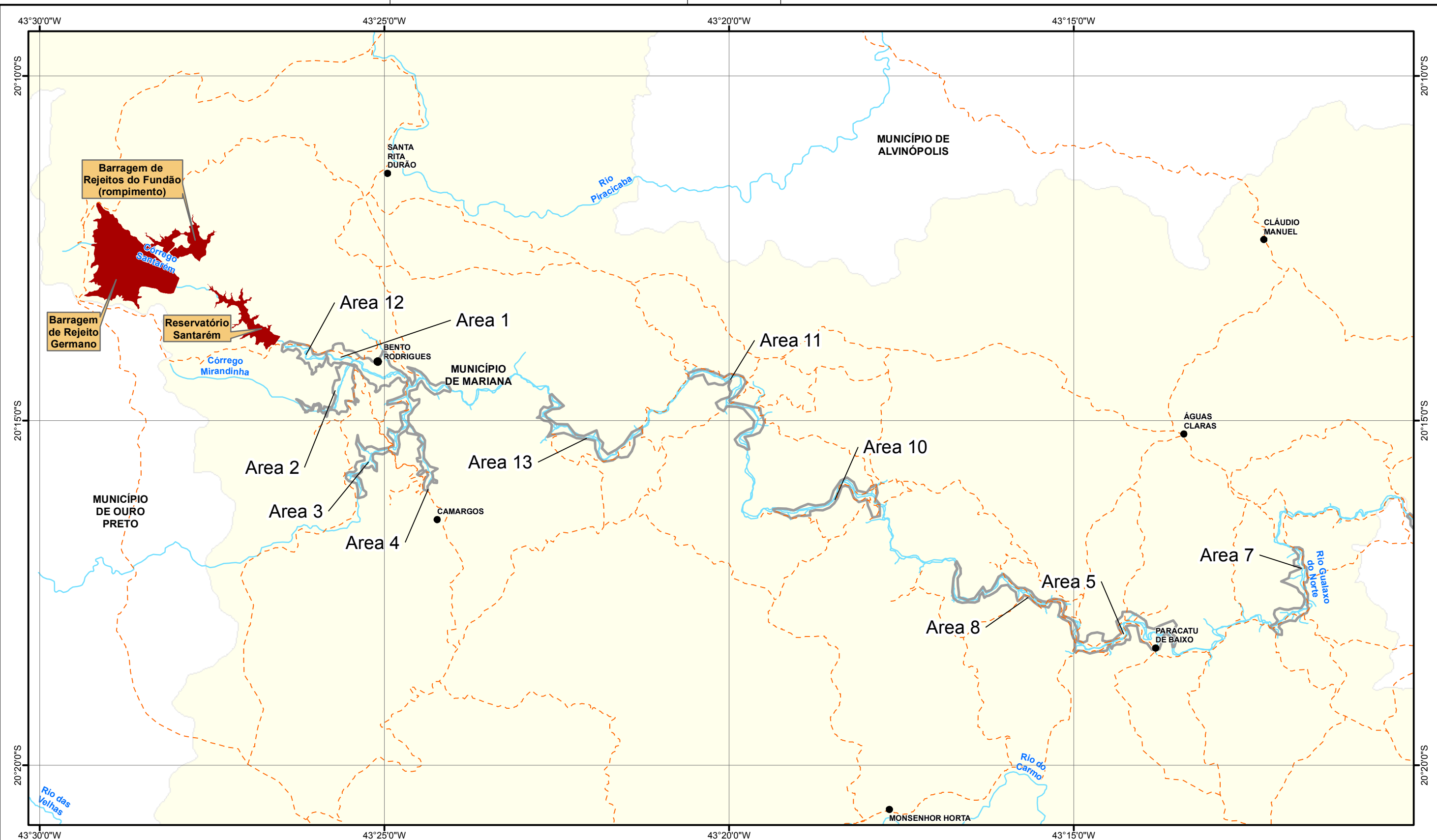
Número Prioritário	Áreas Prioritárias	Atividades de recuperação recomendadas
	Norte (loais tributários dentro: do TG45 ao TG47)	<p>transporte potencial de rejeitos das áreas expostas, e revegetar planície de inundação.</p> <ul style="list-style-type: none">■ Pavimentar margens de fora de curvas de meandro 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 (loais 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 (loais 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 (loais 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.

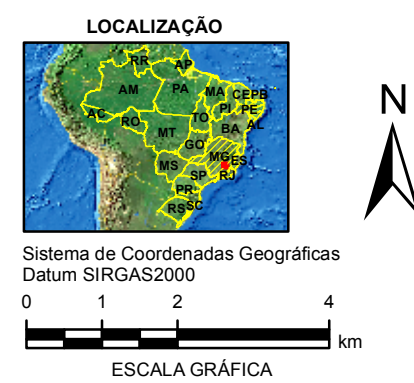
BFL = largo com grande planície de inundação; BFS = largo com pequena planície de inundação; CF = confinado; CN = cânion; NR = estreito.



LEGENDA

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

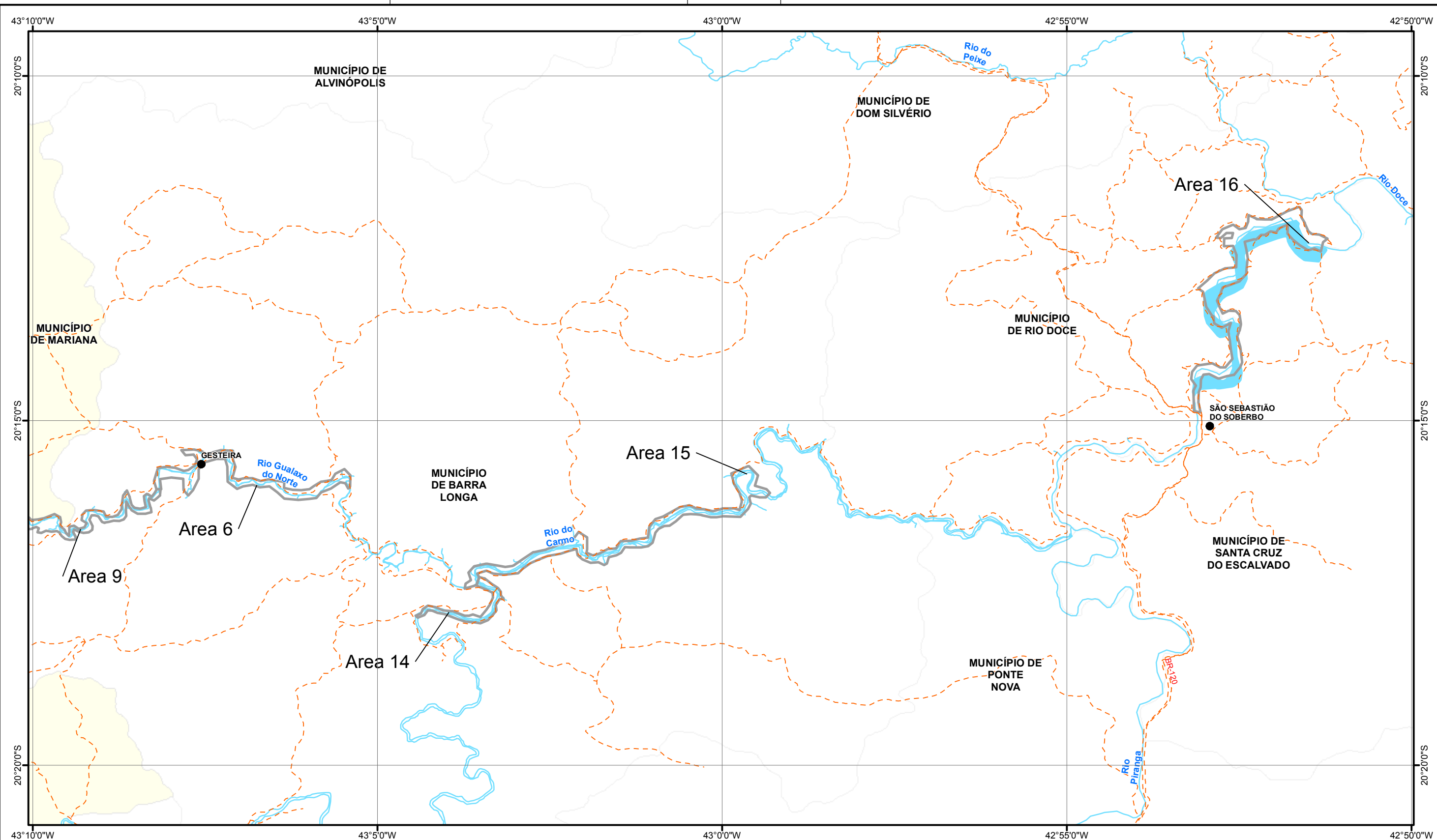
Nome	Descrição	Área (ha)
Área 1	Canal e planície de inundação Santarém, próximo a Bento Rodrigues	98
Área 2	Canal e planície de inundação Mirandinha	64
Área 3	Canal e planície de inundação montante Gualaxo do Norte	115
Área 4	Canal e planície de inundação Camargo	29
Área 5	Planície de inundação Gualaxo 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	Figura 3.6.1 a
REV:	DC	00	



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

LOCALIZAÇÃO

Sistema de Coordenadas Geográficas
Datum SIRGAS2000

ESCALA GRÁFICA

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.