



FUNDAÇÃO
renova

Relatório de conclusão das Obras de Regularização de calhas, margens e controle de processos erosivos nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, no trecho a montante da UHE Risoleta Neves - Cláusula 160 do TTAC

Fevereiro/2018.

Sumário Executivo

Este documento foi elaborado com objetivo de apresentar as medidas adotadas e os resultados alcançados com as ações de regularização das calhas e margens, bem como o controle de processos erosivos nos tributários dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce no trecho a montante da UHE Risoleta Neves, sendo parte de um amplo processo de recuperação ambiental em execução nas áreas atingidas pelo rompimento da Barragem de Fundão, no âmbito do Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC) exclusivamente ao atendimento de sua Cláusula de nº 160, firmado em 02 de março de 2016, assinado entre a Samarco e seus acionistas e entidades governamentais nos âmbitos federal e estadual de Minas Gerais e Espírito Santo.

As atividades aqui descritas fazem parte do projeto de recuperação ambiental de rios principais (Gualaxo do Norte, Carmo e Doce no trecho a montante da UHE Risoleta Neves) e córregos tributários e dizem respeito à estabilização física das áreas impactadas. O relatório foi estruturado abordando em capítulos separados os tributários, rios principais e os dispositivos de drenagem e controle de erosão, em função das particularidades do projeto de cada um destes grupos.

O relatório apresenta uma contextualização dos trabalhos de recuperação ambiental realizados, com foco nos cursos d'água e planícies de inundação no trecho impactado pelo rompimento à montante da UHE Risoleta Neves. São apresentadas também a correlação entre a cláusula 160 e os programas 23 e 24 no âmbito do manejo do Rejeito. As interfaces com outros programas da Renova e cláusulas do TTAC são indicadas neste documento, porém não discutidas em detalhe.

Índice

1. Introdução	7
2. Contextualização	8
2.1. Cronologia dos eventos	10
3. Fundamentação técnica	12
3.1. Estudos Geomorfológicos, Hidrodinâmicos e Hidrossedimentológicos	12
3.1.1. Geomorfologia	12
3.1.2. Hidrodinâmica	16
3.1.3. Hidrossedimentologia	18
3.2. Estudos Geoquímicos	22
4. Projeto de recuperação ambiental de Tributários	25
4.1. Introdução	25
4.2. Premissas e critérios de Projeto	31
4.3. Metodologia	31
4.3.1. Mapeamento inicial	32
4.3.2. Levantamento de campo	32
4.3.3. Proposição de seção de projeto	33
4.3.4. Elaboração do projeto	35
4.3.4.1. Dados disponíveis	35
4.3.4.2. Estudos hidrológicos	36
4.3.4.2.1. Pluviometria	36
4.3.4.2.2. Chuva de Projeto	39
4.3.4.2.3. Fluviometria	42
4.3.4.3. Dimensionamento Hidráulico	45
4.3.4.4. Desenhos	46
4.4. Resultados	47
4.5. Construção com acompanhamento de campo	61
4.6. As Built	62
4.7. Monitoramento e manutenção	62
5. Projeto de recuperação ambiental de Rios Principais	63
5.1. Introdução	63
5.2. Premissas e Critérios de Projeto	67

5.3.	Metodologia.....	68
5.3.1.	Levantamento de campo.....	68
5.3.2.	Proposição de seções tipo	69
5.3.3.	Elaboração de projeto.....	70
5.3.3.1.	Topografia	70
5.3.3.2.	Estudos hidrológicos	70
5.3.3.2.1.	Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo.....	71
5.3.3.2.2.	Rio Doce	74
5.3.3.3.	Modelagem hidráulica.....	75
5.3.3.4.	Dimensionamento e definição dos subtipos de seção.....	76
5.3.3.5.	Dimensionamento do Enrocamento	77
5.3.3.6.	Bioengenharia	79
5.3.3.7.	Desenhos e tabela resumo.....	80
5.4.	Construção com acompanhamento de campo	81
5.5.	As Built.....	82
5.6.	Monitoramento e manutenção.....	82
6.	Dispositivos de Drenagem e Controle de Erosão.....	84
6.1.	Introdução.....	84
6.2.	Premissas e Critérios de Projeto	85
6.3.	Revegetação.....	86
6.4.	Metodologia.....	88
6.4.1.	Elaboração de projeto.....	89
6.4.1.1.	Vazões de Projeto	89
6.4.1.2.	Canais e canaletas	90
6.4.1.3.	Descidas em enrocamento.....	90
6.4.1.4.	Dissipadores de Energia.....	90
6.5.	Construção com acompanhamento de campo	91
6.6.	As Built.....	91
6.7.	Monitoramento e manutenção.....	91
7.	Referências Bibliográficas	92

TABELAS

Tabela 1: Critérios de Identificação dos Trechos de Rio.....	12
Tabela 2: Descrição dos parâmetros de trecho fluvial geomórfico.....	14
Tabela 3: Volumes estimados de rejeitos na bacia de drenagem do Córrego Santarém e em cada trecho fluvial.....	20
Tabela 4: Lista de tributários mapeados.....	27
Tabela 5: Estações pluviométricas e fluviométrica consideradas no estudo.....	36
Tabela 6: Coeficientes de desagregação para a chuva de 24 horas de duração.....	39
Tabela 7: Precipitações diárias máximas anuais da série sintética – Fazenda Água Limpa Jusante (Código ANA 2043056) e Colégio Caraça (Código ANA 2043059).....	39
Tabela 8: Altura-Duração-Frequência – Série Sintética – Fazenda Água Limpa Jusante (Código ANA 2043056) e Colégio Caraça (Código ANA 2043059).....	40
Tabela 9: Precipitações diárias máximas anuais da série histórica – Fazenda Ocidente (Código ANA 2043027).....	40
Tabela 10: Altura-Duração-Frequência – Fazenda Ocidente (Código ANA 2043027).....	41
Tabela 11: Resultados da análise de frequência da série de vazões da Estação Fazenda Ocidente (Código ANA 563370000).....	42
Tabela 12: Métodos para cálculo de vazões.....	43
Tabela 13: Vazões de projeto dos tributários.....	48
Tabela 14: Dimensionamento hidráulico das seções dos tributários.....	55
Tabela 15: Áreas prioritárias e não prioritárias listadas de montante para jusante.....	65
Tabela 16: Base topográficas utilizadas para os projetos de recuperação ambiental dos rios principais.....	70
Tabela 17: Fatores adimensionais para eventos pluviométricos extremos com duração de 1 dia.....	72
Tabela 18: Vazões extremas e adimensionais determinadas para a estação fluviométrica de Fazenda Ocidente (código ANA 56337000).....	73
Tabela 19: Vazões extremas e adimensionais determinadas para o trecho do rio do Carmo a jusante do rio Gualaxo do Norte.....	73
Tabela 20: Fatores de correção das vazões.....	74
Tabela 21: Vazões extremas e adimensionais determinadas para o rio Doce em Fazenda Cachoeira D’Antas (código ANA 56425000).....	74
Tabela 22: Vazões extremas (m³/s) no trecho compreendido entre a origem do rio Doce até a UHE Candonga.....	75
Tabela 23: Descrição e critérios para definição dos subtipos.....	76
Tabela 24: Diâmetro médio dos blocos de enrocamento adotados no projeto.....	78
Tabela 25: Lista de espécies para revegetação.....	87

FIGURAS

Figura 1: Linha do tempo das atividades relacionadas aos trabalhos de regularização de calhas e margens e controle de processos erosivos.	11
Figura 2: Picos de vazão resultantes do rompimento da barragem comparados com vazões naturais na bacia do rio Doce.....	17
Figura 3: Comparação de larguras do leito menor pré e pós-rompimento; a linha representa uma comparação 1 a 1, com limites de +-10%.	18
Figura 5: Desenho esquemático representando os tipos de materiais amostrados e analisados nos estudos geoquímicos.....	23
Figura 6: Curvas de Dupla Massa.	37
Figura 7: Variação Média Mensal da Precipitação da Série Sintética – Fazenda Água Limpa Jusante (Código ANA 2043056) e Colégio Caraça (Código ANA 2043059).	38
Figura 8: Variação Média Mensal da Precipitação da Série de Histórica – Fazenda Ocidente (código ANA 2043027).	38
Figura 9: Vazões Máximas Anuais da Série Histórica – Fazenda Ocidente (Código ANA 56337000).	42
Figura 10: Isoietas anuais médias nas bacias dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo.....	72

ANEXOS

Anexo A

- Mapa de localização (link WEBGIS)
- Shapefile

Anexo B

Desenhos Tipo – Córregos Tributários

Anexo C

Desenhos Tipo - Rios Principais

Anexo D

Desenhos Tipo - Dispositivos de drenagem e controle de erosão

Anexo E

Relatório de Recuperação de Tributários

Anexo F

Relatório de Recuperação de Rios Principais

Anexo G

Resultado 1ª-2ª Campanha Monitoramento

Anexo H

As Built

1. Introdução

Em 05 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão de propriedade da Samarco Mineração S.A. (SAMARCO). O evento liberou um volume estimado em cerca de 32 Mm³ (milhões de metros cúbicos) de rejeitos e água, que representa aproximadamente 58% de um total de 55 Mm³ de materiais contidos na barragem. Em junho de 2016, o volume de material liberado foi revisado para 43,8 Mm³, considerando os carreamentos adicionais que ocorreram posteriormente.

Durante o evento, o material liberado fluiu através do curso do córrego Santarém, atingindo na sequência o rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce. Solos, vegetação e outros materiais foram arrastados ao longo do caminho de escoamento, resultando em uma mistura de rejeitos, solos e detritos vegetais e antrópicos que foram depositados ao longo das planícies de inundação, das margens e calhas dos cursos d'água e seus tributários (afluentes).

Em março de 2016 foi assinado o Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC) entre a Samarco e seus acionistas, e entidades governamentais nos âmbitos federal e estadual de Minas Gerais e Espírito Santo. O TTAC estabeleceu as bases para criação de uma fundação privada, sem fins lucrativos, com objetivo de elaborar e executar todas as medidas previstas pelos programas socioambientais e socioeconômicos, visando tornar mais eficiente a reparação e compensação em decorrência do evento.

Nesse contexto, o programa geral de recuperação ambiental e compensação para o rompimento da barragem de Fundão foi transferido da Samarco para a Fundação Renova (Fundação).

Dentre as cláusulas do TTAC, a cláusula 160, objeto deste relatório, determina que:

“Deverá ser feita pela FUNDAÇÃO a regularização de calhas e margens e controle de processos erosivos nos Rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce no trecho a montante da UHE Risoleta Neves, a ser aprovado pelos ÓRGÃOS AMBIENTAIS, com conclusão até o último dia útil de dezembro de 2017”.

A cláusula 160 está inserida na Seção II – Restauração Florestal e Produção de Água do TTAC, mais especificamente na subseção II.1: Programa de recuperação da Área Ambiental 1¹ nos municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, incluindo biorremediação e medidas de cunho reparatório.

Apesar de ser qualificado como projeto de recuperação ambiental, o trabalho realizado no tocante à Cláusula 160, não tem a pretensão de ser completo ou suficiente para restituir o ecossistema ou a população silvestre degradada a uma condição não degradada, mesmo que

¹ Área Ambiental 1: as áreas abrangidas pela deposição de rejeitos nas calhas e margens dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, considerando os respectivos trechos de seus formadores e tributários, bem como as regiões estuarinas, costeiras e marinha na porção impactada pelo EVENTO.

diferente de sua condição original, conforme conceito de recuperação ambiental definido pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2000).

O objetivo principal das intervenções realizadas é promover a estabilização física do ambiente, que é o primeiro passo em direção à recuperação do ecossistema. É importante destacar que para o alcance deste objetivo, outras medidas fora do escopo da cláusula 160 foram implementadas, em caráter emergencial como a construção das Barreiras 1, 2, 3 e 4, definidas no escopo do Programa 24. Também para este propósito, bem como uso futuro a ser definido para cada área, foram e serão necessários estudos para intervenções adicionais a serem definidas e implementadas no âmbito do Programa de Manejo de Rejeitos (Programa 23).

Outro ponto de grande importância a ser mencionada é a cláusula 159 do TTAC que determina que a Fundação deverá recuperar 2.000 ha na Área Ambiental 1 nos municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado. A implantação destas ações se dará no prazo de 4 anos a partir da assinatura do TTAC, isto é, até março de 2020, considerando ainda 6 anos complementares para manutenção. Ou seja, o cronograma para a recuperação ambiental da área se estende muito além do prazo da cláusula 160. Também estão previstos no TTAC programas específicos de recuperação de áreas de preservação permanente – APPs (Subseção II.2), conservação da biodiversidade (Seção III) e fomento à implantação do Cadastro Ambiental Rural – CAR e respectivo Programa de Regularização Ambiental – PRA (Seção VII - Gestão e Uso Sustentável da Terra). Tais atividades e programas guardam correlação com a cláusula 160, porém não são objeto deste relatório.

O presente documento tem como objetivo apresentar as ações desenvolvidas para o cumprimento da cláusula 160, visando a regularização de margens e planícies e controle de processos erosivos nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce e tributários no trecho a montante da UHE Risoleta Neves (reservatório de Candonga). O relatório foi dividido em três volumes: relevante

- Volume I (presente documento): apresenta a fundamentação teórica, metodologia e resultados gerais do trabalho;
- Volume II: apresenta os projetos e dados específicos relacionados aos córregos tributários; e
- Volume III: apresenta os projetos e dados específicos relacionados aos cursos d'água principais.

2. Contextualização

Os trabalhos de recuperação ambiental das áreas impactadas pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão se iniciaram de maneira emergencial em fevereiro de 2016 antes da assinatura do TTAC. Foram realizadas, ainda em período chuvoso, medidas emergenciais como a revegetação com gramíneas e leguminosas sobre o rejeito exposto com objetivo de formar uma

camada vegetal de modo a minimizar erosão laminar e eólica e consequentemente reduzir o aporte de sedimentos para o curso d'água.

No período de outubro a dezembro de 2016 foram implantados dentro da antiga área do reservatório da Barragem do Fundão diques denominados Barreiras 1, 2, 3 e 4, concebidos para quebrar a energia cinética de possíveis deslocamentos que por ventura ocorressem, reduzindo o transporte por arraste do material remanescente no Vale do Fundão. Tais barreiras se mostraram eficientes na redução do volume de material carreado em direção ao Eixo 01 e ao vale de Santarém ao longo do período chuvoso 2016/2017, contribuindo para a melhoria da qualidade do efluente vertido. Outra medida implementada foi reforço e alteamento da antiga Barragem de Santarém em caráter emergencial, e posterior construção da nova Barragem de Santarém, atualmente a principal estrutura de contenção de sedimentos em operação em função do impacto advindo do rompimento de Fundão. Outras medidas de relevante importância foram a Implantação dos Diques S3 e S4 que também contribuíram significativamente na contenção do rejeito.

As medidas acima citadas estão contidas no arcabouço do Programa 24 (Implantação de sistemas de contenção dos rejeitos e tratamento in situ dos rios impactados) e estão em sintonia com as medidas implementadas na reconformação das calhas e margens descritas na Cláusula 160, objeto deste documento. A contenção do rejeito remanescente na região da Barragem de Fundão, foi condição primordial para implementação das ações de reconformação das margens e planícies.

O controle de erosão e a estabilização de cursos d'água tiveram dois componentes básicos: i) os trabalhos de revegetação inicial emergencial, e ii) as obras de estabilização de cursos d'água e controle de erosão. A revegetação inicial emergencial de 800 ha com gramíneas e leguminosas é objeto da cláusula 158 do TTAC e, portanto, não será objeto deste relatório, apesar de haver uma importante interseção deste trabalho com o controle de processos erosivos.

Por fim, as obras de estabilização de cursos d'água e controle de erosão, objeto da cláusula 160 do TTAC e do presente relatório, podem ser divididas em três vertentes:

- Projeto de recuperação ambiental de tributários (capítulo 4);
- Projeto de recuperação ambiental de rios principais (capítulo 5);
- Dispositivos de drenagem e controle de erosão (capítulo 6).

Paralelamente aos trabalhos de estabilização, foram realizados estudos dos impactos causados pelo evento, consolidados no documento “Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão” preparado em atendimento à cláusula 150 do TTAC referente ao Programa 23 (Programa de Manejo de Rejeitos). Tais estudos, em especial os estudos geomorfológicos, hidrodinâmicos e hidrossedimentológicos e a avaliação dos resultados

de investigação geoquímica e aspectos biogeoquímicos, subsidiaram a elaboração dos projetos de recuperação ambiental, bem como os Planos de Manejo de Rejeitos.

O mapa contendo os tributários e os rios principais, divididos em áreas prioritárias e não prioritárias, que foram alvo das intervenções relativas à cláusula 160 e descritas neste relatório, é apresentado no Anexo A. O mapa apresentado é uma versão “*on line*”, elaborado em plataforma Webgis de onde será possível fazer uma interação entre fotos de antes e depois das intervenções de recuperação (obs.: nem todas as áreas e tributários possuem, momentaneamente, registro fotográfico completo) bem como fotos aéreas, e os “*As built*” dos tributários, das áreas prioritárias e não prioritárias e shapes das estruturas implantadas. Importante salientar, que, por se tratar de uma plataforma “*on line*” este será objeto de atualizações constantes.

2.1. Cronologia dos eventos

Para o melhor entendimento de como ocorreu o processo relacionado às obras de regularização de calhas e margens e controle de processos erosivos, é desejável conhecer a cronologia dos eventos. Uma característica importante deste projeto é a urgência nas intervenções de modo a mitigar os impactos ambientais em curso ou iminentes. Por exemplo, enquanto expostas, as áreas com deposição de rejeitos têm potencial para causar impacto contínuo na qualidade da água dos cursos d’água (impacto em curso) como resultado de processos erosivos. Tais impactos podem ser agravados durante as estações chuvosas (impacto iminente). Considerando o porte e a complexidade das intervenções realizadas, o cronograma e o nível de conhecimento disponível representaram importantes desafios que se tornaram fatores limitantes, uma vez que concorreram com a necessidade de prover uma resposta rápida e eficaz aos impactos ambientais.

Os trabalhos executados foram inicialmente direcionados pelo Plano de Recuperação Ambiental, cuja primeira versão foi emitida em fevereiro de 2016. O plano de recuperação ambiental tem caráter dinâmico e adaptativo de modo a promover uma resposta rápida, porém em etapas sequenciais de modo que a informação obtida em cada fase fornece a base para as medidas de recuperação posteriores. O TTAC assinado em março de 2016, portanto após o início das atividades, estabeleceu as diretrizes para continuidade dos trabalhos bem como os prazos.

A linha do tempo apresentada na Figura 1 a seguir indica os principais eventos associados aos trabalhos de recuperação ambiental voltados para regularização de calhas e margens e controle de processos erosivos. Notar que o primeiro semestre de 2016 foi basicamente dedicado às ações emergenciais, incluindo as intervenções nos tributários, e aos estudos que embasaram os projetos. Em agosto foram definidos e elaborados os primeiros projetos de recuperação de rios principais, e em setembro foram iniciadas as obras. Cabe ressaltar que nessa época, a estação chuvosa de 2016/2017 era a grande preocupação por parte de todos os agentes. A realização de parte significativa das obras durante a estação chuvosa foi um desafio e um importante teste para a efetividade das intervenções realizadas.

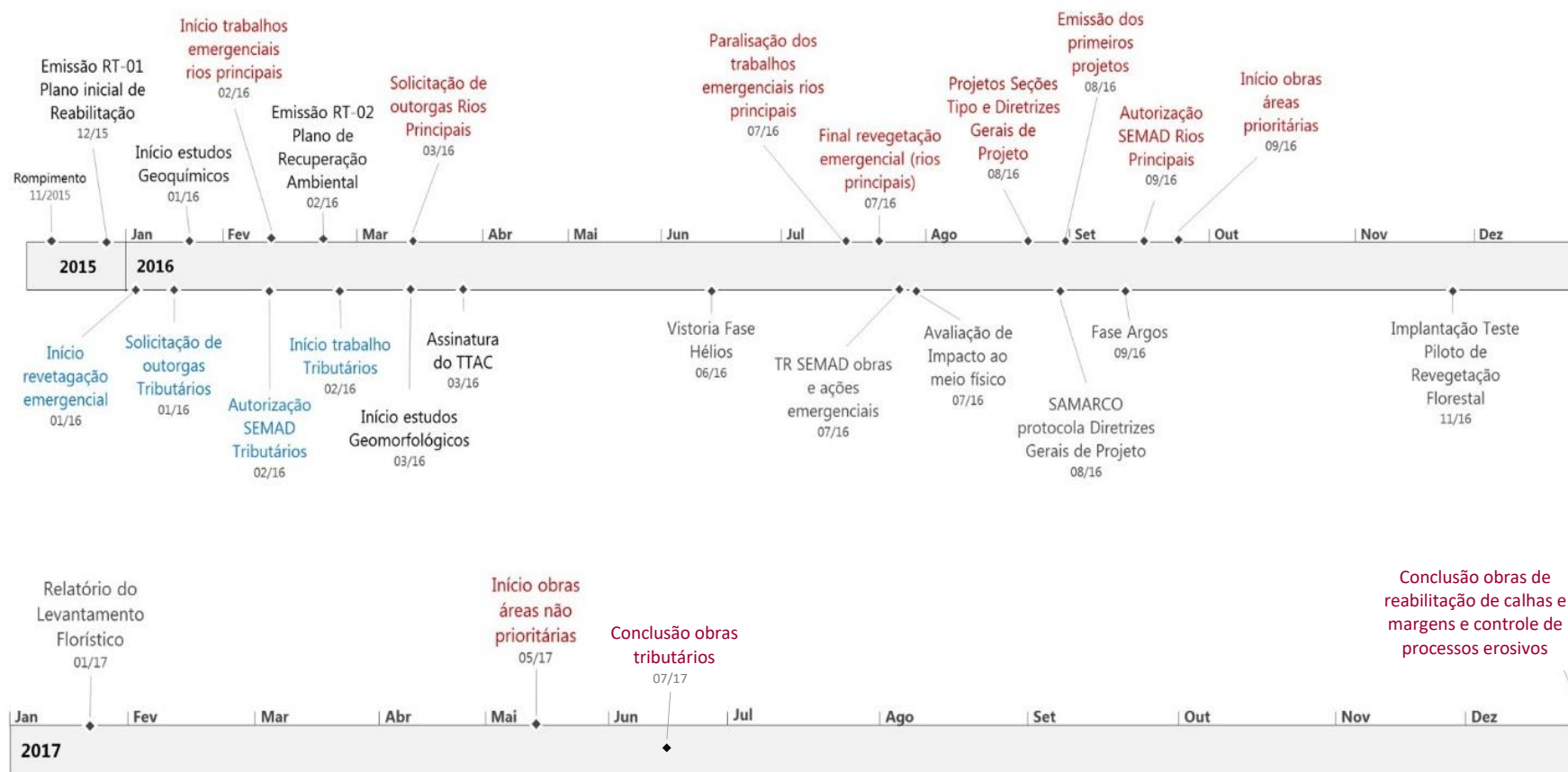


Figura 1: Linha do tempo das atividades relacionadas aos trabalhos de regularização de calhas e margens e controle de processos erosivos.

3. Fundamentação técnica

Apresenta-se a seguir um resumo da fundamentação técnica com base nas conclusões dos estudos geomorfológicos, hidrodinâmicos e hidrossedimentológicos (item 3.1) e dos estudos geoquímicos (item 3.2). Para maiores informações e detalhes sobre as metodologias e os resultados destes estudos, o relatório da “Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão” deverá ser consultado.

Cabe ressaltar que posteriormente à elaboração dos projetos de regularização de calhas e margens e controle de erosão, foi realizada uma revisão do estudo de caracterização geoquímica, “Programa de Caracterização Geoquímica de Rejeitos, Solos e Sedimentos”, com vistas a atender às solicitações do Parecer Técnico PAR. 02022.000510/2016-20 CPROD/IBAMA, emitido em outubro de 2016. Este estudo foi revisado de forma a incorporar os resultados de duas coletas adicionais realizadas no Espírito Santo, em outubro de 2017. Além disso, com base em solicitações descritas Ofício OF 02001 004880/2016-84 DBFLO/IBAMA e do Parecer Técnico PAR. 02022.000510/2016-20 CPROD/IBAMA, foi realizado o estudo denominado “Investigação de Qualidade da Água, Coloides e Sedimentos do Dique S3, Dique S4 e Rio do Carmo”, que consistiu em uma investigação da qualidade da água, material particulado, fração coloidal e sedimento, envolvendo caracterização de orgânicos e inorgânicos. Este relatório encontra-se em revisão, de forma a também incorporar resultados de coletas adicionais.

3.1. Estudos Geomorfológicos, Hidrodinâmicos e Hidrossedimentológicos

3.1.1. Geomorfologia

Como parte dos estudos geomorfológicos, foi realizada a classificação de tipos fluviais geomórficos a fim de se obter um melhor entendimento do comportamento do sistema fluvial. As principais feições geomorfológicas ao longo dos cursos d’água foram identificadas a partir de um mapeamento em escala 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 1.

Tabela 1: Critérios de Identificação dos Trechos de Rio.

Tipo de Trecho	Descrição dos Critérios
Cânion <i>Canyon</i> (CN)	Ausência de planície de inundação.
	Ausência de ilhas, bancos de sedimentos.
	Perfil longitudinal elevado, geralmente acima de 2,5%.
	O leito é composto principalmente de matacões e afloramentos de rocha que frequentemente constituem controles de declive para o rio (p.ex. cachoeiras, corredeiras).
	Encostas dos vales íngremes a escarpados, frequentemente em rocha, podendo haver

Tipo de Trecho	Descrição dos Critérios
	<p>horizontes de solos delgados e descontínuos.</p> <p>Morfologia de canal do tipo sucessão de cascatas-poços.</p>
<p>Confinado <i>Confined</i> (CF)</p>	<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 isoladas de sedimento podem ficar expostas durante períodos de vazante. • Gradientes relativamente íngremes, tipicamente acima de 0,5%; • Morfologia de canal cascata-poço ou corredeira-poço.
<p>Estreito <i>Narrow</i> (NR)</p>	<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>Estreito <i>Narrow</i> (NR)</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>
<p>Largo com pequena planície de inundação <i>Broad with small floodplain</i> (BFS)</p>	<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 é típica, 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>

Tipo de Trecho	Descrição dos Critérios
Largo com grande planície de inundação <i>Broad with large floodplain</i> (BFL)	A planície de inundação é larga e maior do que 4 vezes a largura do leito menor.
	Materiais do canal são uma mistura de cascalho e areia, com materiais grossos (cascalho) em localizações de corredeiras.
	Limitado ou nenhum controle de gradiente do canal.
	Migração de meandros é típica, e o rio ativamente migra dentro de sua planície de inundação.
	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	

A aplicação destes trechos tipo ao sistema fluvial resultou na delimitação de 38 trechos fluviais geomórficos entre a confluência do rio Gualaxo do Norte com o córrego Santarém e o reservatório de Candonga, descritos na Tabela 2. Para cada trecho fluvial, os parâmetros geomórficos foram extraídos do modelo digital de elevação LIDAR em seções transversais representativas. Os parâmetros registrados incluem a largura do leito normal, sua profundidade, a largura da planície de inundação e a declividade do canal. 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.

Tabela 2: Descrição dos parâmetros de trecho fluvial geomórfico.

Nome do Trecho	Rio	Comprimento do Trecho (km)	Área da Bacia de Drenagem (km²)	Largura do Leito Normal (m)	Profundidade do Leito Normal (m)	Largura da Planície de Inundação (m)
BFS_01	Gualaxo do Norte	1,47	170,5	28,0	0,89	66
CN_02	Gualaxo do Norte	0,91	171,5	11,5	1,69	15
CF_03	Gualaxo do Norte	3,11	185,5	21,0	1,18	27
NR_04	Gualaxo do Norte	2,23	192,5	24,0	1,14	38
CF_05	Gualaxo do Norte	4,88	201,2	20,5	1,31	27
NR_06	Gualaxo do Norte	4,57	234,9	19,5	0,56	37
CF_07	Gualaxo do Norte	2,88	240,1	22,5	1,56	32
BFS_08	Gualaxo do Norte	4,16	258,8	23,0	1,87	70
NR_09	Gualaxo do Norte	3,04	266,8	20,7	1,24	29
BFS_10	Gualaxo do Norte	5,33	280,3	22,5	2,45	61
BFL_11	Gualaxo do Norte	5,09	294,8	21,0	1,44	99
CN_12	Gualaxo do Norte	0,26	294,9	13,5	1,38	19

Nome do Trecho	Rio	Comprimento do Trecho (km)	Área da Bacia de Drenagem (km ²)	Largura do Leito Normal (m)	Profundidade do Leito Normal (m)	Largura da Planície de Inundação (m)
BFL_13	Gualaxo do Norte	1,52	302,0	24,5	2,35	96
NR_14	Gualaxo do Norte	0,26	302,1	22,0	1,53	41
BFL_15	Gualaxo do Norte	1,62	307,6	24,0	2,94	116
CF_16	Gualaxo do Norte	0,30	307,7	22,4	2,14	37
BFL_17	Gualaxo do Norte	2,94	319,5	31,5	2,14	116
NR_18	Gualaxo do Norte	0,21	319,5	23,0	2,20	32
BFL_19	Gualaxo do Norte	1,40	320,8	30,0	3,10	157
CN_20	Gualaxo do Norte	0,53	321,1	8,5	1,40	15
CF_21	Gualaxo do Norte	0,63	321,6	10,0	1,70	16
BFS_22	Gualaxo do Norte	1,71	405,4	39,0	2,30	55
NR_23	Gualaxo do Norte	0,37	405,7	19,0	1,28	42
CN_24	Gualaxo do Norte	0,75	411,9	14,0	2,90	25
NR_25	Gualaxo do Norte	0,61	412,4	25,0	1,10	48
BFS_26	Gualaxo do Norte	6,12	423,5	28,0	2,13	57
BFL_27	Gualaxo do Norte	7,41	536,2	31,0	2,11	153
CN_28	Gualaxo do Norte	0,89	536,7	50,0	2,92	61
BFS_29	Gualaxo do Norte	2,52	552,1	30,5	2,11	102
CF_30	Gualaxo do Norte	0,52	552,2	24,0	3,27	32
NR_31	Gualaxo do Norte	0,92	555,8	30,5	2,61	55
BFS_32	Gualaxo do Norte	2,54	561,7	34,0	1,96	104
BFS_BL_33	Carmo	3,77	2145,2	67,0	2,27	164
CF_34	Carmo	0,45	2145,5	71,5	1,73	103
BFS_35	Carmo	6,99	2225,3	67,0	2,26	141
CF_36	Carmo	8,51	2264,7	62,0	3,73	96
BFS_37	Carmo	5,97	2282,6	71,0	2,82	139
CF_38	Doce	6,98	8917,0	142,0	2,80	171

Conforme pode ser observado na Tabela 2, o sistema fluvial é composto por uma sequência de trechos onde predomina a deposição de sedimento, caracterizados pela presença de planície de inundação (BFS e BFL), separados por trechos onde predomina o transporte tipo cânion (CN, CF). O rio Gualaxo do Norte alterna trechos de planície aluvial, com evidências de canal sinuoso, e trechos retos não-aluviais, controlados pela geometria do vale e litologia subjacente. No início do trecho impactado, o rio Gualaxo do Norte flui através de um cânion estreito e rochoso (CN_02). Este cânion parece ter atuado como controle hidráulico e atenuado o fluxo de detritos resultante do rompimento da barragem de Fundão, uma vez que a marca da linha de lama observada nas árvores a montante do cânion é mais alta do que a jusante. O cânion também parece ser o responsável pelo remanso do fluxo de detritos no rio Gualaxo do Norte, com deposição de material em um trecho de cerca de 5 km a montante de sua confluência com o córrego Santarém.

Observou-se que a geologia do leito rochoso subjacente exerce um forte controle na forma em planta do canal do rio. Também foi observado um forte controle da geologia no perfil vertical do rio, incluindo as áreas de cânions rochosos e afloramentos do leito rochoso orientados perpendicularmente ao rio. Estes afloramentos parecem atuar como soleiras resistentes à erosão, controlando, deste modo, a elevação e declividade do leito rio e, provavelmente, exercendo controle significativo na largura e profundidade do canal.

Observações dos trechos de cânion indicaram que nestes locais houve erosão do fundo do canal até o leito rochoso, com praticamente nenhum armazenamento de rejeitos dentro do canal. À jusante dos cânions, barras de sedimentos foram observadas no meio do canal, nos trechos onde a planície de inundação se alarga novamente. É possível inferir que a presença das barras indica uma diminuição na capacidade de transporte de sedimentos local. Barras no meio do canal foram observadas em locais similares em imagens anteriores ao evento e podem não estar especificamente relacionadas ao rompimento da barragem.

3.1.2. Hidrodinâmica

A energia física do fluxo de detritos e o impacto resultante podem ser considerados em um contexto geomorfológico (JAKOB e JORDAN, 2001), onde a sua vazão volumétrica pode ser comparada às vazões normais do curso d'água. Quando a vazão do fluxo de rejeitos e materiais arrastados pelo seu escoamento excede muito as vazões que definem o tamanho e configuração do canal, é provável que o evento cause grandes alterações uma vez que o canal existente não é capaz de acomodar as vazões.

A medida que o fluxo de detritos avançou e percorreu o sistema fluvial, alguns mecanismos de atenuação do potencial de dano do fluxo passaram a atuar. As calhas dos cursos d'água foram ficando maiores devido à maior área de drenagem e a diferença entre a vazão resultante do rompimento da barragem e as vazões naturais foi diminuindo progressivamente. Os rejeitos foram sendo depositados ao longo do percurso, diminuindo a vazão de detritos. O efeito mais significativo de atenuação nas forças danosas do fluxo de detritos foi o do reservatório de Candonga que funcionou como uma bacia de sedimentação promovendo a deposição de um volume estimado de 10,5 Mm³ de rejeitos e outros sólidos.

O fluxo de material resultante da ruptura da barragem foi estimado e a vazão do evento em diferentes pontos do sistema fluvial foi comparada com vazões naturais baseando-se em períodos de retorno entre 10 e 10.000 anos (Figura 2). No córrego Santarém, o evento resultou em uma vazão de detritos que foi de 2 a 3 ordens de magnitude maior do que uma enchente decamilenar (recorrência de 1 em 10.000 anos). No segmento imediatamente a jusante do reservatório de Candonga, a vazão de detritos foi equivalente ao evento de 01 ocorrência em 200 anos, conforme medido na estação de monitoramento hidrométrico de Fazenda Cachoeira D'Antas. A jusante do reservatório de Candonga, até o reservatório da barragem de Baguari, acúmulos de sedimento também foram evidentes. Entretanto, acúmulos de sedimentos fluviais nessas áreas também eram presentes antes do rompimento da barragem, conforme evidenciado em imagens aéreas anteriores ao evento. Na próxima estação hidrométrica a jusante, Cachoeira dos Óculos,

localizada adjacente ao Parque Estadual do Rio Doce, a vazão de detritos nessa área foi equivalente a 01 evento em 02 anos, de forma que o canal pôde facilmente acomodar essas vazões, e não houve evidência de erosão ou deposição.

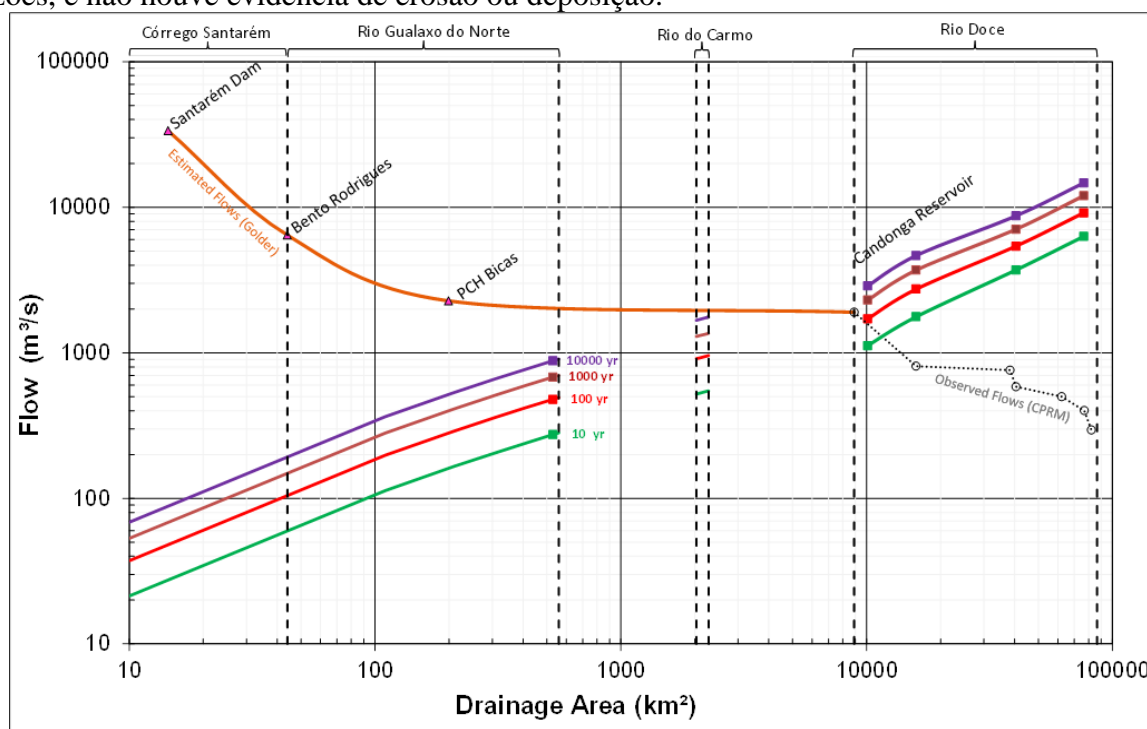


Figura 2: Picos de vazão resultantes do rompimento da barragem comparados com vazões naturais na bacia do rio Doce.

Ainda que a vazão do fluxo de detritos tenha superado as vazões naturais dos rios Gualaxo do Norte e Carmo em pelo menos uma ordem de grandeza, de maneira surpreendente o impacto na geometria do canal destes cursos d'água foi relativamente pequeno. No âmbito dos estudos geomorfológicos, foi realizada uma comparação entre a largura do leito menor do canal nas situações pré-rompimento e pós-rompimento. Para esta análise foram selecionadas 24 seções, sendo 18 no Gualaxo do Norte, 5 no Carmo e 1 no Doce. Essas localizações são representativas de todos tipos de trecho de canal observados na imagem e no campo. Vale lembrar que o foco deste estudo foi o trecho impactado entre Fundão e Candonga.

As larguras do leito menor para a situação pós-rompimento foram medidas em campo, e para a situação pré-rompimento foram obtidas a partir de imagens disponíveis do período de 2008 a 2015. A relação entre os dois conjuntos de valores mostra que a mudança na largura do leito menor do canal foi limitada ou imperceptível quando lançados em uma reta. Entretanto, considerando que a resolução das imagens pré-rompimento se situa geralmente entre 1 m e 3 m e que a largura típica do canal do rio nas seções de avaliação é de pelo menos 30 m, então é razoável considerar que as larguras pós-rompimento se encontram em uma faixa de 5% a 10% das larguras pré-rompimento. As linhas de +- 10% estão representadas no gráfico trazendo a comparação entre as larguras pré e pós rompimento (Figura 3).

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 pré-rompimento e pós-rompimento.

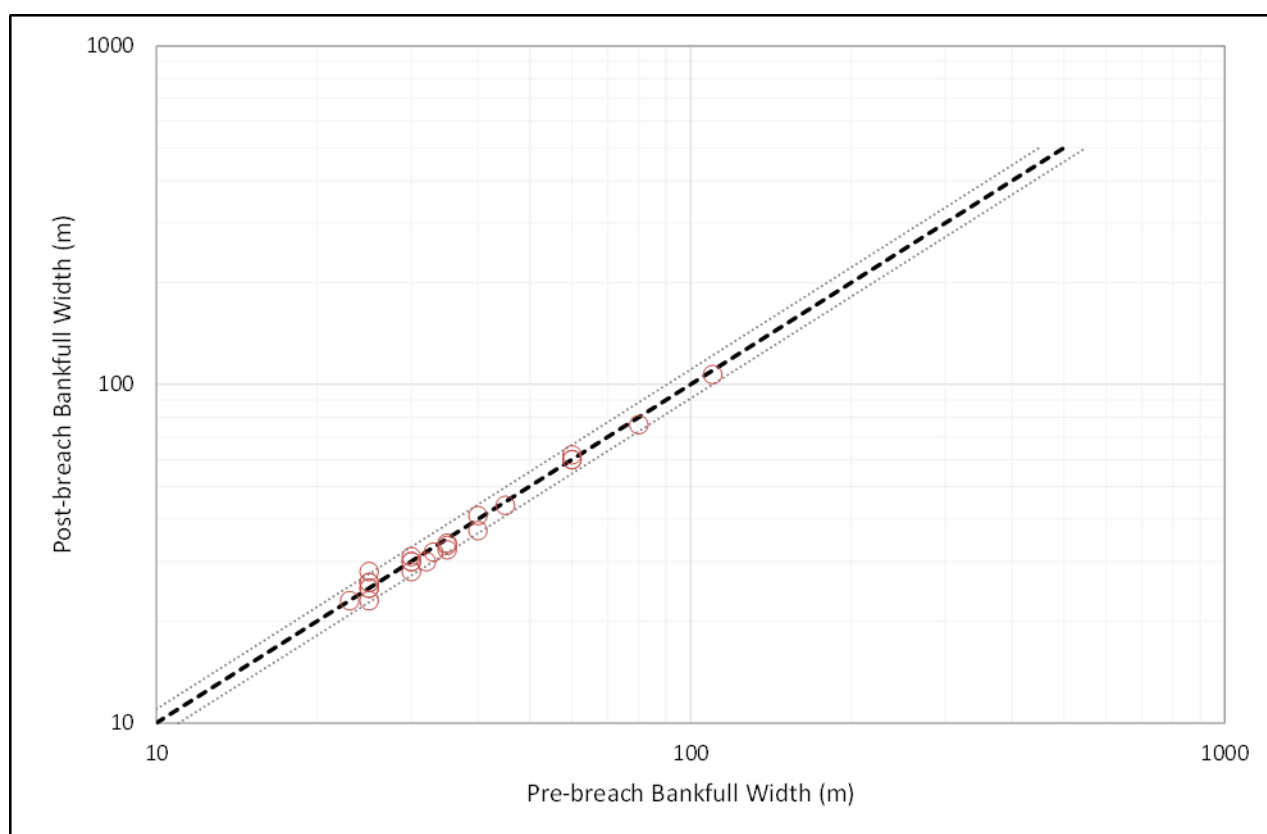


Figura 3: Comparação de larguras do leito menor pré e pós-rompimento; a linha representa uma comparação 1 a 1, com limites de $\pm 10\%$.

3.1.3. Hidrossedimentologia

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

As margens dos rios dentro da área de estudo variaram em grau de erosão ou deposição num padrão comumente observado em ambientes fluviais. Barras de sedimento (a maioria provavelmente constituída de rejeitos e solos de planície de inundação carregados pelo evento) foram observadas no interior de curvas, e bancos de cortes erosivos foram observados no exterior das curvas. Barras laterais foram observadas em segmentos de canal retilíneo, tipicamente associados a taludes, porém não a margens erodidas. As barras de sedimento existentes no rio se encontravam em locais similares ao observado em imagens anteriores ao evento e podem não estar associadas especificamente ao evento do rompimento. Taludes de margens foram também observados nos trechos de canal reto não associadas com barras laterais.

As áreas de terraço nas planícies de inundação impactadas pela deposição de rejeito são susceptíveis à erosão e apresentavam feições erosivas. Redes de drenagem compostas por sulcos e ravinas foram formadas, se estendendo dos limites da área impactada em direção ao rio. Os sulcos e ravinas formam geralmente uma rede de drenagem paralela e dendrítica, dependendo do declive e da largura da planície de inundação.

Os rejeitos parecem ter sido depositados como uma manta (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 dos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e 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.

O volume de rejeitos depositados nas planícies de inundação entre Fundão e Candonga foi estimado considerando-se o produto simples das áreas superficiais impactadas pela deposição dos rejeitos nas planícies de inundação, multiplicadas pela espessura dos rejeitos observados durante os levantamentos geomorfológicos de campo. Para a determinação da espessura da camada de rejeitos, utilizou-se três métodos:

- Método 1: valores observados nas margens durante os levantamentos de campo. Foram registrados valores mínimos, médios e máximos;
- '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;
- Método 3: espessura mínima de rejeitos observados em campo para estimar um valor mínimo.

A Tabela 3 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. Nota-se 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: Volumes estimados de rejeitos na bacia de drenagem do Córrego Santarém e em cada trecho fluvial.

Trecho	Área (ha)	Método 1 Observado margem		Método 2 Sondagem planície		Método 3 Mínimo
		Espessura (intervalo) (m)	Volume (m ³)	Espessura (m)	Volume (m ³)	Volume (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
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

Trecho	Área (ha)	Método 1 Observado margem		Método 2 Sondagem planície		Método 3 Mínimo
		Espessura (intervalo) (m)	Volume (m ³)	Espessura (m)	Volume (m ³)	Volume (m ³)
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
Volume Total			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.

Ao longo dos vales dos rios 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 nas 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.

Conceitualmente, o efeito global da revegetação de planícies de inundação afetadas, controla o escoamento superficial em áreas de depósitos de rejeitos expostos e reduz a descarga e a disponibilidade de sedimentos finos nos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce. Sedimentos finos armazenados nas áreas de planície de inundação estão sendo fixados pela recuperação da vegetação.

A estabilização dos rejeitos depositados nas margens através de uma combinação de revestimento, escavação, remoção e revegetação reduz a fonte potencial de rejeitos que podem ser reintroduzidos nos rios. A recuperação das planícies de inundação promove o armazenamento de longo prazo de rejeitos depositados nas margens e evita o carreamento de grandes volumes para os canais dos rios em caso de tempestades.

Durante inundações futuras onde o rio acessa as áreas das margens, normalmente com frequência de ocorrência de menos de 1 evento em 10 anos (e.g. 1 evento em 50 anos), existe 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.

A variação natural da vazão dos rios está transportando parte dos sedimentos finos atualmente armazenados nos canais de rios e córregos para áreas de armazenagem a jusante (p.ex., fluxo de águas lentas, como em reservatórios) durante eventos de grande descarga. Os processos hidrológicos naturais do rio gradual e eventualmente irão carrear os rejeitos acumulados nos rios e atingirão um estado de equilíbrio similar as condições pré-rompimento. Da mesma forma, os níveis de turbidez associados aos rejeitos diminuirão e serão similares aos outros rios na região.

Como resultado do rompimento da barragem de Fundão foi verificado um aumento da carga de sedimentos nos cursos d'água principais, que chegou a até sete vezes quando comparada às condições anteriores ao rompimento. Verificou-se também que os rejeitos tendem a erodir a taxas cerca de 60% maiores que o solo natural na mesma condição. Esses fatores explicam o aumento dos níveis de turbidez na água, bem como o aumento da concentração de outros parâmetros associados à presença de material em suspensão, como cor e alguns metais na forma total.

Os resultados da avaliação geomorfológica, hidrodinâmica e hidrossedimentológica confirmaram ainda que é necessária a adoção de medidas visando controlar processos erosivos em rejeitos dispostos no ambiente, e dessa forma reduzir o impacto de qualidade da água associado a sólidos em suspensão, principalmente considerando o próximo período chuvoso. Foram definidas áreas prioritárias para ações de controle de erosão, que irão requerer o manejo de rejeitos de forma localizada (vide seção 5.1). Os resultados dessa avaliação **não** indicaram a necessidade de remoção de rejeitos em larga escala, visto que ações de contenção ou estabilização devem ser suficientes para se atingir condições aceitáveis em relação à mitigação dos impactos associados a alterações morfológicas.

3.2. Estudos Geoquímicos

Após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, em 05 de novembro de 2015, foram coletadas 310 amostras para testes geoquímicos com intuito de fornecer suporte para a tomada de decisões relativas ao manejo dos rejeitos liberados. A coleta de amostras ocorreu durante a investigação de campo, entre 23 de janeiro e 12 de abril de 2016.

Quatro tipos de materiais foram amostrados e analisados nos estudos geoquímicos:

- Rejeitos: amostras de rejeitos coletadas na Barragem de Rejeitos de Germano e utilizadas como composicionalmente análogas aos rejeitos fonte depositados na Barragem de Rejeitos de Fundão. Questões de segurança impediram a coleta de amostras na barragem de rejeitos de Fundão;

- *Baseline solo e baseline sedimento*: amostras de *baseline solos* e *baseline sedimentos* não afetados pelo rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão;
- Solos e sedimentos: amostras de solos e sedimentos que foram misturados aos rejeitos como resultado do rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão;
- Amostras das Pilhas de Barra Longa: Amostras de solos e/ou sedimentos misturados a rejeitos e outros detritos os quais foram removidos da área urbana de Barra Longa e depositados em pilhas.

Figura 4 apresenta um desenho esquemático de uma seção típica de trecho fluvial impactado, identificando os tipos de materiais amostrados e analisados nos estudos geoquímicos.

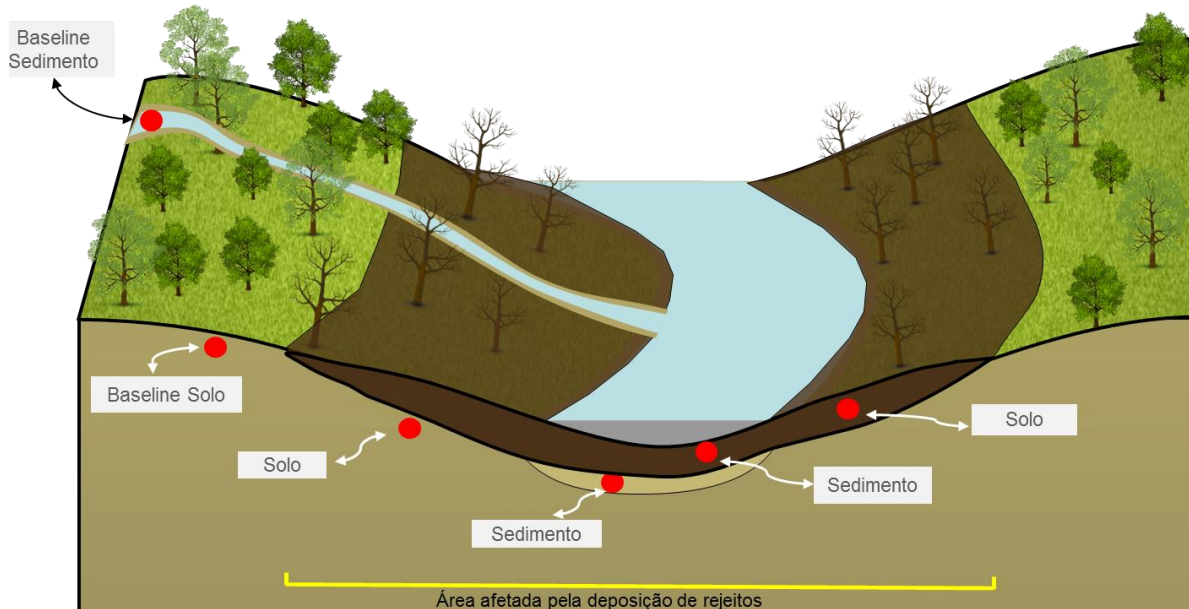


Figura 4: Desenho esquemático representando os tipos de materiais amostrados e analisados nos estudos geoquímicos.

Foram amostrados rejeitos (4 amostras), materiais sólidos coletados nas pilhas de Barra Longa (2 amostras), baseline solo (35 amostras), baseline sedimento (20 amostras) e sedimentos e solos afetados pela deposição de rejeitos (i.e., rejeitos misturados, solos e sedimentos coletados do fluxo de detritos a jusante da barragem que se rompeu – 249 amostras), totalizando 310 amostras. O programa de testes geoquímicos foi executado em duas fases.

Os objetivos do programa geoquímico Fase I foram: 1) caracterizar o rejeito fonte; 2) determinar a composição química das misturas de solo e sedimentos depositadas nas drenagens a jusante da barragem de rejeitos de Fundão; e 3) classificar os rejeitos e os solos e sedimentos em função das normas regulatórias aplicáveis a solos e sedimentos. O programa de testes da Fase I incluiu a análise de todas as amostras em termos de distribuição granulométrica, composição química e,

para um subconjunto de amostras, balanço ácido-base para determinar as características físicas e químicas do material fonte, e dos materiais afetados.

O programa Fase II visou determinar a estabilidade química (i.e., potencial de mobilização de metais a partir da fase sólida para a fase aquosa) dos rejeitos e solos e sedimentos afetados. Os resultados do programa Fase II foram utilizados para avaliar o potencial de mobilização de metais que resultassem em excedências dos padrões brasileiros de qualidade da água aplicáveis, no curto prazo (meses a anos) e no longo prazo (anos a décadas). Foram realizados testes geoquímicos em um subconjunto de 50 amostras, selecionadas com base nas características espaciais e de composição dos materiais, em função dos resultados dos testes da Fase I. O programa de análise compreendeu vários testes de lixiviação de curto prazo, incluindo testes relevantes em termos regulatórios (ABNT NBR 10.005/2004 – Lixiviação e ABNT NBR 10.006/2004 – Solubilização), testes para avaliar o potencial de mobilização de metais na água do rio e água do mar, e testes para avaliar o potencial de mobilização de metais sob diferentes condições de pH. Análises mineralógicas foram executadas para identificar os hospedeiros mineralógicos de metais em cada amostra, sendo os resultados de extração sequencial usados para confirmar a associação de metais com frações mineralógicas definidas operacionalmente e o potencial de mobilização de metais a partir destas frações. Por fim, foram iniciados testes cinéticos (i.e., testes em célula úmida e testes em coluna inundada) como parte do programa Fase II, visando determinar o potencial de mobilização de metais no longo prazo, sob condições atmosféricas e inundadas, respectivamente.

As principais conclusões do programa de caracterização geoquímica foram as seguintes:

- O estudo geoquímico foi baseado em amostras que são representativas, tanto em termos espaciais como do ponto de vista da composição², dos materiais presentes nas regiões afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão;
- Os rejeitos possuem a mais baixa reatividade dentre os materiais analisados no conjunto de dados geoquímicos, devido ao fato de que eles consistem de fases minerais insolúveis. Os rejeitos geralmente contêm as menores concentrações de metais-traço, não resultando em nenhum parâmetro excedente em relação aos padrões para solo;
- Os baseline sedimentos e solos contêm algumas das maiores concentrações de metais-traço no conjunto de dados geoquímicos. Uma maior proporção de fases minerais

² Para determinar a representatividade do conjunto de amostras de solos e sedimentos foi empregado um método visual de análise de histogramas, também conhecidos como distribuições de frequências. Estudos de frequência de distribuição de elementos em rochas e em outros meios indicam que, em muitos casos, as concentrações log-transformadas, aproximadamente, se distribuem de forma normal (Rose et al. 1979). Em outras palavras, um amplo conjunto de dados naturais, tipicamente, segue uma distribuição lognormal a qual representa a probabilidade de distribuição de fenômenos naturais mais comum. Ainda que uma avaliação formal da qualidade de ajuste da distribuição lognormal não tenha sido conduzida, quase sem exceção, os histogramas mostram distribuições que são suaves, aparentemente lognormais e não truncadas no intervalo de concentrações superiores. Essa distribuição suave indica que o conjunto de amostras de solo e de sedimentos é composicionalmente representativo dos materiais afetados no ambiente de água doce a jusante do rompimento da barragem.

solúveis encontra-se presente nos baseline sedimentos e solos, fazendo com que os materiais baseline frequentemente excedam os critérios regulatórios;

- Os solos e sedimentos afetados pela deposição de rejeitos constituem uma mistura química e fisicamente heterogênea de solos e/ou sedimentos e rejeitos, contendo elevadas concentrações de muitos metais em relação aos critérios regulatórios. As concentrações elevadas derivam do componente baseline solo/sedimento das misturas;
- A mistura do rejeito com solos e sedimentos naturais resulta em material com concentrações de metais-traço mais baixas que as verificadas nos materiais baseline para muitos casos;
- Os rejeitos, baseline solos e sedimentos, e solos e sedimentos afetados pela deposição de rejeitos são tipos de materiais para os quais algumas amostras são classificadas como Classe IIA devido ao fato de excederem o padrão de solubilização da Norma ABNT 10.004/2004 para Fe, Mn e Al;
- Os resultados de testes de lixiviação e mineralógicos confirmam a presença de fases minerais insolúveis nos rejeitos (i.e., hematita e goethita) e fases minerais mais solúveis nos solos/sedimentos (i.e., (hidr)óxidos de Fe/Mn redutíveis);
- Os resultados dos testes de lixiviação e mineralógicos confirmam o sequestro de metais-traço nas fases minerais insolúveis dos rejeitos, enquanto a proporção de metais-traço em solos e sedimentos ocorre geralmente em frações minerais mais lábeis;
- A qualidade da água do rio é controlada pelo comportamento de dissolução/sorção dos solos/sedimentos naturais; os rejeitos não contribuem para mobilização adicional de metais;
- Com base numa avaliação de triagem, a mobilização de metais a partir dos rejeitos não constitui uma preocupação do ponto de vista biogeoquímico.

4. Projeto de recuperação ambiental de Tributários

4.1. Introdução

Os córregos tributários são cursos d'água afluentes aos rios principais (córrego Santarém, rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce) por onde o fluxo de detritos sólidos e água efetivamente passou. Houve deposição de rejeitos e sedimentos nas calhas e margens dos trechos finais dos tributários, área que coincide com as planícies de inundação dos rios principais.

A recuperação de tributários se insere nas atividades emergenciais iniciadas pouco tempo depois do evento. Nesta época, embora os estudos geomorfológicos e geoquímicos ainda não tivessem sido concluídos, os primeiros levantamentos de campo e o plano de recuperação ambiental já

havia sido finalizados. Neste primeiro diagnóstico foi identificada a necessidade de recuperar os tributários. Os rejeitos e sedimentos depositados nas calhas e margens dos tributários estavam expostos, sendo continuamente erodidos e carregados para os cursos d'água principais, contribuindo para o aumento de turbidez. Logo, as intervenções previstas foram no sentido de remover o material das calhas dos tributários de modo a evitar o seu carregamento.

A característica do impacto e o porte do canal dos córregos tributários indicaram que este tipo de ação emergencial seria uma medida eficaz e eficiente de recuperação ambiental no período inicial. Isto é, seria possível minimizar o impacto na qualidade da água dos rios principais (eficácia) considerando um bom custo benefício em termos de alocação de esforço (eficiência). Isto pode ser demonstrado através de um exercício comparando o volume de rejeitos manejado na recuperação de tributários com o potencial de ganho obtido em termos de minimização no impacto da qualidade de água. A fim de simplificar as análises, o exercício leva em consideração apenas a bacia do rio Gualaxo do Norte e seus tributários. Caso fossem considerados os tributários dos rios do Carmo e Doce, os efeitos de diluição do trecho não impactado do rio do Carmo e do rio Piranga precisariam ser incorporados. O córrego Santarém também não foi considerado neste exercício uma vez que a intervenção realizada no local foi a construção de diques de sedimentação e não uma obra de reabilitação do curso d'água como nos demais tributários.

O comprimento médio do trecho impactado dos tributários do rio Gualaxo do Norte é de cerca de 300 m e as dimensões da seção de escoamento, geralmente, são da ordem de 2 m de largura de base e 1 m de altura de margem. Uma estimativa aproximada da quantidade de material manejado, considerando o volume de rejeitos dentro da calha como o produto da base do canal pela altura da margem e pelo comprimento impactado, resulta em 600 m³ de material em média por tributário. Considerando intervenção em 85 tributários, o volume de rejeitos manejado na bacia do Gualaxo do Norte é da ordem de 51.000 m³. A título de comparação, de acordo com as estimativas dos estudos geomorfológicos, o volume de rejeitos depositado nas planícies de inundação do rio Gualaxo do Norte é da ordem de 5,0 Mm³, equivalente à soma dos volumes de rejeito acumulados calculados pelo método 1 da Tabela 3 até o trecho BFS_BL_33. Ou seja, o volume de rejeitos removidos da calha dos tributários do Gualaxo do Norte (51 mil m³) corresponde a cerca de 1% do volume de rejeitos depositado nas planícies de inundação da bacia do rio Gualaxo do Norte (5,0 Mm³).

Fazendo uma comparação entre as áreas de contribuição das bacias de drenagem do rio Gualaxo do Norte e de seus afluentes, temos que a soma das áreas de drenagem dos tributários impactados (249 km²), representa 45% da área total da bacia do rio Gualaxo do Norte na sua foz junto ao Carmo (559 km²). Considerando que a vazão é proporcional a área de contribuição da bacia de drenagem, a vazão dos tributários impactados equivale à 45% da vazão do rio Gualaxo do Norte.

Concluindo o exercício, observa-se que, manejando apenas 1% do volume de rejeitos depositados, é possível afetar positivamente a qualidade da água de 45% da vazão do rio Gualaxo do Norte. Portanto, uma ação eficaz e eficiente, como mencionado anteriormente. A

efetividade das ações de recuperação ambiental de tributários pode ser demonstrada pelos bons resultados do monitoramento de qualidade de água dos tributários (item 4.7).

O material removido da calha dos tributários foi depositado em áreas impactadas pelo evento nas planícies de inundação no entorno do próprio curso d'água. Considerando que a área impactada média no entorno dos tributários é de 2,69 ha, o espalhamento do material da calha (600 m³) na planície de inundação de cada tributário resulta em uma camada de apenas 2 cm. Cabe ressaltar que, quando da concepção do projeto de recuperação ambiental de tributários, ainda não havia diretriz sobre o manejo de rejeitos determinando se deveria ser feita a remoção e disposição do material em outro local ou a estabilização in situ. Neste contexto, optou-se pela estabilização in situ de maneira temporária, até que houvesse tal definição. As áreas das planícies de inundação foram alvo de trabalhos da revegetação, seja no âmbito da revegetação inicial emergencial, seja no âmbito dos trabalhos de controle de erosão (seção 6 do presente relatório).

O projeto de recuperação ambiental de tributários envolveu basicamente: a limpeza dos cursos d'água incluindo a remoção dos rejeitos presentes na calha e a reconstrução de uma seção de escoamento adequada, incluindo a proteção de margens para evitar novos aportes de sedimentos e rejeitos aos cursos de água. Vale lembrar que o objetivo das obras de recuperação implementadas até o momento foi a estabilização física do ambiente para possibilitar etapas futuras da recuperação do ecossistema.

Mesmo tendo iniciado em uma fase emergencial, a recuperação de tributários foi embasada por estudos técnicos e realizada de acordo com projetos de engenharia específicos para cada tributário. A fim de subsidiar os projetos de recuperação, foi realizado um estudo de alternativas onde foram avaliadas diferentes técnicas de proteção de canais incluindo desde métodos baseados no uso de enrocamento (BRIGHETTI, 2001 e GOLDR ASSOCIATES, 2015) e técnicas de bioengenharia como as listadas por Li e Eddleman (2002).

A lista dos tributários mapeados com as respectivas coordenadas está apresentada na Tabela 4. O número de tributários listados totaliza 114, sendo 103 projetos, 5 tributários sem acesso (TG07, TG08, TG09, TG12 e TG12A), 5 tributários em que não são necessárias intervenções (TG17A, TG17C, TG24A, TG42A e TD04), além do TG04 que coincide com a área prioritária 4 e, por isso, teve seu projeto emitido, porém cancelado. A localização dos tributários pode ser visualizada no mapa apresentado no Anexo A.

Tabela 4: Lista de tributários mapeados.

#	Nome	Código	Coordenadas UTM de referência (Fuso 23S, datum SIRGAS 2000)	
			E (m)	N (m)
1	Tributário 01 do Rio Gualaxo do Norte	TG01	665.129	7.758.864
2	Tributário 01A do Rio Gualaxo do Norte	TG01A	664.483	7.758.512
3	Tributário 01B do Rio Gualaxo do Norte	TG01B	664.427	7.758.613
4	Tributário 02 do Rio Gualaxo do Norte	TG02	664.841	7.759.291

#	Nome	Código	Coordenadas UTM de referência (Fuso 23S, datum SIRGAS 2000)	
			E (m)	N (m)
5	Tributário 03 do Rio Gualaxo do Norte	TG03	665.541	7.759.718
6	Tributário 04 do Rio Gualaxo do Norte	TG04	666.336	7.759.034
7	Tributário 05 do Rio Gualaxo do Norte	TG05	665.677	7.760.602
8	Tributário 06 do Rio Gualaxo do Norte	TG06	666.182	7.761.358
9	Tributário 07 do Rio Gualaxo do Norte	TG07	666.718	7.760.715
10	Tributário 08 do Rio Gualaxo do Norte	TG08	667.550	7.760.370
11	Tributário 09 do Rio Gualaxo do Norte	TG09	668.765	7.761.597
12	Tributário 10 do Rio Gualaxo do Norte	TG10	669.273	7.760.107
13	Tributário 11 do Rio Gualaxo do Norte	TG11	669.586	7.759.664
14	Tributário 11A do Rio Gualaxo do Norte	TG11A	670.005	7.759.812
15	Tributário 12 do Rio Gualaxo do Norte	TG12	670.692	7.759.650
16	Tributário 12A do Rio Gualaxo do Norte	TG12A	670.726	7.759.189
17	Tributário 13 do Rio Gualaxo do Norte	TG13	671.744	7.759.786
18	Tributário 14 do Rio Gualaxo do Norte	TG14	673.192	7.761.384
19	Tributário 14A do Rio Gualaxo do Norte	TG14A	672.970	7.761.357
20	Tributário 14B do Rio Gualaxo do Norte	TG14B	673.566	7.761.324
21	Tributário 15 do Rio Gualaxo do Norte	TG15	673.950	7.760.328
22	Tributário 16 do Rio Gualaxo do Norte	TG16	674.869	7.760.589
23	Tributário 17 do Rio Gualaxo do Norte	TG17	675.051	7.760.139
24	Tributário 17A do Rio Gualaxo do Norte	TG17A	675.973	7.757.461
25	Tributário 17B do Rio Gualaxo do Norte	TG17B	676.939	7.758.354
26	Tributário 17C do Rio Gualaxo do Norte	TG17C	677.241	7.758.059
27	Tributário 17D do Rio Gualaxo do Norte	TG17D	674.849	7.759.900
28	Tributário 17E do Rio Gualaxo do Norte	TG17E	675.591	7.757.386
29	Tributário 18 do Rio Gualaxo do Norte	TG18	677.706	7.758.140
30	Tributário 19 do Rio Gualaxo do Norte	TG19	677.999	7.757.672
31	Tributário 20 do Rio Gualaxo do Norte	TG20	677.721	7.757.228
32	Tributário 20A do Rio Gualaxo do Norte	TG20A	678.108	7.756.417
33	Tributário 21 do Rio Gualaxo do Norte	TG21	678.291	7.756.151
34	Tributário 22 do Rio Gualaxo do Norte	TG22	678.959	7.755.962
35	Tributário 21A do Rio Gualaxo do Norte	TG21A	679.689	7.755.263
36	Tributário 21B do Rio Gualaxo do Norte	TG21B	679.723	7.755.157
37	Tributário 23 do Rio Gualaxo do Norte	TG23	680.923	7.755.776
38	Tributário 24 do Rio Gualaxo do Norte	TG24	681.342	7.755.196
39	Tributário 24A do Rio Gualaxo do Norte	TG24A	681.506	7.755.426
40	Tributário 25 do Rio Gualaxo do Norte	TG25	682.025	7.754.803
41	Tributário 26 do Rio Gualaxo do Norte	TG26	682.186	7.755.157

#	Nome	Código	Coordenadas UTM de referência (Fuso 23S, datum SIRGAS 2000)	
			E (m)	N (m)
42	Tributário 27 do Rio Gualaxo do Norte	TG27	682.609	7.754.948
43	Tributário 28 do Rio Gualaxo do Norte	TG28	682.352	7.754.632
44	Tributário 29 do Rio Gualaxo do Norte	TG29	682.781	7.753.741
45	Tributário 30 do Rio Gualaxo do Norte	TG30	683.689	7.753.828
46	Tributário 30A do Rio Gualaxo do Norte	TG30A	684.160	7.754.626
47	Tributário 30B do Rio Gualaxo do Norte	TG30B	684.509	7.754.556
48	Tributário 31 do Rio Gualaxo do Norte	TG31	684.854	7.753.970
49	Tributário 31A do Rio Gualaxo do Norte	TG31A	685.153	7.754.335
50	Tributário 31B do Rio Gualaxo do Norte	TG31B	685.295	7.753.547
51	Tributário 32 do Rio Gualaxo do Norte	TG32	686.202	7.753.547
52	Tributário 32A do Rio Gualaxo do Norte	TG32A	686.298	7.753.749
53	Tributário 33 do Rio Gualaxo do Norte	TG33	686.260	7.754.261
54	Tributário 34 do Rio Gualaxo do Norte	TG34	686.901	7.754.950
55	Tributário 35 do Rio Gualaxo do Norte	TG35	687.423	7.754.183
56	Tributário 36 do Rio Gualaxo do Norte	TG36	687.883	7.754.014
57	Tributário 37 do Rio Gualaxo do Norte	TG37	688.152	7.754.638
58	Tributário 37A do Rio Gualaxo do Norte	TG37A	688.299	7.754.662
59	Tributário 38 do Rio Gualaxo do Norte	TG38	688.646	7.754.390
60	Tributário 39 do Rio Gualaxo do Norte	TG39	688.852	7.754.855
61	Tributário 39A do Rio Gualaxo do Norte	TG39A	688.644	7.755.339
62	Tributário 40 do Rio Gualaxo do Norte	TG40	688.378	7.755.793
63	Tributário 40A do Rio Gualaxo do Norte	TG40A	688.528	7.755.868
64	Tributário 41 do Rio Gualaxo do Norte	TG41	688.146	7.756.153
65	Tributário 42 do Rio Gualaxo do Norte	TG42	688.097	7.757.513
66	Tributário 42A do Rio Gualaxo do Norte	TG42A	689.252	7.757.541
67	Tributário 43 do Rio Gualaxo do Norte	TG43	689.443	7.757.076
68	Tributário 44 do Rio Gualaxo do Norte	TG44	691.868	7.756.884
69	Tributário 45 do Rio Gualaxo do Norte	TG45	692.561	7.756.565
70	Tributário 46 do Rio Gualaxo do Norte	TG46	693.026	7.757.474
71	Tributário 47 do Rio Gualaxo do Norte	TG47	693.784	7.757.865
72	Tributário 47A do Rio Gualaxo do Norte	TG47A	694.557	7.758.269
73	Tributário 47B do Rio Gualaxo do Norte	TG47B	694.656	7.758.342
74	Tributário 48 do Rio Gualaxo do Norte	TG48	695.324	7.757.676
75	Tributário 49 do Rio Gualaxo do Norte	TG49	695.658	7.758.922
76	Tributário 49A do TG49	TG49A	695.711	7.758.879
77	Tributário 49B do Rio Gualaxo do Norte	TG49B	696.359	7.758.915
78	Tributário 49C do Rio Gualaxo do Norte	TG49C	696.461	7.758.905

#	Nome	Código	Coordenadas UTM de referência (Fuso 23S, datum SIRGAS 2000)	
			E (m)	N (m)
79	Tributário 49D do Rio Gualaxo do Norte	TG49D	697.571	7.758.108
80	Tributário 49E do Rio Gualaxo do Norte	TG49E	698.145	7.757.709
81	Tributário 49F do Rio Gualaxo do Norte	TG49F	699.315	7.758.190
82	Tributário 49G do Rio Gualaxo do Norte	TG49G	699.467	7.758.186
83	Tributário 50 do Rio Gualaxo do Norte	TG50	699.626	7.757.221
84	Tributário 51 do Rio Gualaxo do Norte	TG51	699.219	7.756.878
85	Tributário 52 do Rio Gualaxo do Norte	TG52	699.611	7.756.305
86	Tributário 53 do Rio Gualaxo do Norte	TG53	699.857	7.755.954
87	Tributário 53A do Rio Gualaxo do Norte	TG53A	700.596	7.756.382
88	Tributário 54 do Rio Gualaxo do Norte	TG54	700.370	7.755.751
89	Tributário 54A do Rio Gualaxo do Norte	TG54A	700.643	7.755.734
90	Tributário 54B do Rio Gualaxo do Norte	TG54B	701.171	7.756.160
91	Tributário 55 do Rio Gualaxo do Norte	TG55	701.381	7.755.860
92	Tributário 56 do Rio Gualaxo do Norte	TG56	701.800	7.756.072
93	Tributário 56B do Rio Gualaxo do Norte	TG56B	701.987	7.755.731
94	Tributário 01 do Rio do Carmo	TC01	704.841	7.756.368
95	Tributário 01A do Rio do Carmo	TC01A	703.245	7.754.988
96	Tributário 01B do Rio do Carmo	TC01B	702.752	7.755.800
97	Tributário 01C do Rio do Carmo	TC01C	703.694	7.755.870
98	Tributário 02 do Rio do Carmo	TC02	705.110	7.756.677
99	Tributário 03 do Rio do Carmo	TC03	705.913	7.755.811
100	Tributário 03A do Rio do Carmo	TC03A	706.704	7.756.239
101	Tributário 04 do Rio do Carmo	TC04	709.456	7.757.055
102	Tributário 04A do Rio do Carmo	TC04A	709.498	7.757.095
103	Tributário 05 do Rio do Carmo	TC05	709.996	7.757.180
104	Tributário 06 do Rio do Carmo	TC06	708.924	7.758.074
105	Tributário 07 do Rio do Carmo	TC07	710.582	7.759.442
106	Tributário 08 do Rio do Carmo	TC08	711.494	7.759.040
107	Tributário 08A do Rio do Carmo	TC08A	713.553	7.756.786
108	Tributário 09 do Rio do Carmo	TC09	714.199	7.757.014
109	Tributário 09A do Rio do Carmo	TC09A	715.426	7.756.834
110	Tributário 10 do Rio do Carmo	TC10	715.949	7.756.480
111	Tributário 01 do Rio Doce	TD01	717.393	7.758.610
112	Tributário 02 do Rio Doce	TD02	719.190	7.758.899
113	Tributário 03 do Rio Doce	TD03	726.244	7.764.629
114	Tributário 04 do Rio Doce	TD04	727.388	7.765.701

4.2. Premissas e critérios de Projeto

As premissas do projeto de recuperação de córregos tributários estão em consonância com as diretrizes definidas no Plano de Manejo de Rejeitos e são as seguintes:

1. Manter condições mais próximas do original (alinhamento e geomorfologia);
2. Remover rejeitos da calha sempre que viável tecnicamente; e
3. Promover calha estável.

Cabe ressaltar que nem sempre foi possível atender a todas estas premissas, porém estes casos foram a exceção e não a regra. Por exemplo, houve apenas 7 casos de mudança de alinhamento (TG03, TG20, TG29, TG30A, TG40, TG47A e TG56) em 103 projetos, geralmente associados a questões de segurança na execução da obra. Também houveram casos onde não foi possível realizar a remoção completa dos rejeitos até atingir terreno natural. Nestes casos houve revestimento total da calha do tributário de modo a isolar os rejeitos do escoamento do tributário.

O principal critério de projeto da recuperação ambiental de tributários é a utilização da vazão de projeto com 1,01 ano de tempo de retorno (Q1.01) para o dimensionamento das seções hidráulicas dos cursos d'água, nos casos onde foi feita a reconformação de calha. Essa recorrência foi selecionada pois equivale à descarga normal natural destes cursos d'água com a calha completamente cheia.

Em projetos de recuperação ambiental de cursos d'água, diversos autores utilizam o conceito de channel-forming discharge, que é a vazão que determina a dimensão da calha do curso d'água. Estes autores correlacionam esta vazão com um determinado tempo de retorno, que geralmente varia de 1 a 2 anos, podendo chegar a valores maiores (FISRWG, 2001).

No caso dos tributários afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, a adoção de vazões de projeto com tempo de retorno superior a 1,01 ano resultaria em calhas maiores do que as observadas em campo.

4.3. Metodologia

A metodologia do projeto de recuperação ambiental de tributários seguiu as etapas:

- Mapeamento inicial;
- Levantamento de campo;
- Proposição de seção de projeto;
- Elaboração do projeto;

- ✓ Estudos hidrológicos;
- ✓ Dimensionamento Hidráulico;
- ✓ Desenhos.

- Construção com acompanhamento de campo;
- *As Built*;
- Monitoramento e manutenção.

4.3.1. Mapeamento inicial

O mapeamento inicial de tributários impactados foi feito por meio de sensoriamento remoto usando ferramenta de sistema de informação geográfica (SIG). O objetivo deste mapeamento foi identificar tributários elegíveis para as obras de recuperação e os acessos a estes locais.

O SIG também foi utilizado para:

- Delimitação de áreas afetadas: informação apresentada nas plantas de projeto;
- Identificação do alinhamento original do tributário, ou seja, antes do evento;
- Cálculo das áreas de drenagem de cada tributário: informação utilizada para cálculo de vazão de projeto (vide item 4.3.4.2.3).

4.3.2. Levantamento de campo

Cada tributário foi alvo de levantamento de campo específico com objetivo de caracterizar o curso d'água e o grau de severidade dos impactos, bem como de subsidiar a proposição da seção de projeto.

Sempre que possível, foi percorrido toda a extensão impactada do tributário. O curso d'água foi dividido em trechos de acordo com as características da seção de escoamento e dos impactos observados. Geralmente o impacto nos trechos de montante foi menor do que nos trechos de jusante, ou seja, os trechos mais próximos do rio principal possuíam mais rejeito acumulado. Outra característica comum observada foi a existência de trechos com maior declividade e seções mais estreitas a montante e trechos com menor declividade e seções mais largas a jusante.

Durante os levantamentos de campo foram registradas as coordenadas do início e fim dos trechos impactados, com o auxílio de GPS. Também foram utilizadas coordenadas de campo para determinar o alinhamento in loco de cada curso d'água na situação pós evento.

O material do leito e das margens foi caracterizado por inspeção visual e tátil e foi feita uma estimativa de espessura de rejeitos/ sedimentos depositados nestes ambientes utilizando uma haste de metal com 1 m de comprimento (varejão). O objetivo desta avaliação foi basicamente identificar a presença de terreno natural, a característica do material (ex.: arenoso, argiloso, seixo rolado, afloramento rochoso) e a quantidade de rejeitos depositados.

Foram realizadas medições das dimensões dos canais em cada trecho e a montante da área impactada. Foram medidos os parâmetros: largura da base do canal, altura da lâmina d'água, altura das margens e inclinação dos taludes das margens.

Também foi feito registro fotográfico da situação de cada tributário antes das obras.

4.3.3. Proposição de seção de projeto

A recomendação do tipo de revestimento de seção é feita em função das condições observadas durante o levantamento de campo. Conforme mencionado anteriormente, foi realizado um estudo de alternativas para revestimento de canais utilizando diferentes técnicas de bioengenharia, conjugadas com enrocamento. Foram definidas 12 seções típicas para a recuperação dos tributários que foram aplicadas em função das condições de cada tributário e da severidade dos impactos. Estas opções podem ser combinadas ou ajustadas de acordo com as condições de campo. As seções típicas são apresentadas no Anexo B e descritas abaixo:

- **Opção 1 — Enrocamento – bermas:** esta opção é aplicável a áreas com grande espessura de rejeitos e sedimento, caracterizadas como aquelas mais severamente impactadas. A seção é conformada sobre manta geotêxtil, com leito em enrocamento e margens compostas por bermas de rocha;
- **Opção 2 — Enrocamento – margem e colchão:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. A seção é escavada até o solo competente e completamente revestida (base e taludes das margens) com rocha sobre manta geotêxtil. Uma pequena berma de enrocamento é construída na crista do talude para evitar o carreamento de rejeitos e sedimentos depositados na planície de inundação para dentro da calha;
- **Opção 3 — Enrocamento – margem e pé:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. É similar à opção 2, porém o enrocamento é colocado somente nos taludes das margens da seção. Uma pequena berma de enrocamento é construída na crista do talude para evitar o carreamento de rejeitos e sedimentos depositados na planície de inundação para dentro da calha;
- **Opção 4 — Enrocamento e vegetação – margem e pé:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. É similar à opção 3, mas inclui o estabelecimento de vegetação nos taludes internos das margens, junto com o enrocamento. Uma pequena berma de enrocamento é construída na crista do talude para evitar o carreamento de rejeitos e sedimentos depositados na planície de inundação para dentro da calha;

- **Opção 5 — Enrocamento e vegetação – margem e colchão:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. É similar à opção 2, mas inclui o estabelecimento de vegetação nos taludes internos das margens, junto com o enrocamento. Uma pequena berma de enrocamento é construída na crista do talude para evitar o carreamento de rejeitos e sedimentos depositados na planície de inundação para dentro da calha;
- **Opção 6 — Enrocamento e galhos – margem e pé:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. A seção é escavada até o solo competente, os pés dos taludes das margens são revestidos com enrocamento sobre manta geotêxtil e a face dos taludes são protegidas com galhadas. O carreamento de rejeitos e sedimentos para o interior da calha é limitado pela galhada que protege os taludes internos;
- **Opção 7 — Enrocamento e galhos – margem e colchão:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. É similar à opção 6, porém o enrocamento do pé do talude também é colocado sobre o leito. O carreamento de rejeitos e sedimentos para o interior da calha é limitado pela galhada que protege os taludes internos;
- **Opção 8 — Biomanta – margem e colchão:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. A seção é escavada até o solo competente e toda a parte interna (leito e margens) é revestida com biomanta. A biomanta é ancorada na crista do talude e grampeada na parte interna da margem e fundo. O carreamento de rejeitos e sedimentos para o interior da calha é limitado pela biomanta. A eficiência da contenção de sedimentos aumenta após o estabelecimento da vegetação;
- **Opção 9 — Biomanta – margem e pé:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. É similar à opção 8, porém o revestimento com biomanta ocorre apenas no talude interno da margem. A biomanta é ancorada na crista do talude e grampeada na parte interna da margem. O carreamento de rejeitos e sedimentos para o interior da calha é limitado pela biomanta. A eficiência da contenção de sedimentos aumenta após o estabelecimento da vegetação;
- **Opção 10 — Biomanta e enrocamento – margem e colchão:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. A seção é escavada até o solo competente e os taludes internos das margens são revestidos com biomanta. O leito é revestido com enrocamento sobre manta geotêxtil. O carreamento de rejeitos e sedimentos para o interior da calha é limitado pela biomanta. A eficiência da contenção de sedimentos aumenta após o estabelecimento da vegetação;
- **Opção 11 — Vegetação e tronco - margem:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. A seção é escavada até o solo competente e os taludes internos das margens são protegidos com vegetação. O pé do talude é protegido com troncos e galhos. O carreamento de rejeitos e sedimentos para o interior da calha é limitado pela vegetação das margens;

- **Opção 12 — Vegetação e rolo de fibra de coco – margem:** esta opção é recomendada para áreas com depósitos de rejeitos e sedimentos mais rasos em comparação com as áreas mais severamente impactadas. É similar à opção 11, porém o pé do talude é protegido com rolo de fibra de coco (ex.: retentor de sedimentos). O carreamento de rejeitos e sedimentos para o interior da calha é limitado pela vegetação das margens.

4.3.4. Elaboração do projeto

Após o levantamento de campo é feita a elaboração do projeto de cada tributário. O projeto consiste basicamente em dimensionar a seção de escoamento de cada trecho do tributário, indicando o revestimento recomendado a partir do levantamento de campo. A seção calculada é ajustada em função das observações e medições do levantamento de campo. Para o dimensionamento da seção de escoamento, é necessário conhecer a vazão de projeto do tributário. A determinação da vazão é feita a partir da área de contribuição da bacia de drenagem e do regime de chuvas local.

Resumidamente os passos da elaboração do projeto são:

1. Delimitação da área de contribuição da bacia de drenagem: feita através de ferramenta de SIG utilizando bases topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE);
2. Cálculo da vazão de projeto usando método definido em função da área de drenagem e utilizando chuva de projeto;
3. Definição do traçado do tributário: esta definição é feita a partir de imagens anteriores ao evento e informação de proprietários (quando disponível), e comparada com os pontos de GPS do levantamento de campo e a topografia disponível. Com o traçado e a topografia, é feita a determinação do perfil de declividade do leito para cada trecho;
4. Dimensionamento da seção: a seção é dimensionada através na equação de Manning, utilizando a vazão de projeto e topografia (declividade). Também leva em consideração dimensões observadas durante o levantamento de campo;
5. Produção dos desenhos: para cada tributário foram produzidos um par de desenhos, sendo um com planta e perfil e outro com seções típicas.

A seguir é apresentado o detalhamento da metodologia de elaboração do projeto.

4.3.4.1. Dados disponíveis

As informações topográficas utilizadas para os projetos incluem os seguintes itens:

- Levantamento topográfico a laser (LiDAR) para as áreas impactadas, realizado em, aproximadamente, fevereiro de 2016;

- Levantamentos planialtimétricos para tributários específicos, realizados pela ERG Engenharia;
- Mapa topográfico do IBGE com curvas de nível em intervalos de 20 em 20 metros;
- Mapeamento dos vetores da malha hidrográfica IBGE na escala de 1:50.000.

Foram utilizados dados de monitoramento diário de precipitação e vazão disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2016). Também foram analisados e considerados os dados diários de precipitação monitorados pela Samarco.

As informações básicas das estações pluviométricas e fluviométricas consideradas neste estudo são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Estações pluviométricas e fluviométrica consideradas no estudo.

Código ANA	Nome da Estação	Tipo	Município	Coordenadas Geográficas		Período de Dados
				Latitude S	Longitude W	
2043056	Fazenda Água Limpa Jusante	Pluviométrica	Ouro Preto	20°18'19"	43°36'59"	1984–2015
2043059	Colégio Caraça	Pluviométrica	Santa Bárbara	20°05'49"	43°29'17"	1983–2014
2043027	Fazenda Ocidente	Pluviométrica	Barra Longa	20°17'08"	43°05'56"	1967–2015
N/A	Monitoramento Local Samarco	Pluviométrica	Mariana	Desconhecido	Desconhecido	2003–2015
56337000	Fazenda Ocidente (Rio Gualaxo do Norte)	Fluviométrica	Barra Longa – área de drenagem: 529 km ²	20°16'02"	43°06'03"	1939–2014

4.3.4.2. Estudos hidrológicos

4.3.4.2.1. Pluviometria

Os estudos pluviométricos foram realizados a partir dos dados das estações regionais da ANA e do monitoramento local realizado pela Samarco.

A região de estudo foi dividida em duas áreas de acordo com as suas características pluviométricas:

- Área A: da região da Samarco até o tributário TG43, inclusive; e
- Área B: a partir do tributário TG44, inclusive, e todos os demais tributários a jusante.

Área A

Após uma análise dos dados de precipitação das estações Fazenda Água Limpa Jusante e Colégio Caraça (Tabela 5), curvas de dupla massa foram traçadas para comparar as acumulações de precipitação a longo termo. Para a criação das curvas de dupla massa outras estações pluviométricas foram utilizadas para obter as alturas médias regionais. Além disso, uma série sintética de dados foi criada utilizando os valores médios entre as estações Fazenda Água Limpa Jusante (código ANA 2043056) e Colégio Caraça (código ANA 2043059).

As curvas de dupla massa para a precipitação acumulada da estação alvo plotada versus a precipitação média regional acumulada são apresentadas na Figura 5, com exceção da estação local Samarco para a qual somente a precipitação acumulada é representada graficamente.

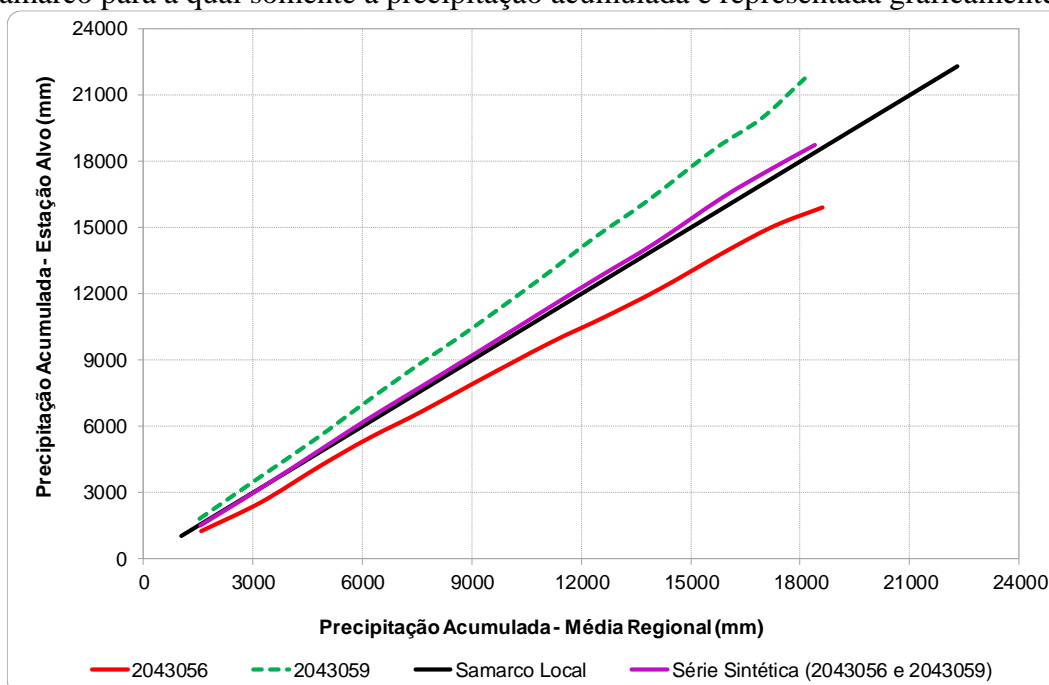


Figura 5: Curvas de Dupla Massa.

Considerando a similaridade entre os dados sintéticos e o monitoramento de dados locais pela Samarco, o regime de chuvas da Área A pode ser bem representado pelos valores médios entre as estações Fazenda Água Limpa Jusante e Colégio Caraça.

A precipitação média anual para a Área A é de 1.676 mm, enquanto que as alturas médias mensais são apresentadas na Figura 6.

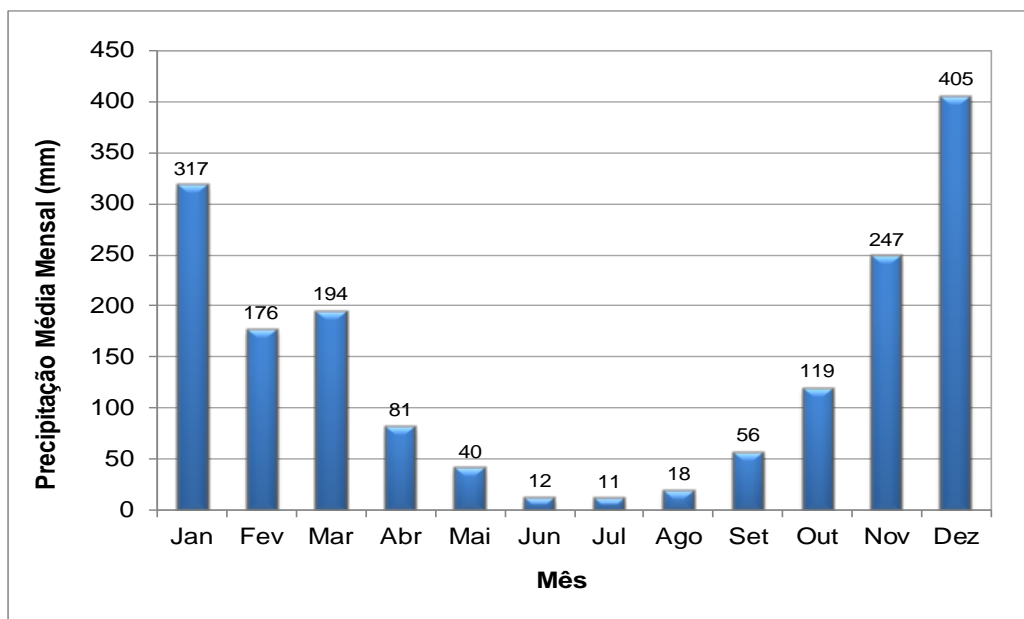


Figura 6: Variação Média Mensal da Precipitação da Série Sintética – Fazenda Água Limpa Jusante (Código ANA 2043056) e Colégio Caraça (Código ANA 2043059).

Área B

Considera-se a estação Fazenda Ocidente (código ANA 2043027) como representativa do regime de chuvas da Área B. As alturas médias mensais de precipitação para a estação Fazenda Ocidente estão apresentadas na Figura 7.

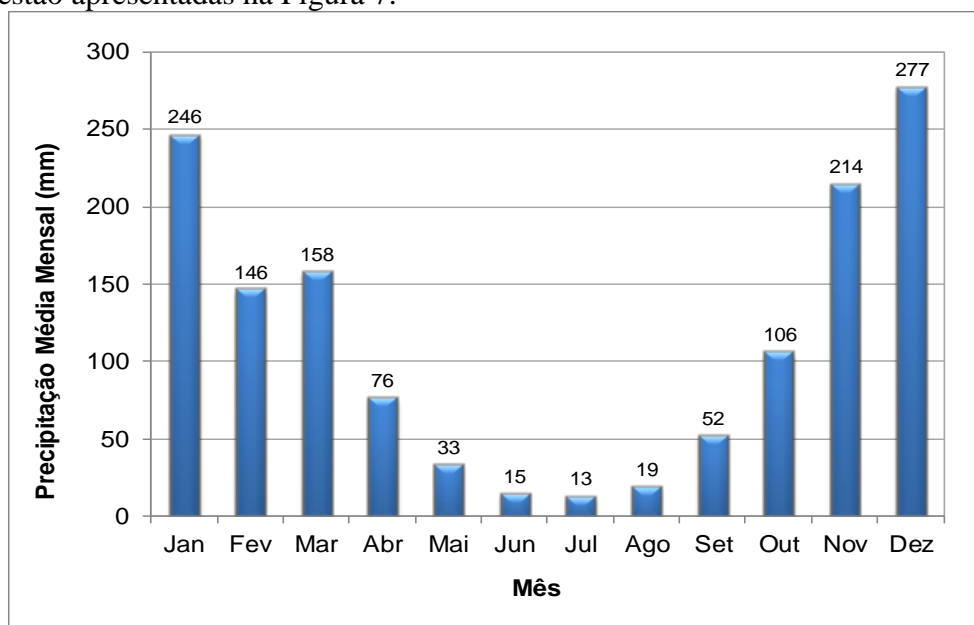


Figura 7: Variação Média Mensal da Precipitação da Série de Histórica – Fazenda Ocidente (código ANA 2043027)

4.3.4.2.2. Chuva de Projeto

As alturas de chuva de projeto foram obtidas a partir de uma análise da frequência das precipitações diárias máximas anuais para as séries históricas selecionadas. O ano hidrológico da região de estudo (1º de outubro de um determinado ano a 30 de setembro do ano consecutivo) foi considerado para determinar a precipitação máxima anual.

A análise da frequência das séries de máximos anuais foi realizada utilizando o software ALEA (Análise de Frequência Local de Eventos Anuais) desenvolvido por Lima e Naghettini (2016).

Para calcular o evento máximo de chuva de 24 horas os valores de precipitação de um (1) dia de duração foram multiplicados por um fator de ajuste fixo igual a 1,14, conforme recomendado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1986).

O coeficiente de desagregação (C₂₄) sugerido por Silveira (2000) foi utilizado para transformar a altura de precipitação de 24 horas em eventos com durações inferiores para todos os períodos de retorno. A Tabela 6 apresenta os coeficientes de desagregação de acordo com a duração do evento.

Tabela 6: Coeficientes de desagregação para a chuva de 24 horas de duração.

Duração	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	14 h
C ₂₄	0,10	0,17	0,22	0,26	0,29	0,31	0,42	0,53	0,65	0,72	0,77	0,82	0,85	0,88

Área A

A Tabela 7 apresenta a série de precipitações diárias máximas anuais considerada para a análise de frequência da Área A.

Tabela 7: Precipitações diárias máximas anuais da série sintética – Fazenda Água Limpa Jusante (Código ANA 2043056) e Colégio Caraça (Código ANA 2043059).

Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)	Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)	Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)	Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)
1982–1983	136	1990–1991	79,7	1998–1999	47,8	2006–2007	51,8
1983–1984	90,0	1991–1992	113	1999–2000	90,2	2007–2008	81,6
1984–1985	83,4	1992–1993	129	2000–2001	82,5	2008–2009	112
1985–1986	136	1993–1994	79,0	2001–2002	71,3	2009–2010	66,6
1986–1987	70,0	1994–1995	103	2002–2003	99,3	2010–2011	81,4
1987–1988	74,1	1995–1996	125	2003–2004	79,8	2011–2012	121
1988–1989	50,2	1996–1997	120	2004–2005	69,0	2012–2013	52,8
1989–1990	96,2	1997–1998	56,2	2005–2006	66,0	2013–2014	62,5

A distribuição de Gumbel, uma distribuição de probabilidade normalmente utilizada para modelar os máximos de um conjunto de dados, foi escolhida por apresentar um bom ajuste à amostra de dados. O método de momentos foi adotado, e o valor p - valor obtido para o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (CHAKRAVATI et al., 1967) foi igual a 0,88.

A Tabela 8 apresenta o resultado da análise de frequência para a Área A em termos das alturas de precipitação associadas a diferentes tempos de retorno e durações até 24 horas.

Tabela 8: Altura-Duração-Frequência – Série Sintética – Fazenda Água Limpa Jusante (Código ANA 2043056) e Colégio Caraça (Código ANA 2043059).

Duração	Altura de Precipitação (mm)										
	Tempo de Retorno (anos)										
	1,01	2,33	5	10	50	100	200	500	1.000	5.000	10.000
5 min	5,10	10,1	12,2	14,0	17,9	19,5	21,2	23,3	25,0	28,8	30,4
10 min	8,76	17,3	21,0	24,0	30,7	33,5	36,3	40,1	42,9	49,4	52,2
15 min	11,2	22,1	26,8	30,7	39,2	42,8	46,4	51,2	54,7	63,1	66,6
20 min	13,0	25,7	31,2	35,8	45,7	49,9	54,1	59,6	63,7	73,4	77,6
25 min	14,5	28,6	34,8	39,8	50,9	55,6	60,3	66,4	71,0	81,8	86,5
30 min	15,8	31,1	37,8	43,3	55,3	60,4	65,5	72,2	77,2	88,9	94,0
1 h	20,9	41,2	50,1	57,3	73,2	79,9	86,6	95,5	102	118	124
2 h	26,4	52,1	63,4	72,5	92,7	101	110	121	129	149	157
4 h	32,4	63,9	77,7	89,0	114	124	135	148	159	183	193
6 h	36,1	71,2	86,6	99,1	127	138	150	165	177	204	215
8 h	38,8	76,5	93,0	107	136	149	161	177	190	219	231
10 h	40,9	80,8	98,2	112	144	157	170	187	200	231	249
12 h	42,7	84,2	102	117	150	164	177	195	209	241	254
14 h	44,2	87,2	106	121	155	169	184	202	216	249	263
24 h	50,1	98,9	120	138	176	192	208	229	245	283	299

Área B

A Tabela 9 apresenta a série de precipitações diárias máximas anuais considerada para a análise de frequência da Área B.

Tabela 9: Precipitações diárias máximas anuais da série histórica – Fazenda Ocidente (Código ANA 2043027).

Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)	Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)	Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)	Ano Hidrológico	Precip. Anual Máxima (mm)
1968–1969	38,8	1980–1981	60,6	1992–1993	78,8	2004–2005	58,5
1969–1970	81,8	1981–1982	154	1993–1994	78,9	2005–2006	61,5

1970–1971	81,7	1982–1983	68,0	1994–1995	72,1	2006–2007	57,7
1971–1972	83,7	1983–1984	53,0	1995–1996	85,9	2007–2008	55,9
1972–1973	68,7	1984–1985	73,0	1996–1997	95,5	2008–2009	67,2
1973–1974	85,6	1985–1986	44,0	1997–1998	63,5	2009–2010	62,6
1974–1975	70,8	1986–1987	150,0	1998–1999	95,7	2010–2011	66,1
1975–1976	67,8	1987–1988	69,4	1999–2000	85,2	2011–2012	88,1
1976–1977	73,6	1988–1989	45,0	2000–2001	87,7	2012–2013	51,9
1977–1978	55,8	1989–1990	51,3	2001–2002	88,9	2013–2014	96,2
1978–1979	120	1990–1991	53,5	2002–2003	73,1	2014–2015	69,4
1979–1980	70,0	1991–1992	78,2	2003–2004	144		

A distribuição de Gumbel foi selecionada. O método de momentos foi adotado e o valor p - valor obtido para o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (CHAKRAVATI et al., 1967) foi igual a 0,66.

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise de frequência para a Área B em termos das alturas de precipitação associadas a diferentes tempos de retorno e durações até 24 horas.

Tabela 10: Altura-Duração-Frequência – Fazenda Ocidente (Código ANA 2043027).

Duração	Altura de Precipitação (mm)										
	Tempo de Retorno (anos)										
	1,01	2,33	5	10	50	100	200	500	1.000	5.000	10.000
5 min	4,10	8,8	10,9	12,6	16,3	17,9	19,5	21,5	23,1	26,7	28,3
10 min	7,03	15,2	18,8	21,7	28,0	30,8	33,4	37,0	39,7	45,9	48,6
15 min	8,98	19,4	24,0	27,7	35,8	39,3	42,7	47,2	50,7	58,6	62,1
20 min	10,5	22,6	27,9	32,2	41,7	45,7	49,7	55,0	59,0	68,3	72,3
25 min	11,7	25,2	31,1	35,9	46,5	51,0	55,4	61,3	65,8	76,1	80,5
30 min	12,7	27,4	33,8	39,0	50,5	55,4	60,2	66,6	71,5	82,7	87,5
1 h	16,8	36,2	44,7	51,6	66,8	73,3	79,7	88,2	94,6	109	116
2 h	21,2	45,8	56,6	65,3	84,6	92,8	101	112	120	139	147
4 h	26,0	56,2	69,4	80,1	104	114	124	137	147	170	180
6 h	29,0	62,6	77,3	89,2	116	127	138	152	164	189	200
8 h	31,1	67,3	83,1	95,9	124	136	148	164	176	203	215
10 h	32,9	71,0	87,6	101	131	144	156	173	185	215	227
12 h	34,3	74,1	91,4	106	137	150	163	180	193	224	237
14 h	35,5	76,7	94,7	109	142	155	169	187	200	232	245
24 h	40,2	86,9	107	124	161	176	191	212	227	263	278

4.3.4.2.3. Fluviometria

A análise de frequência para as vazões máximas anuais registradas na estação fluviométrica Fazenda Ocidente (Tabela 5) foi realizada através do software ALEA (LIMA e NAGHETTINI, 2016). O ano hidrológico (1º de outubro de um determinado ano a 30 de setembro do ano consecutivo) foi considerado para determinar as vazões máximas anuais apresentadas na Figura 8.

Entre as distribuições estudadas, a distribuição de Gumbel foi selecionada. Os resultados da análise de frequência para a estação Fazenda Ocidente são apresentados na Tabela 11.

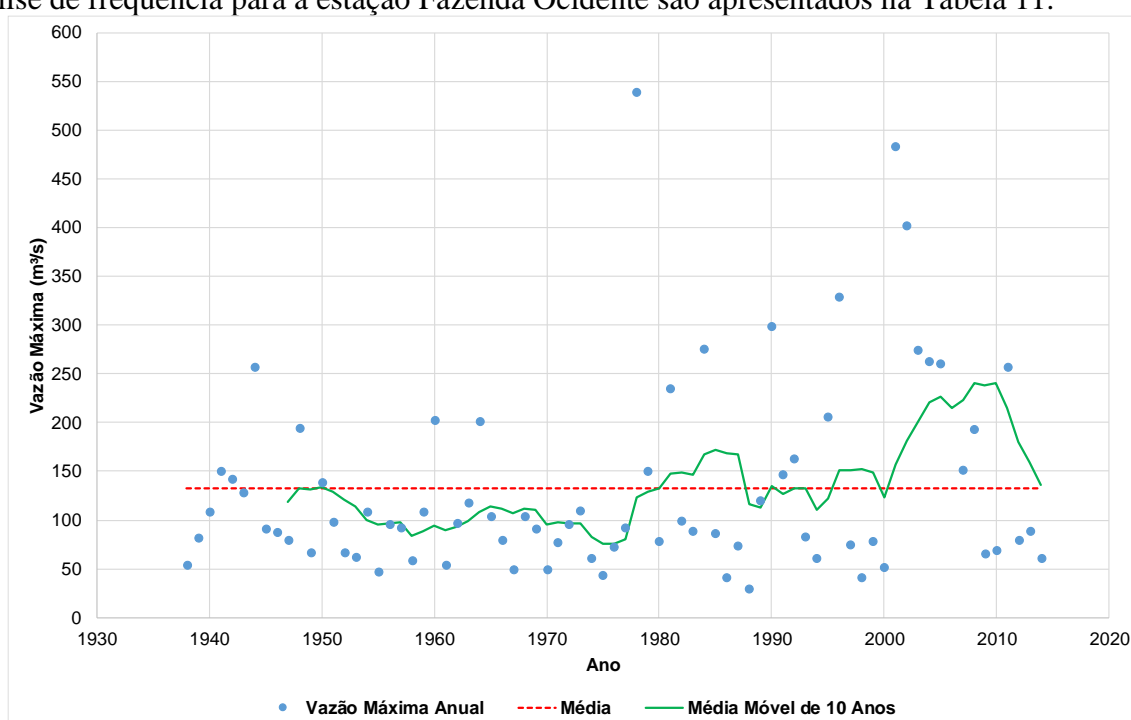


Figura 8: Vazões Máximas Anuais da Série Histórica – Fazenda Ocidente (Código ANA 56337000).

Tabela 11: Resultados da análise de frequência da série de vazões da Estação Fazenda Ocidente (Código ANA 563370000).

Tempo de Retorno (anos)	Vazão (m ³ /s)
1,01	30,3 ^(a)
2,33	132
5	196
10	249
25	315
50	364
100	412

Tempo de Retorno (anos)	Vazão (m³/s)
200	461
1,000	573
2,000	621
10,000	734

a) Para o período de retorno de 1,01 ano foi adotado o menor valor de vazão da série de máximos anuais, que corresponde ao mesmo período de retorno considerando a probabilidade empírica. O tempo de retorno de 1,01 ano apresenta uma probabilidade de excedência de $1/1,01 = 0,99\%$.

As vazões de projeto foram calculadas por meio de diferentes metodologias conforme o tamanho da área de drenagem da bacia do tributário. A Tabela 12 resume os métodos e premissas que foram adotadas para estes cálculos.

Tabela 12: Métodos para cálculo de vazões.

Método	Tamanho da Área de Drenagem	Premissas
Método Racional	Menor que 1 km ²	<ul style="list-style-type: none"> Método Racional: $Q = \frac{C.I.A}{3,6}$ <p>Onde: Q é a vazão de pico (m³/s); C é o coeficiente de escoamento superficial (coeficiente de runoff); I é a intensidade de precipitação (mm/h); A é a área de drenagem (km²).</p> Foi adotado um coeficiente de escoamento superficial (c) igual a 0,4 (CHOW et al., 1988). Considerando um valor médio aproximado entre 2 e 100 anos de período de retorno para áreas cultivadas com declividade média entre 2% e 7%. A intensidade de precipitação pode ser estimada com base nos quantis de altura-duração-frequência apresentados na Tabela 8 e na Tabela 10
Método Racional modificado	1 km ² a 10 km ²	<ul style="list-style-type: none"> Igual ao método racional, com um coeficiente de retardo sugerido por Pinheiro (2011): $Q_{MR} = Q_R \times \frac{1}{\sqrt[n]{A}}$ <p>Onde: Q_{MR} = Vazão do método Racional modificado (m³/s)</p>

Método	Tamanho da Área de Drenagem	Premissas
		<p>Q_R = Vazão do método Racional (m^3/s) n = Variação de 4 a 6 dependendo da declividade do talvegue principal. Para todos os casos foi considerado $n=4$ (declividades até 0,5%), uma vez que estas declividades não foram levantadas A = área de drenagem (km^2)</p>
Método NRCS por meio do programa HEC-HMS	10 km^2 a 70 km^2	<ul style="list-style-type: none"> • Determinação da precipitação efetiva e transformação da chuva em vazão utilizando o método do Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1986). • A discretização dos quantis foi realizada conforme as curvas adimensionais propostas por Huff (1967). • O tempo de concentração foi calculado utilizando equações cinemáticas básicas da física com velocidade estabelecida a partir da Figura 15-4 "Velocidade versus declividade para fluxo concentrado superficial" na Parte 630 de Hidrologia do National Engineering Handbook do Natural Resources Conservation Service (NRCS, 2010). Duas velocidades médias de referência foram utilizadas em todos os cálculos: 0,8 m/s para as áreas naturais (plantações em fileiras retas e 7% de declividade) e 1,2 m/s para escoamentos concentrados (entre caminhos d'água gramados e pavimento e pequenas erosões remontantes). $Tc = \frac{L}{v \times 60}$ <p>Onde: Tc = Tempo de concentração (min) L = Comprimento do talvegue considerado (m) v = Velocidade média (m/s)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Os valores de Curve Number (CN) para condição antecedente de umidade do solo classificada como úmida (CN classe III) apresentados abaixo foram considerados de acordo com o percentual de cada área de cobertura na bacia de drenagem (NRCS, 1986). <ul style="list-style-type: none"> ✓ 93 para áreas urbanas ✓ 84 para áreas de mineração ✓ 78 para pastagens ✓ 70 para áreas de florestas • As simulações hidrológicas foram realizadas por meio do programa HEC-HMS do United States Army Corps of Engineers (USACE, 2001).

Método	Tamanho da Área de Drenagem	Premissas
Regionalização a partir da estação Fazenda Ocidente	Acima de 70 km ²	<ul style="list-style-type: none"> Transferência de vazão por área de drenagem, utilizando as vazões estatisticamente calculadas a partir dos dados diários da estação de monitoramento fluviométrico Fazenda Ocidente (Tabela 7). Um coeficiente c para transformar a vazão média máxima diária (Q_d) em vazão de pico diária (Q_p) sugerido por Tucci (2002) também foi considerado. $Q_1 = Q_2 \times \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \times c$ <p>Onde Q_1 = Vazão de interesse Q_2 = Vazão de referência A_1 = Área de drenagem de interesse A_2 = Área de drenagem de referência</p> $c = \frac{Q_p}{Q_d} = 1 + 15.03 \times A^{-0.59}$ <p>Onde A = Área de drenagem do tributário (km²)</p>

Nota: Todas as premissas foram feitas o mais simples possível considerando a urgência da necessidade de informações sobre vazões e os poucos dados disponíveis no momento dos cálculos.

A seção hidráulica da calha principal dos tributários foi dimensionada para uma vazão de projeto com 1,01 ano de tempo de retorno ($Q_{1.01}$). Essa recorrência foi selecionada pois foi verificado em campo que, geralmente, equivale à descarga normal natural com a calha completamente cheia.

4.3.4.3. Dimensionamento Hidráulico

Em alguns tributários é possível identificar a seção original de escoamento, mesmo após o impacto. Isto é mais comum nos tributários de maior vazão e declividade, onde o próprio escoamento foi capaz de carrear o material depositado pelo evento para os cursos de água principais. Nestes casos, optou-se por manter a seção de escoamento original, aplicando-se as proteções, onde necessário.

Nos tributários onde a calha foi mais severamente impactada ou se encontra completamente preenchida com rejeito, não foi possível identificar a seção original de escoamento. Nestes casos são necessárias a remoção do material através de escavação e a conformação da seção.

Nos casos onde houve conformação da seção, o dimensionamento hidráulico da seção transversal dos tributários foi realizado por meio da aplicação da equação de Manning, admitindo o regime de escoamento uniforme:

$$Q(h) = \frac{1}{n} \cdot A(h)^{\frac{5}{3}} \cdot P(h)^{-\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (I)$$

Onde:

- Q (h) = vazão, em m³/s;
- A (h) = Área da seção transversal do escoamento, em m²;
- P (h) = Perímetro molhado, em m;
- n = coeficiente de rugosidade de Manning;
- S = declividade da linha d'água, em m/m.

O coeficiente de Manning foi adotado igual a 0,04, tendo em vista as opções de revestimento em rocha, bioengenharia ou terreno natural, conforme apresentado no item 4.3.3. O valor adotado está de acordo com as recomendações para canais naturais com largura inferior à 30 m propostas por Chow (1959).

Considera-se que a declividade da linha d'água é equivalente à declividade da calha, determinada a partir da base topográfica disponível para cada tributário.

Foi adotada a geometria trapezoidal para o dimensionamento das seções. A partir da definição das dimensões da largura da base do canal (b) e altura da lâmina d'água (h), calcula-se a área (A) e o perímetro molhado (P), e determina-se a vazão que aquela seção é capaz de comportar. Esta vazão deve ser maior ou igual à vazão de projeto com 1,01 ano de tempo de retorno (Q_{1.01}).

As dimensões da seção (b e h) foram definidas de acordo com as medições da seção do tributário feitas em campo. Foram tiradas medidas na área impactada e no trecho a montante da mesma. Deste modo, buscou-se manter a geomorfologia da seção o mais próximo do original.

4.3.4.4. Desenhos

Os desenhos são a representação física dos resultados do projeto de recuperação dos tributários. Para cada tributário foram produzidos dois desenhos:

- Planta e Perfil: apresenta a topografia local indicando o traçado do tributário, os limites de cada trecho e a área impactada. Também indica os acessos e as estruturas de drenagem, como canaletas, descidas e bueiros;
- Seções: apresenta as seções típicas indicadas em cada trecho com as respectivas dimensões.

O nível de detalhe dos desenhos emitidos equivale a um projeto básico de engenharia, uma vez que faz uso de seções típicas. Considerou-se que este nível de detalhe é adequado ao projeto de recuperação dos tributários uma vez que se trata de uma obra de recuperação ambiental e do caráter emergencial do trabalho.

Nesse contexto, alguma variação nas dimensões de projeto é permitida para refletir as condições de campo. Considera-se até que estas variações são positivas, uma vez que conferem um resultado mais natural à obra de recuperação. Raramente os canais naturais apresentam uma seção completamente uniforme por trechos muito extensos. As variações em relação ao projeto são registradas nos desenhos *As Built*.

4.4. Resultados

As tabelas a seguir apresentam os resultados da aplicação da metodologia utilizada no projeto de recuperação ambiental dos tributários, descrita anteriormente. A Tabela 13 apresenta os principais parâmetros hidrológicos e as vazões de projeto determinadas para cada tributário cujo projeto de recuperação ambiental foi desenvolvido. A síntese das principais informações referentes ao dimensionamento hidráulico, incluindo as seções de cada tributário, está apresentada na Tabela 14. Ressalta-se que diversos tributários foram divididos em trechos conforme suas características distintas de declividade média, soluções distintas de revestimento conforme as condições observadas em campo, vazões de projeto, dentre outras.

Tabela 13: Vazões de projeto dos tributários.

Tributário	Chuva de Projeto Adotada¹	Área de Drenagem (km²)	Tempo de Concentração (min)²	C (Método Racional) /CN (NRCS)	Intensidade³ (mm/h)	Método Adotado	Vazão TR=1,01 (m³/s)
TG01	PLU I	0,45	15,9	0,40	43,7	Racional	2,17
TG01A	PLU I	0,76	36,3	0,40	29,3	Racional	2,46
TG01B	PLU I	0,92	28,0	0,40	32,9	Racional	3,38
TG02	PLU I	1,50	36,4	0,40	29,3	Racional Modificado	4,41
TG03	PLU I	0,32	18,5	0,40	40,8	Racional	1,46
TG05	PLU I	0,51	22,4	0,40	37,1	Racional	2,09
TG06 – Montante TG06.I	PLU I	0,69	29,5	0,40	31,9	Racional	2,46
TG06 – Jusante TG06.I	PLU I	0,96	32,2	0,40	30,8	Racional	3,30
TG06.I	PLU I	0,21	15,1	0,40	44,6	Racional	1,05
TG10	PLU I	0,80	28,7	0,40	32,4	Racional	2,88
TG11	PLU I	4,54	56,0	0,40	22,3	Racional Modificado	7,71
TG11A	PLU I	0,20	24,9	0,40	34,9	Racional	0,79
TG13	PLU I	0,83	23,9	0,40	35,8	Racional	3,31
TG14	PLU I	9,16	92,7	0,40	16,7	Racional Modificado	9,77
TG14A	PLU I	5,72	72,0	0,40	19,3	Racional Modificado	7,95
TG14B	PLU I	0,57	28,6	0,40	32,5	Racional	2,07
TG15	PLU I	3,00	49,1	0,40	24,8	Racional	6,28

Tributário	Chuva de Projeto Adotada ¹	Área de Drenagem (km ²)	Tempo de Concentração (min) ²	C (Método Racional) /CN (NRCS)	Intensidade ³ (mm/h)	Método Adotado	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)
						Modificado	
TG16	PLU I	11,25	85,9	77	-	NRCS	4,06
TG17	PLU I	1,03	27,4	0,40	33,3	Racional Modificado	3,77
TG17B	PLU I	3,34	53,5	0,40	23,2	Racional Modificado	6,37
TG17D	PLU I	0,66	23,9	0,40	35,8	Racional	2,62
TG17E	PLU I	0,28	15,5	0,40	44,2	Racional	1,37
TG18	PLU I	6,50	58,0	0,40	21,6	Racional Modificado	9,77
TG19	PLU I	0,76	25,9	0,40	34,3	Racional	2,91
TG20	PLU I	4,24	90,7	0,40	17,0	Racional Modificado	5,57
TG20A	PLU I	0,28	19,4	0,40	39,8	Racional	1,24
TG21	PLU I	2,12	44,5	0,40	26,40	Racional Modificado	5,16
TG21A	PLU I	0,70	30,5	0,40	31,4	Racional	2,44
TG21B	PLU I	0,22	14,2	0,40	46,0	Racional	1,13
TG22	PLU I	1,36	29,6	0,40	31,8	Racional Modificado	4,45
TG23	PLU I	0,66	19,7	0,40	39,4	Racional	2,91
TG24	PLU I	3,36	53,6	0,40	23,2	Racional Modificado	6,39
TG25	PLU I	0,62	20,0	0,40	39,1	Racional	2,67
TG26	PLU I	4,57	65,5	0,40	20,2	Racional	7,00

Tributário	Chuva de Projeto Adotada ¹	Área de Drenagem (km ²)	Tempo de Concentração (min) ²	C (Método Racional) /CN (NRCS)	Intensidade ³ (mm/h)	Método Adotado	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)
						Modificado	
TG27	PLU I	1,13	27,7	0,40	33,1	Racional Modificado	4,02
TG28	PLU I	0,14	9,9	0,40	52,7	Racional	0,84
TG29	PLU I	4,05	49,3	0,40	24,7	Racional Modificado	7,84
TG30	PLU I	4,78	69,0	0,40	19,7	Racional Modificado	7,09
TG30A	PLU I	1,77	48,3	0,40	25,0	Racional Modificado	4,26
TG30B	PLU I	0,43	18,1	0,40	41,2	Racional	1,99
TG31	PLU I	1,01	22,6	0,40	36,9	Racional Modificado	4,13
TG31A	PLU I	0,22	23,8	0,40	35,9	Racional	0,87
TG31B	PLU I	0,40	25,2	0,40	34,7	Racional	1,54
TG32	PLU I	5,73	58,7	0,40	21,3	Racional Modificado	8,78
TG32A	PLU I	0,44	22,6	0,40	36,9	Racional	1,81
TG33	PLU I	2,81	45,8	0,40	25,9	Racional Modificado	6,25
TG34	PLU I	1,69	30,5	0,40	31,4	Racional Modificado	5,17
TG35	PLU I	0,28	19,4	0,40	39,8	Racional	1,24
TG36	PLU I	2,86	44,7	0,40	26,3	Racional Modificado	6,43

Tributário	Chuva de Projeto Adotada ¹	Área de Drenagem (km ²)	Tempo de Concentração (min) ²	C (Método Racional) /CN (NRCS)	Intensidade ³ (mm/h)	Método Adotado	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)
TG37	PLU I	0,34	17,5	0,40	41,9	Racional	1,58
TG37A	PLU I	0,01	3,5	0,40	77,6	Racional	0,13
TG38	PLU I	3,81	55,9	0,40	22,3	Racional Modificado	6,77
TG39	PLU I	1,68	31,2	0,40	31,1	Racional Modificado	5,12
TG39A	PLU I	0,21	17,7	0,40	41,7	Racional	0,99
TG40	PLU I	0,30	21,1	0,40	38,2	Racional	1,27
TG40A	PLU I	0,84	30,2	0,40	31,5	Racional	2,94
TG41	PLU I	0,54	30,8	0,40	31,3	Racional	1,86
TG42	PLU I	0,26	18,2	0,40	41,1	Racional	1,17
TG43	PLU I	0,41	15,2	0,40	44,5	Racional	2,03
TG44	PLU II	4,22	68,3	0,40	15,9	Racional Modificado	5,20
TG45	PLU II	0,90	30,6	0,40	25,2	Racional	2,53
TG46	PLU II	1,42	27,4	0,40	26,7	Racional Modificado	3,87
TG47	PLU II	1,01	21,6	0,40	30,3	Racional Modificado	3,40
TG47A e B	PLU II	0,41	16,6	0,40	34,5	Racional	1,57
TG48	PLU II	18,57	128,0	76	-	NRCS	2,56
TG49	-	79,68	-	-	-	Regionalização	9,65
TG49A	-	33,16	-	-	-	Regionalização	5,46

Tributário	Chuva de Projeto Adotada¹	Área de Drenagem (km²)	Tempo de Concentração (min)²	C (Método Racional) /CN (NRCS)	Intensidade³ (mm/h)	Método Adotado	Vazão TR=1,01 (m³/s)
TG49B	PLU II	1,69	40,6	0,40	22,3	Racional Modificado	3,67
TG49C	PLU II	0,49	20,0	0,40	31,4	Racional	1,69
TG49D	PLU II	0,81	26,8	0,40	27,0	Racional	2,44
TG49E	PLU II	1,07	37,2	0,40	23,3	Racional Modificado	2,72
TG49F	PLU II	3,87	61,9	0,40	16,6	Racional Modificado	5,07
TG49G	PLU II	0,64	26,3	0,40	27,3	Racional	1,95
TG50	PLU II	1,81	39,8	0,40	22,5	Racional Modificado	3,91
TG51	PLU II	10,31	110,5	77	-	NRCS	1,66
TG52	PLU II	1,14	30,3	0,40	25,3	Racional Modificado	3,10
TG53	PLU II	0,63	24,6	0,40	28,3	Racional	1,98
TG53A	PLU II	0,31	20,2	0,40	31,2	Racional	1,09
TG54	PLU II	3,23	60,9	0,40	16,7	Racional Modificado	4,47
TG54A	PLU II	0,14	12,0	0,40	39,7	Racional	0,62
TG54B	PLU II	0,56	25,4	0,40	27,8	Racional	1,72
TG55	PLU II	0,57	19,2	0,40	32,1	Racional	2,05
TG56	PLU II	3,35	54,6	0,40	18,3	Racional Modificado	5,03
TG56B	PLU II	0,22	29,3	0,40	25,7	Racional	0,62
TC01	PLU II	0,48	17,1	0,40	34,0	Racional	1,81

Tributário	Chuva de Projeto Adotada¹	Área de Drenagem (km²)	Tempo de Concentração (min)²	C (Método Racional) /CN (NRCS)	Intensidade³ (mm/h)	Método Adotado	Vazão TR=1,01 (m³/s)
TC01A	PLU II	5,11	73,1	0,40	15,4	Racional Modificado	5,82
TC01B	PLU II	0,42	24,2	0,40	28,5	Racional	1,33
TC01C	PLU II	1,78	49,5	0,40	19,8	Racional Modificado	3,39
TC02	-	76,50	-	-	-	Regionalização	9,38
TC03	PLU II	11,79	125,2	76	-	NRCS	1,63
TC03A	PLU II	2,55	42,5	0,40	21,8	Racional Modificado	4,89
TC04	PLU II	0,51	31,3	0,40	25,0	Racional	1,43
TC04A	PLU II	1,62	35,8	0,40	23,7	Racional Modificado	3,78
TC05	PLU II	44,53	228,3	75	-	NRCS	4,70
TC06	PLU II	11,85	131,7	77	-	NRCS	1,86
TC07	PLU II	15,40	124,9	76	-	NRCS	2,13
TC08	PLU II	15,29	111,2	77	-	NRCS	2,46
TC08A	PLU II	8,86	106,5	0,40	12,0	Racional Modificado	6,85
TC09	PLU II	1,96	41,4	0,40	22,1	Racional Modificado	4,06
TC09A	PLU II	1,67	40,4	0,40	22,4	Racional Modificado	3,65
TC10	PLU II	0,44	24,3	0,40	28,5	Racional	1,40
TD01	PLU II	9,57	93,7	0,40	13,3	Racional	8,04

Tributário	Chuva de Projeto Adotada¹	Área de Drenagem (km²)	Tempo de Concentração (min)²	C (Método Racional) /CN (NRCS)	Intensidade³ (mm/h)	Método Adotado	Vazão TR=1,01 (m³/s)
						Modificado	
TD02	PLU II	0,51	27,0	0,40	26,9	Racional	1,52
TD03	PLU II	70,97	359,0	-	-	Regionalização	8,92

¹ PLU I e PLU II correspondem às chuvas de projeto determinadas para as Áreas A e B, respectivamente. A chuva de projeto não é utilizada quando a metodologia de cálculo da vazão é Regionalização.

² O tempo de concentração (tC) não é utilizado quando a metodologia de cálculo da vazão é Regionalização.

³ A intensidade é referente aos métodos Racional e Racional Modificado. No método NRCS a intensidade é definida por meio do modelo hidrológico.

Tabela 14: Dimensionamento hidráulico das seções dos tributários.

Tributário	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)	Trecho	Declividade Média	Seção Transversal Trapezoidal			Profundidade Hidráulica (m)	D ₅₀ (mm) ²
				Altura – h (m)	Base – b (m)	Declividade Talude (zH:1V)		
TG01	2,17	Trecho 1	0,9%	0,70	1,2	1,5	- ¹	100
	2,17	Trecho 2	0,3%	0,70	1,2	1,5	- ¹	100
TG01A	2,46	Trecho 1	2,1%	0,50	1,0	1,5	- ¹	100
TG01B	3,38	Trecho 1	4,7%	0,75	1,0	1,5	0,62	-
	3,38	Trecho 2	1,7%	0,75	1,0	1,5	- ¹	100
TG02	4,41	Trecho 1	0,9%	1,00	2,0	1,5	0,86	100
	4,41	Trecho 2	0,9%	1,00	2,0	1,5	0,86	100
	4,41	Trecho 3	0,9%	1,00	2,0	1,5	0,86	100
TG03	1,46	Trecho 1	11,9%	0,50	1,0	1,5	0,32	-
	1,46	Trecho 2	0,5%	0,50	2,5	1,5	0,49	100
	1,46	Trecho 3	3,1%	0,50	1,0	1,5	0,45	100 e Mataco
TG04	3,25		0,5%	1,00	1,0	2,0	0,96	-
TG05	2,09	Trecho 1	1,2%	0,70	1,2	1,5	0,65	100
TG06	2,46	Trecho 1	4,0%	0,75	1,0	1,5	0,55	-
	2,46	Trecho 2	1,0%	0,75	1,2	1,5	0,74	100
	3,30	Trecho 3	1,0%	0,75	1,8	1,5	0,74	100
	1,05	TG06.I	1,5%	0,50	1,0	1,5	0,46	100
TG10	2,88		5,1%	0,75	1,0	1,5	0,56	100
TG11	7,71	Trecho 1	2,2%	1,00	1,5	2,0	0,93	-
	7,71	Trecho 2	2,2%	1,00	3,0	2,0	0,73	-
	7,71	Trecho 3	1,7%	1,00	3,0	2,0	0,78	-
	7,71	Trecho 4	1,7%	1,00	3,0	1,5	0,81	100
TG11A	0,79	Trecho 1	5,0%	0,50	0,5	2,0	0,35	-
	0,79	Trecho 2	4,2%	0,50	1,0	1,5	0,30	100
TG13	3,31	Trecho 1	7,4%	1,00	1,0	1,5	0,55	-
	3,31	Trecho 2	0,2%	1,00	1,0	2,0	- ¹	-
	3,31	Trecho 3	6,8%	1,00	1,0	1,5	0,56	160
TG14	9,77	Trecho 2	2,0%	1,00	3,0	1,5	0,88	100
TG14A	7,95	Trecho 2	1,0%	1,00	3,0	1,5	0,95	100
TG14B	2,07	Trecho 1	13,8%	1,00	0,6	2,0	0,41	-
	2,07	Trecho 2	2,5%	1,00	1,5	2,0	0,46	-
TG15	6,28	Trecho 2	0,2%	2,00	1,5	2,0	1,46	-
TG16	4,06	Trecho 1	0,8%	1,00	2,0	2,0	0,79	-
	4,06	Trecho 2	2,2%	2,00	2,0	2,0	0,61	Mataco
	4,06	Trecho 3	0,2%	2,00	2,0	2,0	1,12	Mataco

Tributário	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)	Trecho	Declividade Média	Seção Transversal Trapezoidal			Profundidade Hidráulica (m)	D ₅₀ (mm) ²
				Altura – h (m)	Base – b (m)	Declividade Talude (zH:1V)		
TG17	3,77	Trecho 3	2,0%	1,00	1,5	1,5	0,71	100
TG17B	6,37	Trecho 1	3,4%	1,00	0,8	1,5	0,97	100
TG17D	2,62	Trecho 1	3,9%	0,60	1,0	2,0	0,54	-
	2,62	Trecho 2	0,2%	0,30	1,0	2,0	0,22	-
	2,62	Trecho 3	4,2%	0,60	1,0	2,0	0,53	100
TG17E	1,37	Trecho 1	6,0%	1,00	1,0	2,0	0,35	-
	1,37	Trecho 2	4,0%	1,00	1,0	2,0	0,39	-
	1,37	Trecho 3	4,0%	0,50	1,0	2,0	0,39	100
TG18	9,77	Trecho 1	2,0%	1,00	1,5	2,0	- ¹	-
	9,77	Trecho 2	2,0%	1,00	3,5	1,5	0,83	100
	9,77	Trecho 3	1,4%	1,00	3,5	1,5	0,91	100
	9,77	Trecho 4	1,7%	1,00	3,5	1,5	0,86	100
TG19	2,91	Trecho 1	3,6%	1,00	1,0	2,0	0,58	-
TG20	5,57	Trecho 1	1,6%	1,00	2,0	1,5	0,82	100
TG20A	1,24	Trecho 1	10,0%	0,50	1,0	1,5	0,30	100
	1,24	Trecho 2	6,0%	0,50	1,0	1,5	0,35	-
TG21	5,16	Trecho 1	0,9%	1,00	1,5	1,5	- ¹	100
	5,16	Trecho 2	3,0%	1,00	1,5	1,5	0,75	Mataco
TG21A	2,44	Trecho 1	6,9%	0,50	1,0	2,0	0,45	-
	2,44	Trecho 2	11,4%	0,75	1,0	2,0	0,40	100
TG21B	1,13	Trecho 1	4,1%	0,50	1,0	2,0	0,35	-
	1,13	Trecho 2	8,5%	0,50	1,0	1,5	0,30	Mataco
TG22	4,45	Trecho 1	3,4%	0,75	2,0	2,0	0,57	-
	4,45	Trecho 2	2,8%	0,75	1,0	2,0	0,75	160
TG23	2,91	Trecho 1	6,0%	1,00	3,0	2,0	0,32	-
TG24	6,39	Trecho 1	1,3%	1,00	2,0	2,0	0,88	-
	6,39	Trecho 2	1,7%	1,00	2,5	2,0	0,76	-
	6,39	Trecho 3	2,2%	1,00	2,5	1,5	0,74	100
	6,39	Trecho 4	1,7%	1,00	2,0	2,0	0,83	-
TG25	2,67	Trecho 1	3,1%	1,00	1,5	2,0	0,50	-
	2,67	Trecho 2	5,2%	1,00	1,5	2,0	0,44	100
TG26	7,00	Trecho 1	5,8%	1,00	0,5	2,0	0,88	-
TG27	4,02	Trecho 1	5,3%	0,50	1,5	2,0	0,50	-
TG28	0,84	Trecho 1	8,3%	0,50	1,5	2,0	0,21	-
	0,84	Trecho 2	8,3%	0,50	1,5	1,5	0,21	100 e Mataco

Tributário	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)	Trecho	Declividade Média	Seção Transversal Trapezoidal			Profundidade Hidráulica (m)	D ₅₀ (mm) ²
				Altura – h (m)	Base – b (m)	Declividade Talude (zH:1V)		
	0,84	Trecho 3	8,3%	0,50	1,5	2,0	0,21	-
TG29	7,84	Trecho 1	0,7%	1,50	3,5	2,0	0,94	-
	7,84	Trecho 2	0,3%	1,50	3,5	2,0	1,17	-
	7,84	Trecho 3	1,7%	1,00	2,5	2,0	0,84	100
	7,09	Trecho 1	1,7%	1,00	1,5	2,0	0,94	-
TG30	7,09	Trecho 2	1,8%	1,00	1,5	2,0	0,94	-
	7,09	Trecho 3	0,9%	1,00	1,5	2,0	- ¹	100
	7,09	Trecho 4	4,1%	1,00	1,5	2,0	0,77	-
TG30A	4,26	Trecho 1	1,2%	1,00	1,5	1,5	0,86	100
	4,26	Trecho 2	0,8%	1,00	1,5	2,0	0,88	-
	4,26	Trecho 3	5,0%	1,00	2,0	2,0	0,50	-
TG30B	1,99	Trecho 1	0,6%	0,75	1,5	1,5	0,71	100
TG31	4,13	Trecho 1	2,3%	1,00	1,0	2,0	0,75	-
	4,13	Trecho 2	1,6%	1,00	1,0	2,0	0,83	-
	4,13	TG31.I	1,0%	1,00	1,0	2,0	0,92	-
	4,13	Trecho 3	1,5%	1,00	1,5	1,5	0,80	100
	4,13	Trecho 4	1,2%	1,00	1,5	1,5	0,85	100
	4,13	Trecho 5	2,5%	0,75	2,0	1,5	0,62	100
TG31A	0,87	Trecho 1	2,0%	0,50	0,5	1,5	0,48	100
TG31B	1,54	Trecho 1	7,0%	1,00	1,0	2,0	0,36	-
	1,54	Trecho 2	7,0%	1,00	1,0	2,0	0,36	-
TG32	8,78	Trecho 1	1,5%	1,00	4,0	2,0	0,76	-
	8,78	Trecho 2	1,2%	1,00	4,0	2,0	0,80	100
	8,78	Trecho 3	0,6%	1,00	4,0	2,0	0,96	-
TG32A	1,81	Trecho 1	3,4%	0,75	1,5	2,0	0,40	-
	1,81	Trecho 2	4,4%	0,75	1,5	2,0	0,37	-
TG33	6,25	Trecho 1	1,9%	1,00	1,5	2,0	0,87	-
	6,25	Trecho 2	0,8%	1,20	1,5	2,0	1,05	100
	6,25	Trecho 3	0,6%	1,20	2,0	1,5	1,15	100
	6,25	Trecho 4	0,6%	1,20	2,0	1,5	1,15	100
TG34	5,17	Trecho 1	1,5%	1,00	1,0	2,0	0,92	-
	5,17	Trecho 2	0,7%	1,50	1,5	1,5	1,10	100
	5,17	Trecho 3	0,7%	1,50	2,0	1,5	0,99	100
	5,17	Trecho 4	4,3%	1,50	2,0	1,5	0,61	100 e Mataco
TG35	1,24	Trecho 1	3,2%	0,50	1,0	2,0	0,39	-

Tributário	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)	Trecho	Declividade Média	Seção Transversal Trapezoidal			Profundidade Hidráulica (m)	D ₅₀ (mm) ²
				Altura – h (m)	Base – b (m)	Declividade Talude (zH:1V)		
TG36	6,43	Trecho 1	2,1%	1,00	1,0	2,0	0,95	-
TG37	1,58	Trecho 1	1,6%	0,80	1,5	2,0	0,46	-
	1,58	Trecho 2	10,0%	0,50	1,0	2,0	0,33	160
TG37A	0,13	Trecho 1	2,9%	0,50	0,5	2,0	0,16	-
TG38	6,77	Trecho 1	1,5%	1,00	1,5	2,0	0,96	-
	6,77	Trecho 2	1,2%	1,00	2,0	1,5	0,98	100
	6,77	Trecho 3	1,5%	1,00	2,0	2,0	0,88	-
TG39	5,12	Trecho 1	1,9%	1,00	1,5	2,0	0,79	-
	5,12	Trecho 2	1,9%	1,00	1,5	2,0	0,79	100
	5,12	Trecho 3	5,5%	1,00	1,5	2,0	0,60	-
TG39A	0,99	Trecho 1	20,0%	0,60	1,2	1,5	0,20	100
	0,99	Trecho 2	13,0%	0,75	1,2	1,5	0,23	100
TG40	1,27	Trecho 1	0,7%	0,75	1,0	1,5	0,61	100
TG40A	2,94	Trecho 1	6,6%	0,75	1,5	2,0	0,43	-
	2,94	Trecho 2	1,6%	0,75	1,5	1,5	0,66	100
TG41	1,86	Trecho 1	4,4%	0,50	1,0	2,0	0,44	-
	1,86	Trecho 2	3,3%	0,50	1,0	1,5	0,50	100
TG42	1,17	Trecho 1	2,6%	0,50	0,5	2,0	0,48	-
TG43	2,03	Trecho 1	3,8%	0,50	1,0	2,0	0,48	-
TG44	5,20	Trecho 1	1,8%	1,00	2,0	2,0	0,73	-
TG45	2,53	Trecho 1	3,7%	0,75	1,0	2,0	0,53	-
	2,53	Trecho 2	2,4%	0,75	1,0	2,0	0,60	-
TG46	3,87	Trecho 1	3,8%	0,75	1,0	2,0	0,65	-
TG47	3,40	Trecho 1	3,6%	1,50	0,5	2,0	0,72	-
TG47A	1,57	Trecho 1	2,0%	0,75	2,0	2,0	0,38	-
TG47B	1,57	Trecho 1	4,3%	0,50	0,5	2,0	0,49	-
TG48	2,56	Trecho 1	0,8%	1,50	6,0	2,0	0,37	-
	2,56	Trecho 2	0,4%	1,50	4,0	2,0	0,55	-
TG49	9,65	Trecho 1	0,6%	1,50	4,5	2,0	1,00	-
	9,65	Trecho 2	0,6%	1,00	4,5	2,0	1,00	100
	9,65	Trecho 3	0,1%	1,50	4,5	2,0	- ¹	-
TG49A	5,46	Trecho 1	1,7%	1,00	4,5	2,0	0,53	100
TG49B	3,67	Trecho 1	3,7%	0,75	1,0	2,0	0,64	-
	3,67	Trecho 2	5,7%	0,75	1,0	2,0	0,58	-
	3,67	Trecho 3	6,5%	0,75	1,0	1,5	0,60	100

Tributário	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)	Trecho	Declividade Média	Seção Transversal Trapezoidal			Profundidade Hidráulica (m)	D ₅₀ (mm) ²
				Altura – h (m)	Base – b (m)	Declividade Talude (zH:1V)		
TG49C	1,69	Trecho 1	3,1%	0,50	1,0	1,5	0,49	100
TG49D	2,44	Trecho 1	10,0%	0,50	1,5	2,0	0,35	-
	2,44	Trecho 2	4,2%	0,50	1,5	2,0	0,44	-
	2,44	Trecho 3	11,1%	0,50	1,5	2,0	0,34	-
TG49E	2,72	Trecho 1	3,8%	0,50	1,8	2,0	0,45	-
	2,72	Trecho 2	4,2%	0,50	1,8	2,0	0,44	-
TG49F	5,07	Trecho 1	4,4%	0,75	1,5	2,0	0,63	-
	5,07	Trecho 2	3,3%	0,75	1,5	2,0	0,69	-
TG49G	1,95	Trecho 1	8,1%	0,50	1,0	1,5	0,41	100
	1,95	Trecho 2	3,5%	0,50	1,0	2,0	0,48	-
	1,95	Trecho 3	13,0%	0,50	1,0	1,5	0,36	Mataco
TG50	3,91	Trecho 1	4,2%	1,50	0,5	2,0	0,74	-
	3,91	Trecho 2	1,2%	1,50	0,5	2,0	0,95	-
TG51	1,66	Trecho 1	1,1%	1,00	3,0	2,0	0,38	-
	1,66	Trecho 2	0,3%	1,00	3,0	2,0	0,56	100
TG52	3,10	Trecho 1	2,5%	1,00	2,0	2,0	0,51	-
	3,10	Trecho 2	1,1%	1,00	2,0	2,0	0,64	100
TG53	1,98	Trecho 1	3,0%	0,50	2,0	2,0	0,38	-
	1,98	Trecho 2	2,5%	0,50	2,0	1,5	0,42	100
	1,98	Trecho 3	1,9%	0,50	2,0	1,5	0,45	100
TG53A	1,09	Trecho 1	8,4%	0,50	1,0	2,0	0,28	-
TG54	4,47	Trecho 2	3,9%	1,00	1,0	2,0	0,70	-
TG54A	0,62	Trecho 1	19,1%	0,50	0,5	2,0	0,22	-
TG54B	1,72	Trecho 1	1,2%	1,00	1,0	2,0	0,59	-
	1,72	Trecho 2	4,6%	0,50	0,5	2,0	0,50	-
TG55	2,05	Trecho 1	3,5%	0,50	1,0	2,0	0,49	-
	2,05	Trecho 2	2,2%	0,50	1,0	1,5	- ¹	100
TG56	5,03	Trecho 1	2,2%	1,00	1,5	2,0	0,76	-
	5,03	Trecho 2	0,9%	1,00	1,5	2,0	0,93	100
	5,03	Trecho 3	9,6%	1,00	1,5	2,0	0,52	100
TG56B	0,62	Trecho 1	5,3%	0,50	1,0	2,0	0,24	-
TC01	1,81	Trecho 1	4,1%	0,50	1,0	2,0	0,44	-
	1,81	Trecho 2	4,1%	0,50	1,0	2,0	0,44	-
TC01A	5,82	Trecho 1	1,9%	1,00	1,0	2,0	0,93	-
	5,82	Trecho 2	1,7%	1,00	1,0	2,0	0,95	-

Tributário	Vazão TR=1,01 (m ³ /s)	Trecho	Declividade Média	Seção Transversal Trapezoidal			Profundidade Hidráulica (m)	D ₅₀ (mm) ²
				Altura – h (m)	Base – b (m)	Declividade Talude (zH:1V)		
	5,82	Trecho 3	0,8%	1,00	2,5	1,5	0,93	100
TC01B	1,33	Trecho 1	7,1%	0,50	2,0	1,5	0,25	-
	1,33	Trecho 2	7,1%	0,50	2,0	1,5	0,25	Mataco
TC01C	3,39	Trecho 1	1,8%	1,00	1,5	2,0	0,65	-
	3,39	Trecho 2	0,9%	1,00	1,5	1,5	0,83	100
TC02	9,38	Trecho 1	0,7%	1,25	4,5	1,5	0,94	Mataco
	9,38	Trecho 2	0,8%	1,75	4,5	1,5	0,92	Mataco
	9,38	Trecho 3	0,2%	2,75	5,0	1,5	1,28	Mataco
TC03	1,63	Trecho 1	0,2%	1,00	1,0	2,0	0,92	-
	1,63	Trecho 2	0,2%	1,00	3,0	2,0	0,65	-
	1,63	Trecho 3	1,0%	0,75	3,0	1,5	0,39	Mataco
TC03A	4,89	Trecho 2	0,2%	1,20	2,5	2,0	1,14	-
	4,89	Trecho 3	0,2%	1,20	2,5	2,0	1,14	100
TC04	1,43	Trecho 1	1,5%	1,00	1,0	2,0	0,51	-
	1,43	Trecho 2	27,4%	0,50	1,0	1,5	0,25	Mataco
TC04A	3,78	Trecho 1	1,8%	1,00	2,0	2,0	0,62	-
	3,78	Trecho 2	0,4%	1,00	2,0	2,0	0,91	-
TC05	4,70	Trecho 1	0,3%	1,50	2,0	2,0	1,07	-
	4,70	Trecho 2	1,0%	1,50	3,0	1,5	0,71	Mataco
	4,70	Trecho 3	0,8%	1,50	3,0	1,5	0,75	Mataco
TC06	1,86	Trecho 1	1,7%	0,50	2,0	2,0	0,43	100
	1,86	Trecho 2	0,1%	1,00	2,0	2,0	0,84	-
TC07	2,13	Trecho 1	1,5%	0,75	2,5	2,0	0,44	-
TC08	2,46	Trecho 1	0,2%	0,75	2,0	2,0	- ¹	-
TC08A	6,85	Trecho 1	1,7%	1,00	1,0	2,0	1,00	-
	6,85	Trecho 2	1,7%	1,00	1,0	1,5	- ¹	-
	6,85	Trecho 3	1,2%	0,50	2,0	1,5	- ¹	100
TC09	4,06	Trecho 1	3,0%	0,75	1,0	2,0	0,71	-
	4,06	Trecho 2	3,0%	0,75	1,0	2,0	0,71	100
TC09A	3,65	Trecho 1	2,0%	0,75	1,5	2,0	0,66	-
TC10	1,40	Trecho 1	3,1%	0,50	0,5	2,0	0,50	100
TD01	8,04	Trecho 1	2,9%	1,00	2,0	1,5	0,86	-
TD02	1,52	Trecho 1	5,2%	1,00	1,0	2,0	0,38	-
TD03	8,92	Trecho 1	1,0%	1,00	3,5	1,5	0,95	Mataco

¹ A seção projetada foi inferior àquela correspondente à vazão de 1,01 ano de retorno tendo em vista a compatibilização do projeto com as dimensões da seção observada em campo.

² A informação sobre o tamanho médio dos blocos (D_{50}) é apresentada apenas para aqueles trechos de tributários em que o enrocamento foi a opção de revestimento adotada no projeto.

4.5. Construção com acompanhamento de campo

As etapas gerais das obras de recuperação dos tributários são tipicamente as seguintes:

1. Preparação do sítio: criação de acesso, limpeza da área e desvio temporário do curso de água existente (se necessário);
2. Limpeza e conformação da calha: remoção dos rejeitos da calha e conformação de margens conforme dimensionamento de projeto;
3. Colocação de revestimento para estabilizar a calha: conforme projeto definido para cada tributário;
4. Conformação da planície de inundação: preenchimento de depressões e ravinas, implantação de medidas de controle de erosão, estruturas de drenagem (ex.: canaletas, descidas);
5. Revegetação;
6. Cercamento para proteção da vegetação de animais locais.

Todas as obras de recuperação de tributários foram executadas com acompanhamento técnico de obra (ATO). O acompanhamento foi realizado por engenheiros com formação nas áreas civil e/ou ambiental sob a supervisão de especialistas em recuperação ambiental de cursos d'água. Dado o caráter emergencial das obras e o nível de informação disponível nos projetos de recuperação, considera-se que o acompanhamento técnico de obra é fundamental para obtenção de um bom resultado.

A ausência de informações de sondagem e da topografia prévia ao evento, faz com que situações não previstas em projeto possam surgir, especialmente durante a etapa de limpeza e conformação de calha. A presença do acompanhamento de campo facilita a identificação desta situação, permitindo adequações ou otimizações de projeto. Esta flexibilidade é importante para seguir a premissa de manter as condições do tributário mais próximas do original. As adequações ou otimizações de projeto são validadas com a supervisão de campo e com a equipe de projetos, e apontadas no registro diário de obra (RDO).

Como exemplo da atuação do ATO citam-se os casos onde o levantamento de campo indicava grande espessura de rejeitos, e, por esse motivo, a recomendação de projeto foi revestir a seção com enrocamento. Porém quando a escavação de calha foi executada, foi possível chegar até o terreno natural, o que possibilitou minimizar a aplicação de rocha. Também houveram casos onde o projeto recomendava apenas bioengenharia e foi necessário complementar a proteção utilizando enrocamento para minimizar processos erosivos.

As medidas adotadas e os resultados alcançados com as ações de regularização das calhas e margens, bem como o controle de processos erosivos são apresentadas no Relatório de Recuperação dos Tributários, **Anexo E** deste documento.

Sempre que possível os projetos foram revisados para refletir as adequações. Porém, dado o caráter dinâmico das obras, algumas alterações de projeto foram registradas somente no *As Built*.

4.6. As Built

Foram realizados levantamentos topográficos cadastrais de cada tributário com o objetivo de registrar as intervenções efetivamente implementadas. Com essas informações foram preparados desenhos *As Builts*, compreendendo quatro formatos de desenhos, como se segue:

- 1) Planta de arranjo geral;
- 2) Perfil e planta do canal;
- 3) Seções transversais da área;
- 4) Seções transversais detalhadas do canal.

A elaboração dos *As Builts* está em fase de conclusão, sendo assim, serão apresentados neste relatório somente os arquivos finalizados e aprovados. Tão logo finalizados estes serão disponibilizados na plataforma Webgis. No anexo H deste documento estão disponibilizados os *As Built* concluídos até o momento.

4.7. Monitoramento e manutenção

Após a execução das obras, inicia-se a fase de monitoramento e manutenção das intervenções de cada tributário.

As atividades de monitoramento de tributários estão inseridas em um programa mais abrangente que inclui também a calha dos rios principais e as planícies de inundação. As atividades de monitoramento visam atender à cláusula 194 do TTAC que determina que “*os programas socioambientais e socioeconômicos deverão ser objeto de monitoramento, tanto para avaliação da sua efetividade como para se prevenir ou mitigar novos impactos decorrentes da própria execução desses programas*”.

As informações aqui apresentadas são apenas um resumo a título de informação. As atividades de monitoramento serão objeto de documentos específicos para atender à cláusula 194, incluindo metodologia detalhada e resultados. Vale lembrar que o cronograma das atividades de monitoramento e manutenção se estendem muito além do prazo de implementação das intervenções objeto da cláusula 160, motivo pelo qual não é possível apresentar o programa de monitoramento de maneira integral neste documento.

O monitoramento das obras de tributários tem basicamente duas vertentes:

- Estabilidade de canais; e
- Qualidade de águas.

O monitoramento de estabilidade de canais é feito por meio de inspeções de campo e visa avaliar a integridade das contenções aplicadas. Como a vazão de projeto utilizada possui tempo de retorno relativamente baixo (1,01 ano), eventos de cheia de maior magnitude serão frequentes e podem danificar as proteções aplicadas. Cabe ressaltar que, após a primeira estação chuvosa (2016/2017), considerada a mais crítica, pois como as obras são recentes a vegetação ainda não estava completamente estabelecida, os danos verificados aos canais foram pontuais. As inspeções de campo identificam tais pontos e é feita a recomposição da proteção, podendo incluir medidas mais robustas do que as aplicadas anteriormente.

O monitoramento da qualidade da água dos tributários se iniciou como uma iniciativa voluntária da Samarco para demonstrar a efetividade das intervenções. Os trabalhos começaram em junho de 2016 e se estenderam até outubro de 2017, quando foi iniciado Plano de Monitoramento Qualiquantitativo de Vigilância para Avaliação de Impactos (PMQQVAI), visando atender a cláusulas 178 do TTAC. O PMQQVAI é mais abrangente e engloba pontos de monitoramento em diversos tributários dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, bem como nesses próprios rios. As análises de amostras de água e sedimento são analisadas para um número maior de parâmetros físicos, químicos e hidrobiológicos.

O monitoramento voluntário de qualidade de água de tributários teve como foco os parâmetros turbidez e sólidos suspensos totais. Ao todo foram monitorados 15 tributários em períodos diferentes conforme o cronograma de obras: TG03, TG10, TG16, TG18, TG30, TG34, TG36, TG38, TG48, TG49, TG53A, TG55, TG56, TC02 e TC05. Em cada tributário monitorado foram coletadas amostras a montante e a jusante das áreas que sofreram intervenções. De uma maneira geral o que se observou foi que, após as obras, os resultados médios de turbidez foram semelhantes nos pontos de montante e jusante. Isto indica que as intervenções implementadas foram efetivas em minimizar o carreamento de rejeitos para os cursos d'água principais.

5. Projeto de recuperação ambiental de Rios Principais

5.1. Introdução

O projeto de recuperação ambiental de rios principais tem como foco a regularização de calha e margem dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce no trecho impactado entre Fundão e Candonga. O córrego Santarém e o reservatório de Candonga, devido às características destas áreas e peculiaridades das ações a serem implementadas, não fazem parte do escopo deste projeto de recuperação.

O objetivo do projeto de recuperação ambiental de rios principais é basicamente promover a estabilização física da calha e margem dos cursos d'água. Como mencionado no item 2, ações complementares de recuperação ambiental serão aplicadas futuramente de modo a reestabelecer o ecossistema, assim como a necessidade de estudos complementares, as quais serão apontadas pelos Planos de Manejo de Rejeitos definidos pelo Programa de Manejo de Rejeitos (PG23)

Nestes Planos serão definidas as diretrizes, conceitos e metodologias para a tomada de decisão para o manejo dos rejeitos em cada área. O processo de tomadas de decisão é composto por passos lógicos de modo a identificar riscos, impactos e oportunidades, definir opções para endereçá-los e, então, por fim, avaliar aquelas alternativas de manejo que se apresentam mais efetivas na minimização dos impactos e na restauração do ambiente.

É importante contextualizar o termo “estabilização física de calha e margem” no âmbito de um processo de recuperação ambiental. Nesse caso o que se busca é uma estabilidade relativa, suficiente para que o ambiente se recupere. Este grau de estabilização é diferente da estabilidade absoluta, aplicável a um projeto de canalização de curso d'água associado à infraestrutura urbana, por exemplo, onde não pode haver nenhuma movimentação do canal. A estabilização física relativa com vistas à recuperação ambiental é uma abordagem interessante, pois pode ser obtida com uso de materiais naturais, que irão se integrar à paisagem (ex.: enrocamento, madeira, biomantas, estacas vivas etc.), e revegetação. Para garantir uma estabilidade física absoluta, provavelmente seria necessário utilizar uma quantidade maior de enrocamento de maior granulometria, ou até mesmo concreto, o que inviabiliza a recomposição do ecossistema.

As melhores práticas recomendam que o projeto de recuperação ambiental não deve tentar “engessar a situação” do curso d'água ao final das obras. Projetos que considerem o comportamento dinâmico do ecossistema fluvial tem maior chance de serem bem-sucedidos no longo prazo (FISRWG, 2001).

Durante eventos de cheia com tempo de retorno superior à vazão de projeto, é esperado que haja erosão de margens em alguns pontos. Desta forma, garante-se que o curso d'água irá manter o seu dinamismo natural no longo prazo.

As áreas prioritárias para intervenção foram delimitadas no âmbito dos estudos geomorfológicos, hidrodinâmicos e hidrossedimentológicos. Os princípios orientadores para o estabelecimento das prioridades em termos locais e os tipos de intervenção para controlar a liberação de rejeitos foram baseados em:

- A recuperação da bacia de drenagem para gestão de sedimentos deve ser realizada a partir das áreas de montante para jusante, de modo que áreas recuperadas não sejam impactadas pela geração de sedimentos provenientes de obras a montante (ATKINS et al., 2001);
- No que tange a mecânica dos processos de erosão e transporte de rejeitos que geram altos níveis de sólidos suspensos totais, as atividades visando minimizar a erosão podem ser ordenadas de acordo com a seguinte ordem de prioridade:

- ✓ Evitar que os rejeitos das planícies de inundação retornem para o rio;
 - ✓ Proteger os rejeitos do contato direto com fluxo de água superficial; e
 - ✓ Remover os rejeitos do contato direto com fluxo de água superficial.
- O trabalho deve focar nos maiores volumes de rejeitos armazenados, de montante para jusante; assim, planícies de inundação largas devem ser tratadas antes de planícies de inundação estreitas, com flexibilidade para levar em consideração a localização das mesmas. Por exemplo, uma planície de inundação larga que esteja situada a uma distância grande a jusante de uma planície de inundação estreita, pode vir a ser tratada depois desta.

Inicialmente foram delimitadas 16 áreas, ordenadas conforme prioridade de recuperação, tendo como base os resultados das análises geomorfológicas, hidrológicas e hidrossedimentológicas e usando os princípios orientadores apresentados acima. Cabe ressaltar que nesta época o dique S4 ainda não havia sido implantado de modo que a prioridade número 1 foi a área de Bento Rodrigues. Posteriormente, a Samarco delimitou as áreas não prioritárias, localizadas entre as áreas prioritárias, e as numerou sequencialmente de montante para jusante de 17 a 27. As imagens disponibilizadas no Anexo A proporcionam a visualização da localização das áreas prioritárias e não prioritárias.

A Tabela 15 apresenta as áreas prioritárias e não prioritárias ordenadas de montante para jusante. Em relação às ordens de prioridade, notar que as áreas com ordem de prioridade mais alta, 1 a 4, são aquelas localizadas mais a montante e cuja geomorfologia favorece a acumulação de rejeitos, muito devido à área 19 de cânion que controlou o fluxo. Em seguida foram priorizadas as áreas 5, 6 e 7 localizadas no rio Gualaxo do Norte com planície de inundação larga (BFL), seguidas pelas áreas 8, 9 e 10 com planície de inundação estreita (BFS) e áreas 11, 12 e 13 classificadas como estreitas (NR). Em sequência vieram as áreas prioritárias no rio do Carmo (14, 15 e 16). Por fim vieram as áreas não prioritárias, geomorfológicamente classificadas como confinadas (CF) ou cânions (CN), ordenadas de 17 a 27, considerando apenas a localização de montante para jusante.

Tabela 15: Áreas prioritárias e não prioritárias listadas de montante para jusante.

Ordem de Prioridade	Tipo	Bacia	Descrição
12	Prioritária	Santarém	Alto córrego Santarém
2	Prioritária	Santarém	Córrego Mirandinha (dique S3)
17	Não Prioritária	Santarém	Córrego do Fraga (dique S3)
1	Prioritária	Santarém	Área de Bento Rodrigues (dique S4)
18	Não Prioritária	Santarém	Córrego Ouro Fino (dique S4)
4	Prioritária	Gualaxo do Norte	Canal e planície de inundação do rio Camargo
3	Prioritária	Gualaxo do Norte	Remanso do Gualaxo do Norte (BFS-01)
19	Não Prioritária	Gualaxo do Norte	Localizada entre área 3 e área 13 (CN-02 e CF-03)
13	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área da PCH Bicas (NR-04 e CF-05)
20	Não Prioritária	Gualaxo do Norte	Localizada entre área 13 e área 11 (CF-05)

Ordem de Prioridade	Tipo	Bacia	Descrição
11	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área de Engenho Podre (NR-06)
21	Não Prioritária	Gualaxo do Norte	Localizada entre área 11 e área 10 (CF-07)
10	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área de Ponte do Gama (BFS-08)
22	Não Prioritária	Gualaxo do Norte	Localizada entre área 10 e área 8 (NR-09)
8	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área a montante de Paracatu (BFS-10)
5	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área de Paracatu (BFL-11)
23	Não Prioritária	Gualaxo do Norte	Localizada entre área 5 e área 7 (CN-12)
7	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área de Pedras (BFL-13 a BFL-19)
24	Não Prioritária	Gualaxo do Norte	Localizada entre área 7 e área 9 (CN-20 a NR-25)
9	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área de Campinas Barreto (BFS-26)
6	Prioritária	Gualaxo do Norte	Área de Gesteira (BFL-27)
25	Não Prioritária	Gualaxo do Norte	Localizada entre área 6 e área 15 (CN-28 a BFS-32)
26	Não Prioritária	Carmo	Localizada a montante da área 14
14	Prioritária	Carmo	Remanso do rio do Carmo
15	Prioritária	Carmo	Área de Barra Longa (BFS-BFL-33 a BFS35)
27	Não Prioritária	Carmo/ Doce	Localizada entre área 15 e área 16 (CF-36 a CF-38)
16	Prioritária	Doce	Reservatório de Candonga

Das áreas listadas acima, é importante destacar as seguintes interações com outras atividades de recuperação:

- As áreas 1, 2, 12, 17 e 18 se localizam a montante do dique S4 e não foram incluídas no escopo das atividades de recuperação da cláusula 160;
- A área 16, corresponde ao reservatório de Candonga, onde estão em curso as medidas de dragagem e manejo de rejeitos que não são objeto da cláusula 160;
- A área 4 corresponde ao córrego Camargos ou tributário TG04.

Os documentos de referência específicos para o projeto de recuperação ambiental de rios principais são:

- Relatório de Diretrizes Gerais de Projeto (GOLDER, 2016i).
- Relatório de Critérios de Projeto (GOLDER, 2017b).

5.2. Premissas e Critérios de Projeto

Considerando que os estudos geomorfológicos demonstraram que não houve alteração significativa na largura das seções de escoamento (vide Figura 3 no item 3.1.2) e que a remoção de rejeitos do leito do canal não é uma solução sustentável, conclui-se que a melhor solução para a regularização das calhas e margens para os trechos impactados consiste em proteger as seções existentes dos processos erosivos, preferencialmente com materiais naturais, de modo a permitir o reestabelecimento da vegetação e integração futura com ambiente de entorno. Considerou-se que os rejeitos e sedimentos de dentro do canal serão removidos por processos naturais de transporte de sedimentos, uma vez que esta é a solução de menor impacto e custo benefício ambiental. Desta forma, os trabalhos de regularização de calhas e margens ficaram restritos aos taludes e pés das margens. Por fim com base nas discussões do plano de Manejo de rejeitos a Fundação entendeu que a regularização da calha e de áreas sensíveis e de difícil acesso ficarão a cargo do “PG-23.

As premissas adotadas para os projetos de recuperação ambiental de rios principais são:

- A morfologia do canal dever ser mantida o mais próximo possível da sua condição original (pré-rompimento);
- Movimentações de terra e rejeitos que possam levar ao aporte de sedimentos ao leito do rio devem ser minimizados;
- Movimentação dos rejeitos e sedimentos depositados no leito do rio devem ser minimizados, os trabalhos de remoção do rejeito presente na porção intracalha serão definidas e executadas no âmbito do Plano de Manejo de Rejeitos (PG-23);
- Materiais naturais depositados ao longo dos cursos de água, como pedaços de madeira, devem ser aproveitados;
- O distúrbio nas margens do canal deve ser minimizado;
- A reconformação de áreas onde a vegetação natural já se restabeleceu deve ser evitada para melhorar a estabilização das margens;
- Da mesma forma, deve ser evitada a reconformação de áreas onde existem remanescentes da vegetação ripária (ex.: sistema radicular);
- Técnicas de bioengenharia, conjugando materiais inertes com elementos vivos, devem ser favorecidas em detrimento às soluções de engenharia pesada, como o revestimento com rochas;
- As intervenções realizadas devem ser monitoradas e reparadas até que a área seja estabilizada e integrada com o ambiente de entorno.

Cabe ressaltar que os estudos geomorfológicos, hidrodinâmicos e hidrossedimentológicos nortearam a definição das premissas, porém estas só foram formuladas e confirmadas depois dos levantamentos feitos para elaboração dos projetos.

Os critérios de projeto adotados foram:

- Os trabalhos de estabilização serão projetados para velocidade de escoamento com tempo de retorno de 10 anos;
- A altura do enrocamento nas proteções de pé utiliza como referência o nível d'água com tempo de retorno de 2 anos.

5.3. Metodologia

A metodologia do projeto de recuperação ambiental de rios principais seguiu as etapas:

- Levantamentos de campo;
- Definição de premissas de projeto;
- Definição de seções tipo;
- Elaboração do projeto:
 - ✓ Estudos hidrológicos;
 - ✓ Modelagem hidráulica;
 - ✓ Dimensionamento das seções;
 - ✓ Elaboração de projetos especiais;
 - ✓ Desenhos.
- Construção com acompanhamento de campo;
- *As Built*;
- Monitoramento e manutenção.

5.3.1. Levantamento de campo

Os levantamentos de campo foram conduzidos por equipe multidisciplinar formada por profissionais com formação em engenharia nos campos: civil, hidráulica, geotécnica, ambiental e agrônômica.

Foi realizado um mapeamento completo das condições de campo de cada área prioritária e não prioritária. Os parâmetros avaliados durante o levantamento de campo foram:

- Geometria dos taludes das margens: altura, inclinação;
- Característica do material das margens: se material natural ou rejeito, espessura da camada de rejeitos, granulometria, presença de afloramento rochoso;
- Feições erosivas nas margens: identificação de zonas de erosão (taludes verticais ou negativos) e deposição (barras de sedimentos, “praias”);
- Presença de vegetação nas margens: vegetação natural, vegetação de mix de sementes, presença de raízes, processos de regeneração natural.

Foram identificados os trechos com características similares e a possível solução aplicável a cada trecho (item 5.3.2). Para os levantamentos, foram utilizados mapas de campo em escala 1:1.000 elaborados com base na topografia disponível (item 5.3.3.1).

5.3.2. Proposição de seções tipo

Dados a extensão das obras e o seu caráter emergencial, optou-se pela definição de seções tipo a serem aplicadas na recuperação. Nos trechos cujas características do canal não permitem a aplicação das seções tipo, são desenvolvidos projetos especiais.

Com base na avaliação de campo, foram definidas 5 seções tipo:

- Tipo A: Margem exposta com a presença de praia;
- Tipo B: Margem exposta sem a presença de praia;
- Tipo C: Margem exposta com talude alto e berma intermediária;
- Tipo D: Margem estabilizada onde são aplicadas medidas pontuais de contenção da erosão e de reforço da vegetação;
- Tipo E: Margem exposta: situação em que as seções tipo acima não são aplicáveis sendo necessário projeto específico.

Na elaboração do projeto, as cinco seções tipo foram desdobradas em subtipos conforme especificidades de cada local (vide item 5.3.3.4). Os desenhos típicos de cada uma das seções são apresentados no Anexo C.

Durante os levantamentos, foram delimitados nos mapas de campo os trechos de margem em cada área prioritária e não prioritária com a identificação de qual seção tipo se aplica.

5.3.3. Elaboração de projeto

Após o levantamento de campo é feita a elaboração do projeto de cada área. O projeto consiste basicamente em calcular as vazões, velocidades de escoamento e níveis d'água em cada local do rio a fim de dimensionar as proteções de margem. As vazões foram calculadas por métodos de regionalização detalhados no item 5.3.3.2 relativo aos estudos hidrológicos. As velocidades e os níveis d'água foram calculados através de modelagem hidráulica (item 5.3.3.3).

5.3.3.1. Topografia

A geometria das áreas trabalhadas foi caracterizada segundo levantamentos topográficos a laser (LiDAR), conforme detalhado na **Tabela 16**.

Tabela 16: Base topográficas utilizadas para os projetos de recuperação ambiental dos rios principais.

Áreas	Descrição	Data Aproximada do Levantamento
Áreas prioritárias 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 13 e 15; Áreas não prioritárias 19 e 21	Levantamento planialtimétrico de tributários realizado pela Arya Inventário Territorial/Fiducial Engenharia e Aerolevantamentos	Fevereiro/2016
Área não prioritária 20	Topografia obtida por aerolevantamento para perfilamento do sensor laser scanner LiDAR-OPTECH realizado pela Topocart	Agosto/2016
Áreas prioritárias 7, 9 e 14; Áreas não prioritárias 22, 23, 24, 25, 26 e 27	Topografia obtida por aerolevantamento para perfilamento do sensor laser scanner LiDAR-OPTECH realizado pela Arya Inventário Territorial / Fiducial Engenharia e Aerolevantamentos	Setembro/2016

Para o projeto da área prioritária 15 foi utilizado ainda o levantamento batimétrico de trechos das calhas dos rios do Carmo e Gualaxo do Norte, no município de Barra Longa, realizado em março de 2016 pela ERG Engenharia. Para os projetos das demais áreas prioritárias e não prioritárias não havia levantamento batimétrico disponível.

5.3.3.2. Estudos hidrológicos

As vazões de projeto são necessárias para o dimensionamento das proteções de margem dos cursos d'água impactados pelo rompimento da barragem de Fundão. As vazões variam conforme as características hidrológicas das bacias, que afetam a metodologia de transferência (ou regionalização) a ser empregada.

A área de estudo abrange a bacia do rio Gualaxo do Norte, desde o córrego Santarém até a foz; a bacia do rio do Carmo, de Barra Longa até a foz, e a bacia do rio Doce até a UHE Candonga.

A bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte tem forma alongada e se desenvolve de Oeste para Leste, sendo caracterizada por uma expressiva variação no regime pluviométrico neste sentido,

afetado pelo efeito orográfico observado nas cabeceiras pela presença da Serra do Caraça (TEC3, 2016). Nesta bacia estão localizadas as estações fluviométricas: Fazenda Ocidente (código Ana 56337000), que operou de 1941 até o dia da ruptura, e PCH Bicas (código ANA 56335800), que operou de 1938 a 1941.

A bacia hidrográfica do rio do Carmo, no trecho compreendido entre Barra Longa e a foz, desenvolve-se também no sentido Oeste-Leste (TEC3, 2016). No município de Acaiaca, a cerca de 12 km a montante da foz do rio Gualaxo do Norte no rio do Carmo, encontram-se localizadas as estações fluviométricas de Acaiaca e Acaiaca Jusante (código ANA 56335000 e 56335001, respectivamente), que abrangem o período 1940-2015.

Em ambas bacias, observam-se valores de precipitação anual média que variam de 1400 mm a 2100 mm anuais (Pinheiro, 2011). Portanto, a precipitação média é um fator relevante ao transportar valores de vazões observadas para outras áreas destas bacias (TEC3, 2016).

A bacia do rio Doce, desde sua origem na confluência dos rios Carmo e Piranga até a UHE Candonga, desenvolve-se no sentido SW-NE, em um domínio de precipitações anuais médias praticamente constantes, que variam entre 1300 mm e 1400 mm anuais. Neste caso, considera-se adequada que a transferência de vazões seja realizada considerando apenas a área de drenagem como variável de regionalização (TEC3, 2016). No trecho em questão, a cerca de 25 km a jusante da UHE Candonga, encontra-se localizada a estação fluviométrica de Fazenda Cachoeira D'Antas (código ANA 56335000).

5.3.3.2.1. Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo

O cálculo das vazões de projeto para as bacias dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo foi realizado com base na metodologia da Cheia de Referência (ou Index Flood), conforme descrita em Pinheiro (2011). Essa metodologia utiliza uma cheia de referência, relacionada à precipitação média anual e a área de drenagem, para transferir essa informação.

Naquele trabalho, foram determinadas isoietas de precipitação média anual na área de atuação da Mineradora Vale em Minas Gerais, que engloba as bacias hidrográficas dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo. A metodologia de regionalização proposta parte da determinação do Index Flood para cada ponto de interesse a partir da seguinte equação (PINHEIRO, 2011):

$$\bar{P}_{d,i} = 0,054 \cdot d^{0,4954} \cdot PAM^{1,0071} \cdot p_{T,d} \quad (II)$$

Na qual,

$\bar{P}_{d,i}$ é o *Index Flood* (mm) para a duração d (dias) no local i ;

d é a duração da precipitação (dias);

PAM é a chuva anual média (mm), determinada a partir da análise de isoietas em cada bacia de interesse.

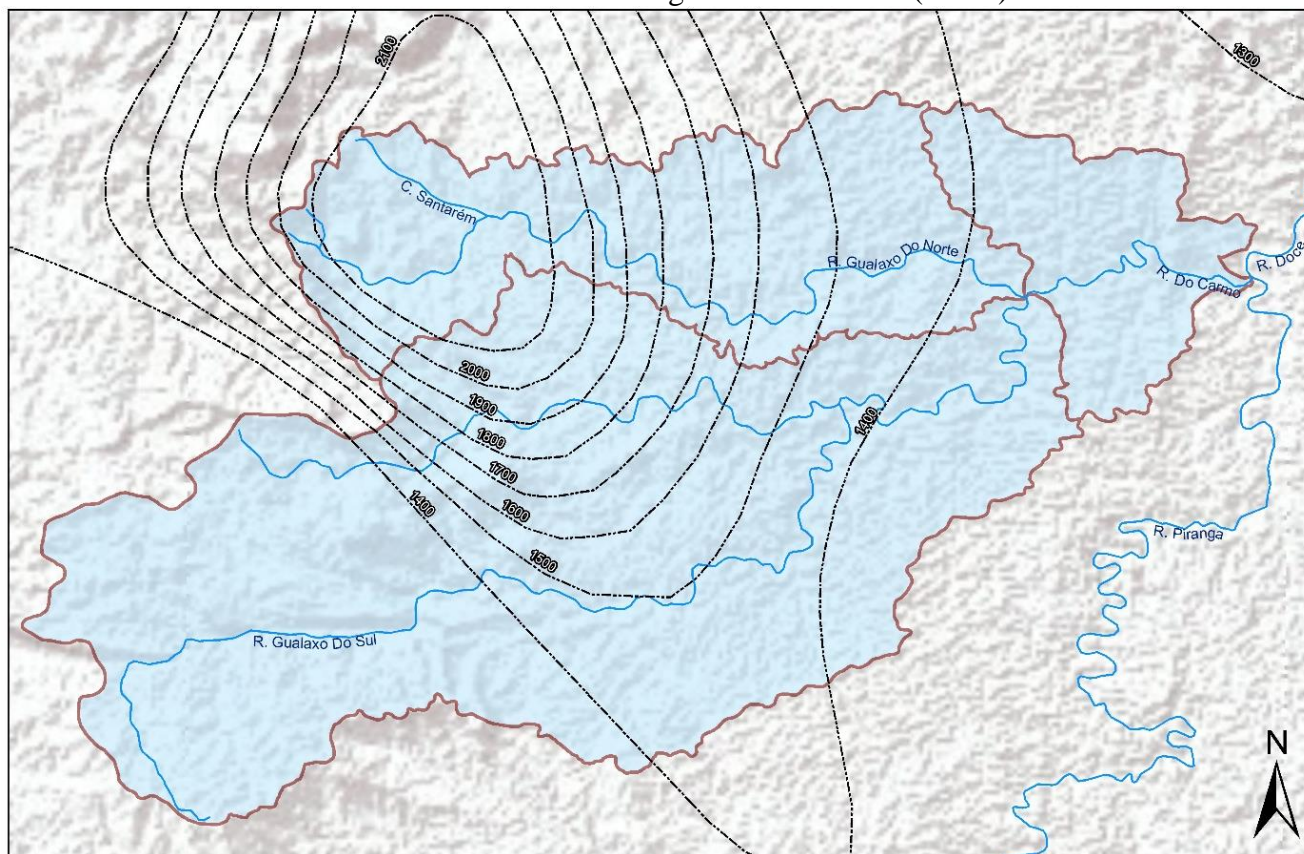
$P_{T,d}$ é um fator adimensional obtido a partir da razão entre os quantis de cada recorrência e a chuva extrema anual (**Tabela 17**).

Tabela 17: Fatores adimensionais para eventos pluviométricos extremos com duração de 1 dia.

Período de Retorno (anos)					
2	5	10	25	50	100
0,9521	1,2097	1,3802	1,5956	1,7555	1,9141

Fonte: Pinheiro, 2011.

A Figura 9 apresenta as isoietas sobrepostas às bacias hidrográficas do rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo. A área das bacias foi determinada a partir dos divisores hidrográficos apresentados, delimitados em cartas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala 1:50.000.



Fonte: Adaptado de Pinheiro, 2011.

Figura 9: Isoietas anuais médias nas bacias dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo.

A metodologia de regionalização de vazões empregada utiliza a área de drenagem e as estimativas de altura pluviométrica associadas a cada recorrência para transferir a informação de monitoramento disponível nas estações fluviométricas Fazenda Ocidente (código ANA 56337000) e

Acaiaca e Acaiaca Jusante (códigos ANA 56335000 e 56335001) para as áreas de atuação dos trechos dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, respectivamente. Os registros dessas estações estão disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2016).

Os dados de monitoramento destas estações (período de 1941 a 2015) foram submetidos a uma análise de frequência, cujo melhor ajuste foi obtido pela distribuição Exponencial, para obter os quantis de vazões de interesse (Tabela 18 e Tabela 19), corrigidos por um fator igual a 1,1 para correlacionar eventos diários e de 24 horas de duração (PINHEIRO, 2011). Foram também determinadas vazões adimensionais, obtidas pela razão entre os valores de vazão e o produto de área de drenagem e a estimativa da altura pluviométrica extrema associada a cada recorrência, a serem utilizadas na regionalização das respectivas vazões extremas.

Tabela 18: Vazões extremas e adimensionais determinadas para a estação fluviométrica de Fazenda Ocidente (código ANA 56337000).

Variável	Período de Retorno (anos)					
	2	5	10	25	50	100
Vazão (m ³ /s)	104,6	193,0	259,9	348,3	415,2	482,1
Vazão Adimensional (m ³ /s/(mm x km ²))	0,0018	0,0032	0,0044	0,0059	0,0070	0,0081

Obs: Período de dados de 1941 a 2015.

Tabela 19: Vazões extremas e adimensionais determinadas para o trecho do rio do Carmo a jusante do rio Gualaxo do Norte.

Variável	Período de Retorno (anos)					
	2	5	10	25	50	100
Vazão (m ³ /s)	289,8	462,1	592,4	764,6	894,9	1025,2
Vazão Adimensional (m ³ /s/(mm x km ²))	0,0014	0,0010	0,0128	0,0023	0,0020	0,0016

Obs: Período de dados de 1941 a 2015.

Vale observar que as séries de vazões diárias observadas no trecho do rio do Carmo a jusante do rio Gualaxo do Norte foram transportadas para a foz pela razão entre áreas de drenagem devido à proximidade, sendo somadas para obter novos valores de vazões máximas. Essa nova série foi submetida à análise de frequência para determinar as vazões extremas no trecho final do rio do Carmo a jusante da foz do rio Gualaxo do Norte (Tabela 19).

Devido a inexistência de batimetria, a modelagem hidráulica considerou as seções transversais do rio sem estas informações. Portanto, o nível mínimo das seções representa o nível de água nos cursos de água nos dias de levantamento topográfico (LiDAR).

Com o intuito de melhor representar a hidráulica nas modelagens, um fator redutor de vazões foi considerado (Tabela 20). A redução das vazões representa a parte da seção da calha que estaria submersa nos dias do levantamento.

Para a definição do fator de correção de vazão foi realizado um comparativo, e definido uma razão entre as vazões nos dias do levantamento topográfico e as vazões de projeto oriundas das análises de frequência com base na estação Fazenda Cachoeira Dantas (código ANA 56425000), para as medições no dia do levantamento, e, nas demais estações citadas no documento, para as vazões da análise de frequência. Como os levantamentos topográficos foram realizados após o evento de rompimento, os registros na estação Fazenda Ocidente, localizada no rio Gualaxo do Norte, não estavam disponíveis nessas datas, uma vez que essa estação foi danificada e ficou fora de operação. Por isso foram utilizados os registros de monitoramento de uma estação localizada no rio Doce (Fazenda Cachoeira Dantas).

Tabela 20: Fatores de correção das vazões.

Variável	Período de Retorno (anos)					
	2	5	10	25	50	100
Fator de correção	0,75	0,83	0,87	0,89	0,91	0,92

Em cada área prioritária e não prioritária, conhecendo-se a área de drenagem e os quantis pluviométricos de interesse calculados pela metodologia do Index Flood previamente descrita, determinaram-se os valores de vazões extremas associadas pelo produto desses valores e as respectivas vazões adimensionais.

5.3.3.2.2. Rio Doce

No trecho em questão, da origem do rio Doce (confluência dos rios do Carmo e Piranga) até a UHE Candonga, observa-se um domínio de precipitações anuais médias praticamente constantes, que variam entre 1300 mm e 1400 mm anuais. Neste caso, considera-se adequada que a transferência de vazões seja realizada considerando apenas a área de drenagem como variável de regionalização.

Neste trecho, a cerca de 25 km a jusante da UHE Candonga, encontra-se localizada a estação fluviométrica de Fazenda Cachoeira D'Antas (código ANA 56335000). Os dados de monitoramento desta estação (1982 a 2015) foram submetidos a análise de frequência, que resultou no ajuste de uma distribuição exponencial. A Tabela 21 apresenta os valores de vazões extremas obtidos, bem como os respectivos quantis adimensionais.

Tabela 21: Vazões extremas e adimensionais determinadas para o rio Doce em Fazenda Cachoeira D'Antas (código ANA 56425000).

Variável	Período de Retorno (anos)					
	2	5	10	25	50	100
Vazão ¹ (m ³ /s)	635,1	945,6	1180,5	1491,0	1725,9	1960,9

Variável	Período de Retorno (anos)					
	2	5	10	25	50	100
Vazão Adimensional ² (m ³ /s / km ²)	0,0629	0,0936	0,1169	0,1476	0,1709	0,1941

1 – Período de dados de 1982 a 2015.

2 – Área de drenagem igual a 10.100 km².

A partir dos valores de área de drenagem, os quantis foram regionalizados para o trecho compreendido entre a origem do rio Doce (confluência dos rios do Carmo e Piranga) e a UHE Candonga (Tabela 22).

Tabela 22: Vazões extremas (m³/s) no trecho compreendido entre a origem do rio Doce até a UHE Candonga.

Ponto de Interesse	Área de Drenagem (km ²)	Período de Retorno (anos)					
		2	5	10	25	50	100
Rio Doce na origem (confluência dos rios Carmo e Piranga)	8736,76	549,4	818,0	1021,2	1289,8	1493,0	1696,2
UHE Candonga	8900,00	559,6	833,3	1040,3	1313,9	1520,9	1727,9

5.3.3.3. Modelagem hidráulica

A modelagem hidráulica é realizada para simular o efeito das diferentes vazões de projeto nas seções do rio e obter as velocidades de escoamento e manchas de inundação. A partir destas informações é possível realizar o dimensionamento das proteções e definir os subtipos de seções (item 5.3.3.4).

As principais informações referentes à modelagem hidráulica estão resumidas a seguir:

- Simulação hidráulica em regime de escoamento permanente e gradualmente variado;
- Geometria obtida a partir dos levantamentos topográficos informados no 5.3.3.1, conforme a área onde se insere o curso de água modelado;
- Devido a inexistência de batimetria, a modelagem hidráulica considerou as seções transversais do rio sem estas informações. Portanto, o nível mínimo das seções representa o nível de água nos cursos de água nos dias de levantamento topográfico;
- Modelagem hidráulica realizada por meio do programa HEC-RAS do United States Army Corps of Engineers (USACE, 2010);
- Condições de contorno adotadas iguais à profundidade normal ou elevações do nível de água conhecidas. Nesse último caso, as elevações conhecidas são aquelas obtidas de modelagens das áreas a montante ou a jusante;

- Coeficientes de rugosidade de Manning definidos por calibração em estudos anteriores, sendo definidos quatro valores distintos:
 - ✓ 0,033 para áreas ocupadas por rejeitos;
 - ✓ 0,250 para áreas urbanas;
 - ✓ 0,055 para áreas de pastagens;
 - ✓ 0,080 para áreas de vegetação densa.

5.3.3.4. Dimensionamento e definição dos subtipos de seção

Cada seção tipo apresenta uma variação de subtipos que são estabelecidos segundo condições específicas de campo e informações de projeto obtidas a partir da modelagem hidráulica. O critério para definição do subtipo é baseado, principalmente, nas seguintes informações:

- Altura do talude da calha, estimada no levantamento de campo realizado para cada área prioritária e não prioritária;
- Velocidade do escoamento estimada para a vazão com tempo de retorno de 10 (dez) anos, obtida a partir da modelagem hidráulica apresentada anteriormente. Nos trechos em curva a velocidade média obtida na modelagem (VM) foi majorada para as margens externas ou opostas à direção da curva (VE) e reduzida para as margens internas (VI), considerando a seguinte proporção: $VE=1,33VM$ e $VI=0,67VM$. (WATER MANAGEMENT BRANCH, 2000).

A descrição dos subtipos e os critérios associados estão apresentados a seguir na Tabela 23.

Tabela 23: Descrição e critérios para definição dos subtipos.

Tipo	Subtipo	Descrição	Critério de Projeto
A	A1	Talude revestido com biomanta; instalação de um retentor de sedimentos no pé do talude	$h \leq 1,5$ m
	A2	Talude revestido com biomanta; instalação de dois retentores de sedimentos no pé do talude	$h > 1,5$ m
B	B1	Talude revestido com enrocamento até 0,15 m acima do NA_{Q2} e biomanta até fim do talude ou NA_{Q10}	$V_{Q10} > 1,75$ m/s
	B2	Talude revestido com biomanta; instalação de um retentor de sedimentos no pé do talude	$V_{Q10} \leq 1,75$ m/s e $h \leq 1,5$ m
B	B3	Talude revestido com biomanta; instalação de dois retentores de sedimentos no pé do talude	$V_{Q10} \leq 1,75$ m/s e $1,5 < h \leq 2,5$ m
	B4	Talude revestido com biomanta; instalação de dois retentores de sedimentos no pé do talude e um retentor na altura do NA_{Q10}	$V_{Q10} \leq 1,75$ m/s e $2,5 < h \leq 5$ m

Tipo	Subtipo	Descrição	Critério de Projeto
	B5	Possível implantação de berma intermediária na altura do NA_{Q10} ; talude revestido com biomanta; instalação de dois retentores de sedimentos no pé do talude e um retentor na berma intermediária	$V_{Q10} \leq 1,75$ m/s e $5 < h \leq 7,5$ m
C	C1	Talude revestido com enrocamento até 0,15 m acima do NA_{Q2} e biomanta até fim dos taludes	$V_{Q10} > 1,75$ m/s
	C2	Taludes revestidos com biomanta; instalação de dois retentores de sedimentos no pé do talude	$V_{Q10} \leq 1,75$ m/s
D	D1	Preenchimento de ravinas com retentor de sedimentos	Identificação visual
	D2	Implantação de paliçada de madeira ou bambu em erosões na crista do talude	
	D3	Preenchimento de sulcos com retentor de sedimentos	
	D4	Preenchimento de concavidade erosiva no pé do talude com retentor de sedimentos	
	D5	Aplicação de semeio manual ou hidrossemeadura em áreas onde foram removidos galhos e troncos caídos	Identificação visual e $h \leq 1,5$ m
	D6	Aplicação de semeio manual ou hidrossemeadura em áreas de solo exposto com vegetação deficiente	
	D7	Implantação de um retentor de sedimentos no pé de talude revegetado que apresente rejeitos e risco de erosão	
	D8	Implantação de dois retentores de sedimentos no pé de talude revegetado que apresente rejeitos e risco de erosão	
E	-	Talude revestido com enrocamento até 0,5 m acima do NA_{Q10}	Identificação visual

Obs.: h: altura do talude na margem; V_{Q10} : velocidade do escoamento estimada para a vazão com 10 anos de tempo de retorno; NA_{Q2} : nível de água estimado para a vazão com 2 anos de tempo de retorno; NA_{Q10} : nível de água estimado para a vazão com 10 anos de tempo de retorno.

Os desenhos das seções tipo são apresentados no Anexo C deste documento.

5.3.3.5. Dimensionamento do Enrocamento

Para as seções tipo em que se faz necessária a implantação de enrocamento – B1, C1 e E – é realizado o dimensionamento do tamanho médio dos blocos (D50). O dimensionamento do D50 foi realizado segundo metodologia proposta no documento Hydraulic Design of Flood Control Channels do USACE (1994), conforme equações apresentadas a seguir.

$$D_{30} = S_f C_s C_v C_T d \left[\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^{1/2} \frac{v}{\sqrt{K_1 g d}} \right]^{2,5} \quad (\text{III})$$

Na qual:

D_{30} é o tamanho para o qual 30% das rochas são menores;

S_f é o fator de segurança, adotado igual a 1,1, que é o mínimo recomendado;

C_s é o coeficiente de estabilidade para falhas incipientes, igual a 0,3 para rochas angulares e 0,375 para rochas arredondadas;

C_v é o coeficiente de distribuição de velocidade vertical;

C_T é o coeficiente de espessura;

d é a profundidade do fluxo;

γ_w é o peso específico da água;

γ_s é o peso específico do solo;

v é a velocidade média do escoamento;

g é a aceleração da gravidade igual a 9,8m/s²;

K_1 é o fator de correção da inclinação do talude;

Sendo:
$$K_1 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}}$$
 (IV)

Na qual:

θ é a declividade do talude;

ϕ é o ângulo de repouso.

Uma vez calculado o D_{30} , o valor de D_{50} é obtido pela seguinte equação:

$$D_{50} = 1,25 \times D_{30} \quad (V)$$

O D_{50} mínimo a ser adotado no projeto foi definido igual a 300 mm (pedra de mão). Entende-se que abaixo dessa dimensão podem ocorrer vandalismos (ex: roubo, lançamento de rochas dentro do rio etc.). Por outro lado, o D_{50} máximo admitido foi de 850 mm. Além desses valores extremos foram definidos outros dois valores intermediários de D_{50} , totalizando quatro tipos de tamanho de rocha considerados no projeto de recuperação dos rios principais (Tabela 24).

Tabela 24: Diâmetro médio dos blocos de enrocamento adotados no projeto.

Tipo	D_{50} (mm)
I	300
II	450
III	650
IV	850

Assim, a partir das informações de profundidade do fluxo e velocidade do escoamento determinados na modelagem hidráulica para a vazão de 10 anos de tempo de retorno, o D50 é calculado segundo as equações 1 a 3, adotando-se o valor imediatamente superior disponível na Tabela 24. Para os trechos em que as características do escoamento demandam um D50 superior à 850 mm, a solução para proteção das margens requer uma intervenção específica não prevista nas seções tipo (ex: colchão reno, gabião), denominada de projeto de seção tipo “E” especial.

5.3.3.6. Bioengenharia

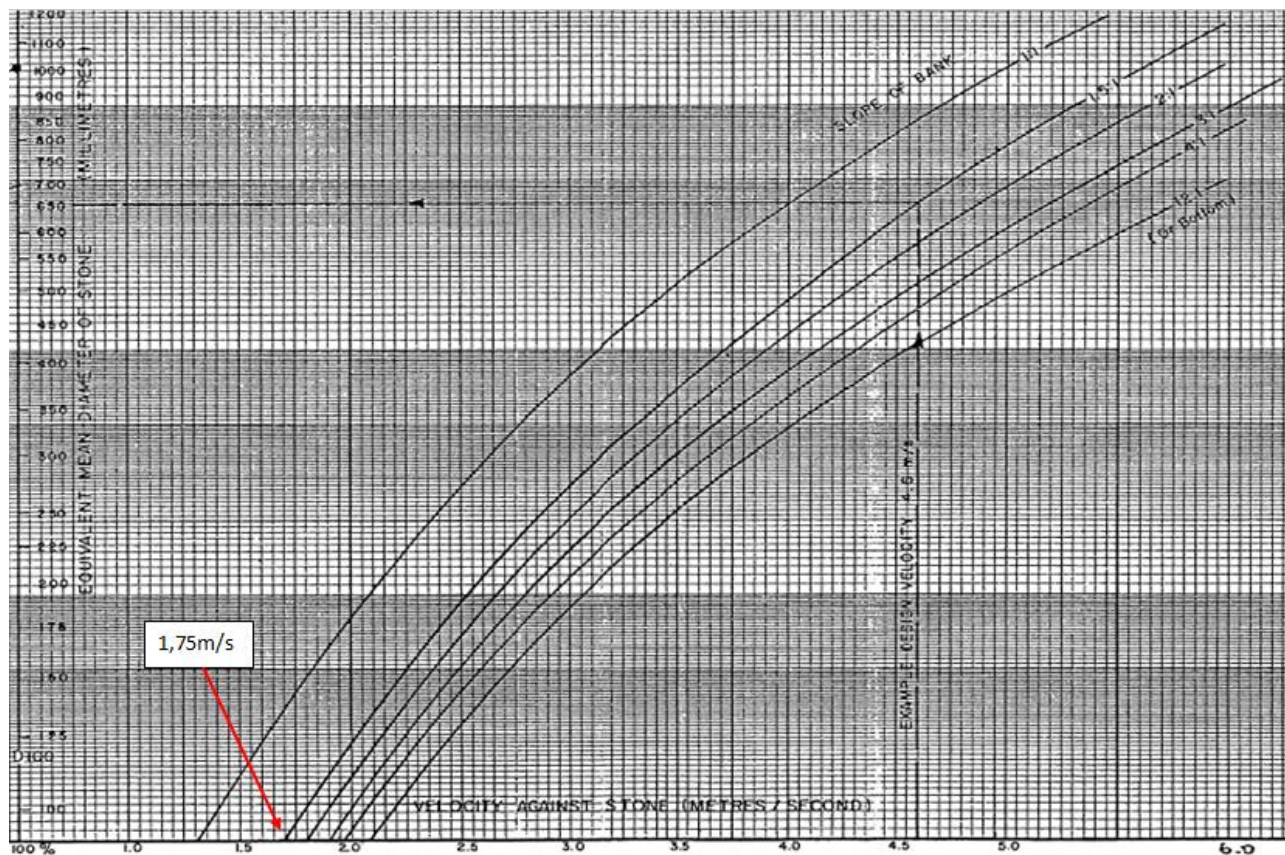
Bioengenharia é definida como a combinação de conceitos biológicos, mecânicos e ecológicos para controlar a erosão e estabilizar o solo através do uso de vegetação ou uma combinação dos mesmos e materiais de construção (USACE, 1997).

A velocidade de escoamento usualmente é o fator que limita e determina os tratamentos possíveis para a bioengenharia no controle da erosão em margens de rio. A publicação *Bioengineering for Streambank Erosion Control* estabelece como limite para utilização de bioengenharia velocidades entre 1,8 e 2,4 m/s (USACE, 1997).

De maneira geral, quando as velocidades são inferiores a 2 m/s, a maioria das técnicas de bioengenharia são capazes de estabelecer vegetação. Já a partir de 2 m/s as forças de tração que o fluxo do escoamento gera sobre as superfícies submergidas indicam a necessidade de utilização de técnicas que evitem o arraste do solo (erosão) e da vegetação, como a utilização de revestimento em enrocamento.

O gráfico apresentado na Figura 10 (WOODS, 1982) relaciona tamanho de enrocamento (eixo y) com velocidade de escoamento (eixo x) em função da inclinação do talude da margem. Neste projeto foi admitido talude com inclinação máxima de 1,5H:1V. Observando o gráfico, a curva 1,5H:1V intercepta o eixo da velocidade de escoamento no valor de 1,75 m/s. Isto indica que, para taludes com inclinação de 1,5H:1V, velocidades inferiores a 1,75 m/s dispensam o uso de enrocamento, podendo ser protegidos apenas com bioengenharia.

Assim, a velocidade de 1,75 m/s foi adotada como a máxima admissível para aplicação de biomantas e bioretentores como revestimento de proteção das margens dos rios principais.



Fonte: Woods, 1982.

Figura 10: Velocidade do escoamento x D50 para diferentes declividades de talude

5.3.3.7. Desenhos e tabela resumo

Os desenhos são a representação física dos resultados do projeto de recuperação dos rios principais. Além dos desenhos das seções tipo e especificações técnicas, para cada área prioritária foram produzidos:

- Plantas: apresenta a topografia local, eixo do canal, indicações das seções tipo por trecho, nível d'água para as vazões de 2 e 10 anos de tempo de retorno, APP, tributários, acessos e limite da área impactada;
- Tabelas resumo do dimensionamento: apresenta as estacas, coordenadas, níveis d'água para as vazões de 2 e 10 anos de tempo de retorno, seções tipo, tipo de proteção de pé e tamanho de enrocamento, e velocidades para as vazões de 2 e 10 anos de tempo de retorno.

No caso das áreas não prioritárias, além destes, foram produzidos desenhos indicando o sistema de drenagem superficial.

O nível de detalhe dos desenhos emitidos equivale a um projeto básico de engenharia, uma vez que faz uso de seções típicas. Considerou-se que este nível de detalhe é adequado ao projeto de recuperação dos rios principais uma vez que se trata de uma obra de recuperação ambiental e do caráter emergencial do trabalho.

Nesse contexto, alguma variação de projeto é permitida para refletir as condições de campo, sendo devidamente acompanhadas pelo ATO responsável. Eventuais desvios em relação ao projeto são registrados nos RDO e nos desenhos *As Built*.

5.4. Construção com acompanhamento de campo

O processo construtivo das intervenções foi realizado conforme as seguintes etapas:

- 1) Limpeza e conformação da área impactada;
- 2) Direcionamento das drenagens do escoamento superficial e instalação de medidas de controle de erosão;
- 3) Conformação de taludes da calha;
- 4) Aplicação de revestimento na calha – seções tipo;
- 5) Revegetação;
- 6) Cercamento para proteção da vegetação, quando possível e/ou necessário;
- 7) Monitoramento e manutenção.

As etapas de limpeza, remoção de rejeitos e conformação de taludes foram executadas com equipamento mecânico (escavadeiras) ou com trabalho manual (enxada), dependendo das condições de acesso.

Todas as obras de recuperação de rios principais foram executadas com acompanhamento técnico de obra (ATO). O acompanhamento foi realizado por engenheiros com formação nas áreas civil e/ou ambiental sob a supervisão de especialistas em recuperação ambiental de cursos d'água.

O acompanhamento técnico de campo das obras dos rios principais é importante devido à situação dinâmica do ambiente e permite otimizações de projeto. Os mapeamentos do levantamento de campo que embasaram o projeto ocorreram no final do período seco (setembro de 2016), época em que a vegetação se encontrava menos vigorosa. Com o início do período chuvoso, houve um desenvolvimento significativo da vegetação em alguns locais e parte das seções mapeadas anteriormente como margem exposta (Tipos A, B e C) foram reavaliadas para tipo D. Também houveram casos onde margens aparentemente estáveis durante o período de seca (setembro de 2016) passaram a apresentar feições erosivas durante a época de chuva devido ao aumento da vazão

do rio. Nestes casos, seções anteriormente mapeadas como tipo D, foram reavaliadas, geralmente, para tipo B ou E.

As medidas adotadas e os resultados alcançados com as ações de regularização das calhas e margens, bem como o controle de processos erosivos são apresentadas no Relatório de Recuperação dos Rios Principais, Anexo F deste documento.

As adequações ou otimizações de projeto são validadas com a supervisão de campo e com a equipe de projetos, e registradas no registro diário de obra (RDO). Sempre que possível os projetos foram revisados para refletir as adequações. Porém, dado o caráter dinâmico das obras, algumas alterações de projeto foram registradas somente no *As Built*.

5.5. As Built

Foram realizados levantamentos topográficos cadastrais de cada área com o objetivo de registrar as intervenções efetivamente implementadas na proteção de margens, bem como o sistema de drenagem e controle de erosão implementado nas planícies de inundação.

A elaboração dos *As Built* está em fase de conclusão, sendo assim, serão apresentados neste relatório somente os arquivos finalizados e aprovados. Tão logo finalizados estes serão disponibilizados na plataforma Webgis. No anexo H deste documento estão disponibilizados os *As Built* concluídos até o momento.

5.6. Monitoramento e manutenção

Após a execução das obras, inicia-se a fase de monitoramento e manutenção das intervenções. Assim como no caso dos tributários, as atividades de monitoramento estão inseridas em um programa mais abrangente visando atender à cláusula 194 do TTAC. Documentos específicos serão preparados para atender à cláusula 194, incluindo metodologia detalhada e resultados.

Assim como nos tributários, o monitoramento das obras dos rios principais tem basicamente duas vertentes:

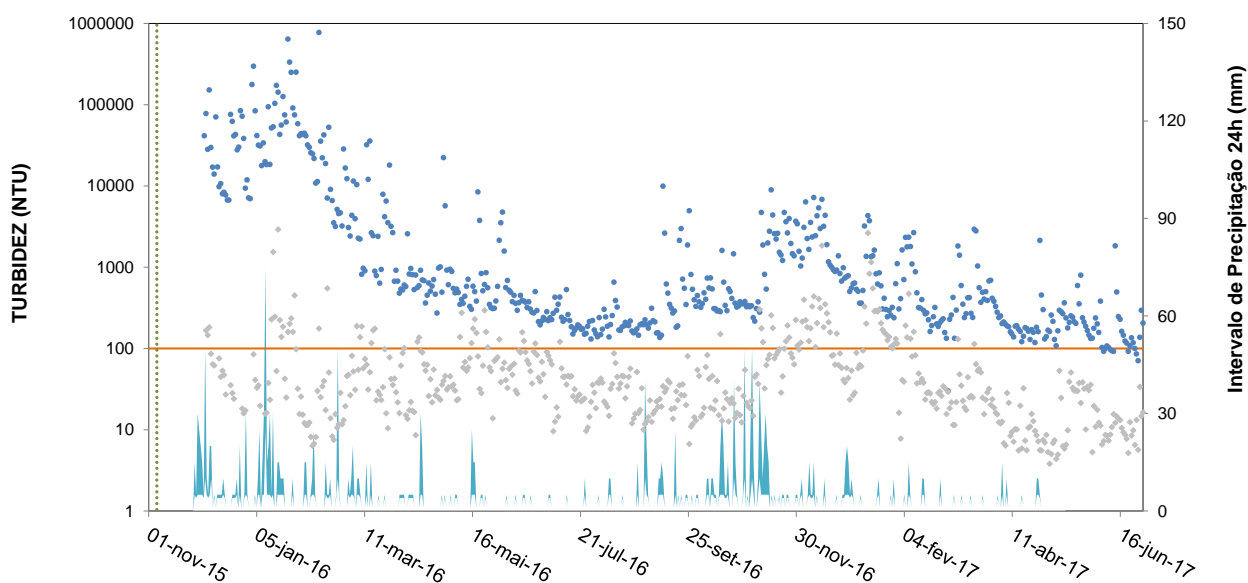
- Estabilidade de canais; e
- Qualidade de águas.

O monitoramento de estabilidade de canais é feito por meio de inspeções de campo e visa avaliar a integridade das contenções aplicadas. Durante o período de obras, que compreendeu a estação chuvosa de 2016/2017, poucos pontos apresentaram problemas de estabilidade ou erosão acentuada. Nestes locais é feita a recomposição da proteção, podendo incluir medidas mais robustas do que as aplicadas anteriormente.

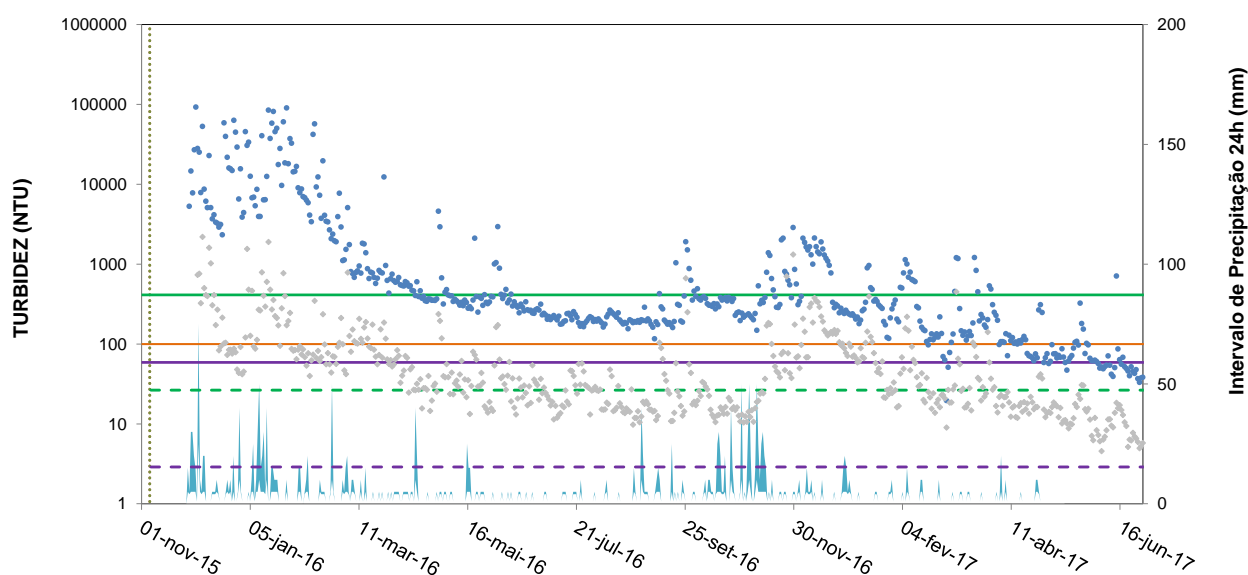
O monitoramento da qualidade da água dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce vem ocorrendo desde dezembro de 2015. A Figura 12 apresenta os valores de turbidez coletados diariamente em

pontos próximos à foz dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo. No intervalo apresentado (i.e., dezembro de 2015 a junho de 2017), é possível notar uma redução de pelo menos duas ordens de grandeza nos valores de turbidez do período chuvoso de 2015/2016 para o período chuvoso de 2016/2017. No período seco de 2016/2017 (junho de 2017) a turbidez esteve abaixo do padrão de qualidade aplicável para corpos de água classe 2 da Resolução CONAMA 357/2005, tanto no rio Gualaxo do Norte quanto no rio do Carmo.

RIO GUALAXO DO NORTE



RIO DO CARMO



Legenda:

- Ponto na foz (trecho afetado)
- ◆ Ponto não afetado
-Chegada estimada do pico de vazão devido ao rompimento
-Chegada estimada da pluma devido ao rompimento, baseado na turbidez
- Padrão de qualidade para água doce classe 2 (Resolução CONAMA 357/2005)
- - Percentil P5% de turbidez no período chuvoso dos dados do IGAM
- - Percentil P5% de turbidez no período seco dos dados do IGAM
- Percentil P95% de turbidez no período chuvoso dos dados do IGAM
- Percentil P95% de turbidez no período seco dos dados do IGAM
- Intervalo de precipitação na área (ONS)

Figura 11: Resultados do monitoramento diário de turbidez no rio Gualaxo do Norte e no rio do Carmo, de 30 de novembro de 2015 a 30 de junho de 2017.

6. Dispositivos de Drenagem e Controle de Erosão

6.1. Introdução

Os dispositivos de drenagem e controle de erosão são estruturas implantadas nas planícies de inundação das áreas impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão, e complementam os projetos de recuperação ambiental de tributários e de regularização de calhas e margens dos rios principais, apresentados nos itens 4 e 5, respectivamente. Enquanto os trabalhos nos tributários e rios principais têm como foco a erosão fluvial causada pelos cursos d'água, o foco dos dispositivos de drenagem e controle de erosão é a erosão pluvial, causada pela chuva.

O objetivo principal dos dispositivos de drenagem e controle de erosão é minimizar processos erosivos nas planícies de inundação das áreas impactadas pela deposição de material resultante do rompimento da barragem de Fundão. A filosofia do projeto consiste em:

- **Manter limpa a água limpa:** sempre que possível, o escoamento gerado em áreas naturais (não afetadas) a montante deve ser desviado das áreas das planícies de inundação afetadas. Devem ser implementadas canaletas de crista (de desvio) antes de realizar qualquer atividade na planície de inundação, devendo a descarga destas canaletas de crista ser controlada por meio de um dissipador de energia (por exemplo, bacia de dissipação em enrocamento) para evitar erosão;
- **Proporcionar drenagem superficial adequada:** o gerenciamento da drenagem das estradas de acesso existentes e áreas de planície de inundação afetadas deve ser feito por meio de estruturas de direcionamento de água desde a fonte até o ponto de descarga. Sempre que necessário, um revestimento protetor deve ser aplicado aos canais e canaletas. Elementos de dissipação de energia devem ser instalados quando necessário para assegurar a estabilidade física do sistema de margens fluviais e planícies de inundação e para limitar a erosão nos pontos de descarga;
- **Implementar Melhores Práticas de Gerenciamento (*Best Management Practices* - BMPs):** os projetos de drenagem devem seguir as melhores práticas de gerenciamento (BMPs) para oferecer a solução de melhor custo benefício que minimize o volume de efluentes contendo carga de sedimentos descarregados no rio. Além disso, cada ponto de

descarga no rio precisará ter uma estrutura de dissipação de energia para limitar a erosão. BMPs serão implementados também na superfície das planícies de inundação visando reduzir a erosão e maximizar a eficiência da retenção de sedimentos no local;

- **Estabelecer cobertura vegetal temporária e permanente.** Para limitar a erosão e as perdas de solo, sempre que possível será estabelecida uma cobertura vegetal em áreas de planícies de inundação afetadas. Serão utilizadas espécies de plantas de crescimento rápido para assegurar uma rápida recuperação. Futuramente, serão plantadas espécies nativas visando ao estabelecimento da vegetação permanente.

Os dispositivos de drenagem e controle de erosão utilizados na recuperação das planícies de inundação impactadas pelo evento foram:

- Canaletas com seções triangulares e trapezoidais em solo ou revestidas com biomantas antierosivas;
- Canais trapezoidais com diques de enrocamento (check dams) ou retentores de sedimentos;
- Leiras de proteção em nível;
- Cordões de contorno com retentores de sedimentos, feixes de galhadas e/ou capim Vetiver;
- Paliçadas de madeira ou bambu;
- Descidas em enrocamento;
- Dissipadores de energia.

Os desenhos típicos relativos às estruturas de drenagem são apresentados no Anexo D

6.2. Premissas e Critérios de Projeto

Apresentam-se a seguir as premissas e critérios de projeto para o controle de processos erosivos.

Premissas:

- Minimizar a erosão produzida pelo escoamento superficial nas áreas impactadas;
- Desviar o escoamento superficial “limpo” das áreas impactadas;
- Minimizar ou limitar novas movimentações de terra em áreas naturais (não impactadas);
- Implantar drenagem superficial adequada nas áreas impactadas;
- Revegetar todas as áreas impactadas;

- Monitorar as obras realizadas e reparar os pontos falhos até atingir estabilidade e integração com o ambiente de entorno.

Critérios de Projeto:

- Os dispositivos de drenagem superficial como canaletas, canais e descidas de água estão sendo projetados para um evento com tempo de retorno de 25 anos;
- As medidas de controle de erosão e sedimentação estão sendo projetadas para transportar a precipitação com tempo de retorno de 25 anos;

O tempo de retorno de 25 anos foi adotado conforme recomendação das melhores práticas internacionais, notadamente as diretrizes de Meio Ambiente, Saúde e Segurança da International Finance Corporation (IFC). Mais especificamente foram consultados os subitens Sediment mobilization and transport e Clean runoff management no item Soil Erosion da Seção 4.1 Environment (IFC, 2007a), e as diretrizes para o Setor de Mineração (IFC, 2007b).

De acordo com IFC, as estruturas de drenagem pluvial como canaletas, valas e canais devem ser protegidas contra erosão por meio de uma combinação de dimensionamento adequado, técnicas de limitação de declividade e utilização de enrocamento e revestimento. Estruturas de drenagem temporárias devem ser projetadas, construídas e mantidas para períodos de retorno de pelo menos 25 anos (IFC, 2007b). Além do dimensionamento para o tempo de retorno de 25 anos, também foi considerado no projeto o revestimento das estruturas (com enrocamento ou biomanta) e técnicas de limitação de declividade como Check Dams e retentores de sedimentos instalados dentro de canaletas.

Cabe ressaltar que não existe legislação brasileira ou normatização específica que defina critérios ou diretrizes de estudos hidrológicos e hidráulicos para planícies de inundação de cursos de água.

6.3. Revegetação

A fim de reduzir os processos erosivos foi realizada a cobertura vegetal de rápido crescimento sobre o material depositado nas margens dos cursos de água impactados.

O programa de revegetação adotado é considerado uma medida temporária de estabilização e controle de erosão. A vegetação definitiva será definida e implementada conforme uso futuro da terra, seja ele recomposição florestal ou agropecuário. Tais definições não são objeto da cláusula 160 do TTAC.

Para a sementeira inicial foram selecionadas espécies de germinação e crescimento rápidos em um mix de espécies gramíneas (para geração de biomassa) e leguminosas (para fixação de nitrogênio). As espécies foram selecionadas de modo a permitir o estabelecimento de uma futura sucessão ecológica da vegetação.

A compilação de sementes que poderiam ser utilizadas para a semeadura foi elaborada pelo especialista em recuperação ambiental Professor Doutor Ademir Reis da Universidade Federal de Santa Catarina. O mix foi composto de espécies herbáceas, arbustivas e lianas pertencentes às famílias botânicas das leguminosas (Fabaceae) e das gramíneas (Poaceae), disponíveis comercialmente no mercado. O mix foi preparado de forma a não incluir espécies que poderiam impedir o futuro desenvolvimento sucessional das comunidades arbóreas, ou de espécies invasoras tais como a braquiária (*Urochloa* spp) ou o capim gordura (*Melinis minutiflora*).

A lista final de espécies empregadas nos trabalhos de revegetação é apresentada na Tabela 25. Além dos nomes científicos e populares das espécies, apresenta-se também o hábito, ciclo de vida, estação e quantidade de sementes aplicada. Na composição do mix procurou-se utilizar uma variedade de espécies com diferentes ciclos de vida e época de germinação. Os diferentes ciclos de vida permitem que haja um enriquecimento de matéria orgânica no substrato pela morte e incorporação das plantas anuais e bianuais, porém sem que a área fique descoberta em função da presença das plantas perenes. As diferentes épocas de germinação também contribuem para que a cobertura vegetal seja permanente, além de permitir que os trabalhos de revegetação sejam realizados com sucesso durante o ano todo.

Tabela 25: Lista de espécies para revegetação

Família	Nome Científico	Nome Popular	Hábito ¹	Ciclo de vida ²	Estação ³	Kg/ha
Fabaceae (Leguminosae)	<i>Crotalaria</i> spp.	Chocalho de cascavel	H	An	V / I	30
	<i>Cajanus cajan</i>	Guandu	A	An	V	35
	<i>Pueraria phaseoloides</i>	Pueraria	L	P	V	25
	<i>Glycine wightii</i>	Soja-perene	L	P	V	10
	<i>Stylosanthes</i> spp.	Estilosante	H	P	V	25
	<i>Lupinus albus</i>	Tremoço branco	H	An	I	30
	<i>Vicia sativa</i>	Ervilhaca	L	An	I	25
	<i>Desmodium</i> spp.	Pega-pega	H	P	V	10
	<i>Trifolium repens</i>	Trevo-branco	H	An ou Bi	I	10
	<i>Lotus corniculatus</i>	Cornichão	H	P	I	10
	<i>Vigna unguiculata</i>	Feijão-miúdo	H	An	V	15
Poaceae (Gramineae)	<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo-forrageiro	H	An	V	20
	<i>Avena strigosa</i>	Aveia-preta	H	An	I	35
	<i>Cynodon dactylon</i>	Capim-vaqueiro	H	P	V	5
	<i>Lolium multiflorum</i>	Azevém	H	An	I	15
TOTAL (Kg/ha)						300

Legenda: ¹ H – herbáceo / A – arbustivo / L – liana; ² An – Anual / P – Perene / Bi – Bianual; ³ V – Verão / I – Inverno

Também foram listadas espécies para substituição em caso de indisponibilidade de sementes no mercado:

- Opções para substituição de leguminosas:

- ✓ *Crotalaria juncea* – crotalária;
 - ✓ *Centrosema pubescens* – centrosema;
 - ✓ *Canavalia ensiformis* – feijão de porco;
 - ✓ *Helianthus annuus* - girassol forrageiro (asteraceae).
- Opção para substituição de gramínea:
 - ✓ *Pennisetum americanum* – milheto.

6.4. Metodologia

A metodologia do projeto dos dispositivos de drenagem e controle de erosão consistiu basicamente em:

- Definir a localização e o tipo de estrutura;
- Delimitar a área de contribuição;
- Calcular a vazão de projeto;
- Dimensionar a estrutura; e
- Construir com acompanhamento de campo

Houveram pequenas diferenças nos trabalhos relativos aos sistemas de drenagem realizados nas áreas prioritárias e não prioritárias, ainda que a metodologia geral e as premissas e critérios de projeto sejam os mesmos. Basicamente, nas áreas prioritárias a definição do sistema de drenagem foi realizada em campo, com suporte da equipe de projeto (escritório). Já nas áreas não prioritárias a definição foi feita primeiramente pela equipe de projeto, com validação posterior da equipe de campo. Estas diferenças ocorreram devido às características das áreas prioritárias e não prioritárias e aos requisitos dos cronogramas de projeto.

Para definição do sistema de drenagem nas áreas prioritárias, os caminhamentos de drenagem foram identificados em campo, registrando-se as coordenadas geográficas dos mesmos. Conforme mencionado anteriormente no item 3.1.3, as planícies de inundação, típicas das áreas prioritárias, apresentavam feições erosivas (sulcos e ravinas) geradas pela erosão pluvial, formando redes de drenagem. Na implantação dos dispositivos de drenagem, procurou-se aproveitar estas “redes naturais” formadas após evento. Esta atividade foi sempre acompanhada do julgamento do engenheiro de campo. Por exemplo, nos casos onde os canais de erosão eram demasiadamente ramificados ou quando haviam canais paralelos em áreas muito próximas, foi feita uma otimização da rede aproveitando apenas os canais principais.

Cabe ressaltar que o relevo predominantemente plano das planícies de inundação das áreas prioritárias dificulta a definição do sistema de drenagem com base apenas na topografia. Além disso, para a maioria das áreas prioritárias, a topografia disponível data de fevereiro de 2016 (vide Tabela 16 no item 5.3.3.1), nem sempre refletindo a situação dos processos erosivos em curso na época das obras iniciadas em setembro de 2016.

Nas áreas não prioritárias os caminhamentos de drenagem foram identificados inicialmente na topografia, com apoio também de imagens aéreas após o evento. Cabe ressaltar que o relevo das áreas não prioritárias é geralmente mais acidentado do que nas áreas prioritárias, o que facilita a identificação dos caminhos de drenagem. Posteriormente estas drenagens foram validadas durante os levantamentos de campo realizados para o mapeamento de seções tipo relativo às margens.

Pelos motivos expostos acima, os desenhos de projeto das áreas prioritárias não indicam o sistema de drenagem, que aparece apenas no *As Built*. Já nas áreas não prioritárias, o sistema de drenagem foi incluído tanto nos desenhos de projeto quanto no *As Built*.

6.4.1. Elaboração de projeto

6.4.1.1. Vazões de Projeto

As vazões de projeto para o dimensionamento dos dispositivos de drenagem e controle de erosão implantados nas planícies de inundação foram calculadas segundo o método Racional. A adoção desse método se justifica pelo tamanho das áreas de contribuição envolvidas, sempre inferiores a 1,0 km².

As principais premissas e critérios adotados para o cálculo das vazões de projeto são apresentados a seguir:

- Metodologia: Método Racional conforme Tabela 12 (vide item 4.3.4.2.3 referente à fluviometria dos estudos hidrológicos realizados para córregos tributários);
- Tempo de retorno da chuva de projeto: 25 anos;
- Chuva de projeto: conforme Tabela 8 (vide item 4.3.4.2.1 referente à pluviometria dos estudos hidrológicos realizados para córregos tributários);
- Intensidade de projeto: foi adotada uma intensidade única igual a 142 mm/h, correspondente a uma chuva de 25 anos de tempo de retorno e 15 minutos de duração. A adoção de uma duração única da chuva foi realizado por questão de praticidade (isto é, dar maior celeridade ao dimensionamento dos dispositivos de drenagem e controle de erosão) e está coerente com o pequeno porte das áreas de contribuição associadas a essas estruturas;
- Coeficientes de escoamento superficial (C) adotados, considerando o tempo de retorno de 25 anos para a chuva de projeto:

- ✓ Áreas de vegetação densa: $C = 0,40$;
- ✓ Pastagens: $C = 0,46$;
- ✓ Áreas afetadas tomadas por rejeitos: $C = 1$;
- Delimitação das áreas de drenagem utilizando o pacote de hidrologia e sedimentologia SEDCAD 4.0 (Civil Software Design) e a topografia disponível conforme Tabela 16 (vide item 5.3.3.1).

6.4.1.2. Canais e canaletas

O dimensionamento das canaletas e canais de drenagem foi feito a partir da equação de Manning, a mesma utilizada no dimensionamento hidráulico dos tributários (vide item 4.3.4.3).

Para definição do revestimento de canaletas e canais considerou-se as seguintes velocidades máximas permissíveis:

- Canal de solo exposto = 0,6 m/s;
- Canal com vegetação = 1,2 m/s.

O coeficiente de Manning adotado variou de acordo com o revestimento previsto no canal:

- Canais com solo não revestido: coeficiente de Manning de 0,02;
- Canais com vegetação: coeficiente de Manning de 0,08.

6.4.1.3. Descidas em enrocamento

Descidas em enrocamento foram previstas nos locais de declividade acentuada, por exemplo, no talude da margem ou imediatamente a jusante da saída dos bueiros, sempre que a descarga é direcionada para um leito de rio natural passando por condições de fluxo supercríticas. As dimensões das descidas foram estimadas por meio do pacote SEDCAD versão 4.0, com base no método Simons/OSM (SIMONS, 1982) para o projeto de enrocamento.

6.4.1.4. Dissipadores de Energia

São necessários dispositivos de dissipação de energia ao final das descidas de enrocamento para reduzir a velocidade do fluxo para níveis não erosivos mediante a formação de um ressalto hidráulico, evitando assim erosão no ponto de descarga. O comprimento mínimo dos dispositivos de dissipação de energia foi estimado através da metodologia proposta no Manual de Hidráulica (BRATER et al., 1996) para estruturas trapezoidais.

6.5. Construção com acompanhamento de campo

Todas as obras de dispositivos de drenagem e controle de erosão foram executadas com acompanhamento técnico de obra (ATO). O acompanhamento foi realizado por engenheiros com formação nas áreas civil ou ambiental sob a supervisão de especialistas em recuperação ambiental de cursos d'água.

As medidas adotadas e os resultados alcançados com as ações de regularização dos dispositivos de drenagem são apresentadas dentro dos relatórios referentes à regularização de calhas e margens e controle de processos erosivos dos tributários e dos rios principais, respectivamente nos Anexos E F deste documento.

6.6. *As Built*

Foram realizados levantamentos topográficos cadastrais de cada área com o objetivo de registrar as intervenções efetivamente implementadas. Com essas informações foram preparados os desenhos dos projetos de *As Built*.

A elaboração dos *As Builts* está em fase de conclusão, sendo assim, serão apresentados neste relatório somente os arquivos finalizados e aprovados. Tão logo finalizados estes serão disponibilizados na plataforma Webgis. No anexo H deste documento estão disponibilizados os *As Built* concluídos até o momento.

6.7. Monitoramento e manutenção

Após a execução das obras, inicia-se a fase de monitoramento e manutenção das intervenções. As atividades de monitoramento estão inseridas em um programa mais abrangente visando atender à cláusula 194 do TTAC. Documentos específicos serão preparados para atender à cláusula 194, incluindo metodologia detalhada e resultados.

O monitoramento das obras do sistema de drenagem e controle de erosão tem os seguintes componentes:

- Vegetação;
- Sedimentação em estruturas de contenção; e
- Taxas de erosão em planícies de inundação.

O monitoramento de vegetação visa avaliar a germinação, percentual de cobertura vegetal e produção de biomassa das áreas revegetadas. Estes parâmetros fornecem uma medida indireta da efetividade das ações de revegetação no controle de processos erosivos. Quando verificados locais com baixa germinação ou percentual de cobertura vegetal, é feito o ressemeio das espécies do mix de sementes. Outras questões verificadas durante o monitoramento da vegetação são a presença de

gado nas áreas revegetadas, ações de plantio realizadas pelos próprios proprietários e integridade das cercas.

Estruturas de contenção de sedimentos foram construídas associadas aos dispositivos de drenagem e controle de erosão, tais como retentores de sedimentos e paliçadas. Nestas estruturas foram instaladas régua graduadas que possibilitam avaliar o acúmulo de sedimentos, inferir sobre sua eficiência e planejar manutenções e ações corretivas futuras.

Nas planícies de inundação foram implantadas parcelas com o objetivo de mensurar as taxas de erosão em decorrência das chuvas, sendo 4 parcelas na área 15, 4 parcelas na área 10 e 7 parcelas na área 7. Cada parcela apresenta declividade na direção de um único ponto no qual foi implantado um sistema de coleta do escoamento superficial que descarrega o escoamento em uma caçamba basculante. A caçamba basculante mede o fluxo de água proveniente da parcela de monitoramento. Parte do escoamento que passa pelas caçambas é direcionado para uma caixa coletora onde são coletadas amostras de água para análise de sólidos suspensos totais.

Nas parcelas construídas foram aplicados os tratamentos utilizados nas planícies de inundação para controle de erosão, como por exemplo revegetação, hidrossemeadura e retentores de sedimentos. Em cada conjunto de parcelas, manteve-se uma parcela controle, ou seja, sem revestimento. Junto das parcelas também foram instalados pluviômetros de modo que é possível correlacionar chuva com escoamento superficial. Com esse conjunto de dados é possível calcular as taxas de erosão (kg / ha / ano) e avaliar a efetividade dos tratamentos aplicados ao controle de erosão. O Anexo G apresenta os resultados da 1ª e 2ª campanhas de monitoramento.

7. Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Águas - ANA. *Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas*. Dados hidroclimatológicos. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: janeiro de 2016.

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

BRASIL. Lei No 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências.

BRATER, E.; KING, H.; LINDELL, J. e WEI, C. *Handbook of Hydraulics*, 7ª edição. 1996.

BRIGHETTI, G. *Estabilização e Proteção de Margens*. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2001.

CHAKRAVATI, I.M., LAHA, R.G. e ROY, J. *Handbook of Methods of Applied Statistics*. Volume I. John Wiley and Sons, p.392-394, 1967.

CHOW, V.T. *Open Channel Hydraulics*. Nova York: Mc Graw-Hill Book Company, 1959. 680p.

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. e MAYS, L.W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Editions – Civil Engineering Series. 1988. 572p.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB. *Drenagem Urbana: Manual de Projeto*. 3ª ed. São Paulo: CETESB/ACETESB, 1986. 464p.

FISRWG. *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices* – The Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 2001.

GOLDER ASSOCIATES. Mount Polley Mining Corporation Post-Event Environmental Impact Assessment Report – Key Findings Report. 2015

Golder Associates Brasil – GOLDER. Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão. Relatório Técnico RT-023_159-515-2282. Belo Horizonte, 2016(a).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Plano de Recuperação Ambiental. Relatório Técnico RT-002_159-515-2282. Belo Horizonte, 2016(b).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Levantamentos de Campo e Plano Inicial de Reabilitação. Relatório Técnico RT_001-159-515-2282. Belo Horizonte, 2016(c).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Vantagens e Desvantagens da Remoção de Rejeitos do Leito do Rio Gualaxo do Norte - Projeto de Recuperação Ambiental de Rios Principais. Memorando Técnico G006900-G-1RT087. Belo Horizonte, 2016(d).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Avaliação de Opções de Revestimento - Projeto de Recuperação Ambiental de Tributários. Relatório Técnico G006900-C-1RT127. Belo Horizonte, 2016(e).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Memorial Descritivo - Projeto de Recuperação Ambiental de Tributários. Relatório Técnico G006900-C-1RT009. Belo Horizonte, 2016(f).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Intervenção em Tributários Sem Acesso - Projeto de Recuperação Ambiental de Tributários. Relatório Técnico G006900-C-1RT129. Belo Horizonte, 2016(g).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Mudança de Alinhamento de Tributários - Projeto de Recuperação Ambiental de Tributários. Relatório Técnico G006900-C-1RT130. Belo Horizonte, 2016(h).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Diretrizes Gerais de Projeto - Projeto de Recuperação Ambiental de Rios Principais. Relatório Técnico G006900-G-1RT102. Belo Horizonte, 2016(i).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos - Projeto de Recuperação Ambiental de Tributários. Relatório Técnico G006900-C-1RT148. Belo Horizonte, 2017(a).

Golder Associates Brasil – GOLDER. Critérios de Projeto - Projeto de Recuperação Ambiental de Rios Principais. Relatório Técnico G006900-G-1RT100. Belo Horizonte, 2017(b).

HUFF, F. A. *Time distribution of rainfall in heavy storms*. Water Resources Research. v3, n.4. p1007-1019, 1967.

IFC - International Finance Corporation. Environmental, Health and Safety (EHS) Guidelines. General EHS Guidelines. 2007a.

IFC - International Finance Corporation. Environmental, Health and Safety (EHS) Guidelines. Mining. 2007b.

JAKOB, M. e P. JORDAN. 2001. Design flood estimates in mountain streams – the need for a geomorphic approach. Can. J. Civ. Eng. 28: 425–439.

LI, M.H. e EDDLEMAN K.E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach. 2002.

LIMA, A.A e NAGHETTINI, M.C. *ALEA - Análise de Frequência Local de Eventos Anuais*. Disponível em: <www.ehr.ufmg.br/?page_id=20>. Acesso em: janeiro de 2016.

Natural Resources Conservation Service – NRCS (antes Soil Conservation Service - SCS). *Urban hydrology for small watersheds*. United States Department of Agriculture. 1986.

Natural Resources Conservation Service – NRCS (antes Soil Conservation Service - SCS). *National Engineering Handbook*. Part 630 Hydrology. United States Department of Agriculture. 2010.

PINHEIRO, M.C. Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. Porto Alegre: ABRH, 2011. 308p.

ROSE, A.W.; Hawkes, H.E.; Webb, J.S. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Academic Press, 657p. 1979.

SILVEIRA, A.L.L. *Equação para os Coeficientes de Desagregação de Chuva*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p.143-147, outubro/dezembro, 2000.

SIMONS, D. *Surface Mining Water Diversion Design Manual*. U.S. Department of Interior, Office of Surface Mining, OSM/TR-82/2. 1982.

TEC3. *Determinação das vazões extremas nas áreas afetadas pela ruptura da Barragem do Fundão até a UHE Candonga*. Junho, 2016.

TUCCI, C.E.M. *Regionalização de Vazões*. Porto Alegre: Universidade/UFRGS, 2002. 256p.

United States Army Corps of Engineers – USACE. *Hydraulic Design of Flood Control Channels*. Washington, 1994.

United States Army Corps of Engineers – USACE. *Bioengineering for Streambank Erosion Control*. Vicksburg, 1997.

United States Army Corps of Engineers - USACE. *HEC-HMS: Hydrologic Modeling System*. Davis, 2001.

United States Army Corps of Engineers - USACE. *HEC-RAS: River Analysis System*. Davis, 2010

Water Management Branch. *Riprap Design and Construction Guide*. British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks. 2000.

WOODS, P.J. *Design and Construction of Rock Riprap Bank Protection*. British Columbia Ministry of Environment. Water Management Branch, 1982. 21p.

ANEXO A

- **Mapa de localização (link WEBGIS)**

Para acesso à plataforma Webgis é necessário que o usuário encaminhe e-mail para governaca@fundacaorenova.org, encaminhando, nome completo, e-mail e Instituição onde trabalha.

- **Shapefile**

ANEXO B

Desenhos Tipo – Córregos Tributários

ANEXO C

Desenhos Tipo - Rios Principais

ANEXO D

Desenhos Tipo - Dispositivos de drenagem e controle de erosão

ANEXO E

Relatório de Recuperação de Tributários

ANEXO F

Relatório de Recuperação de Rios Principais

ANEXO G

Resultado 1^a-2^a Campanha Monitoramento

ANEXO H

As Built