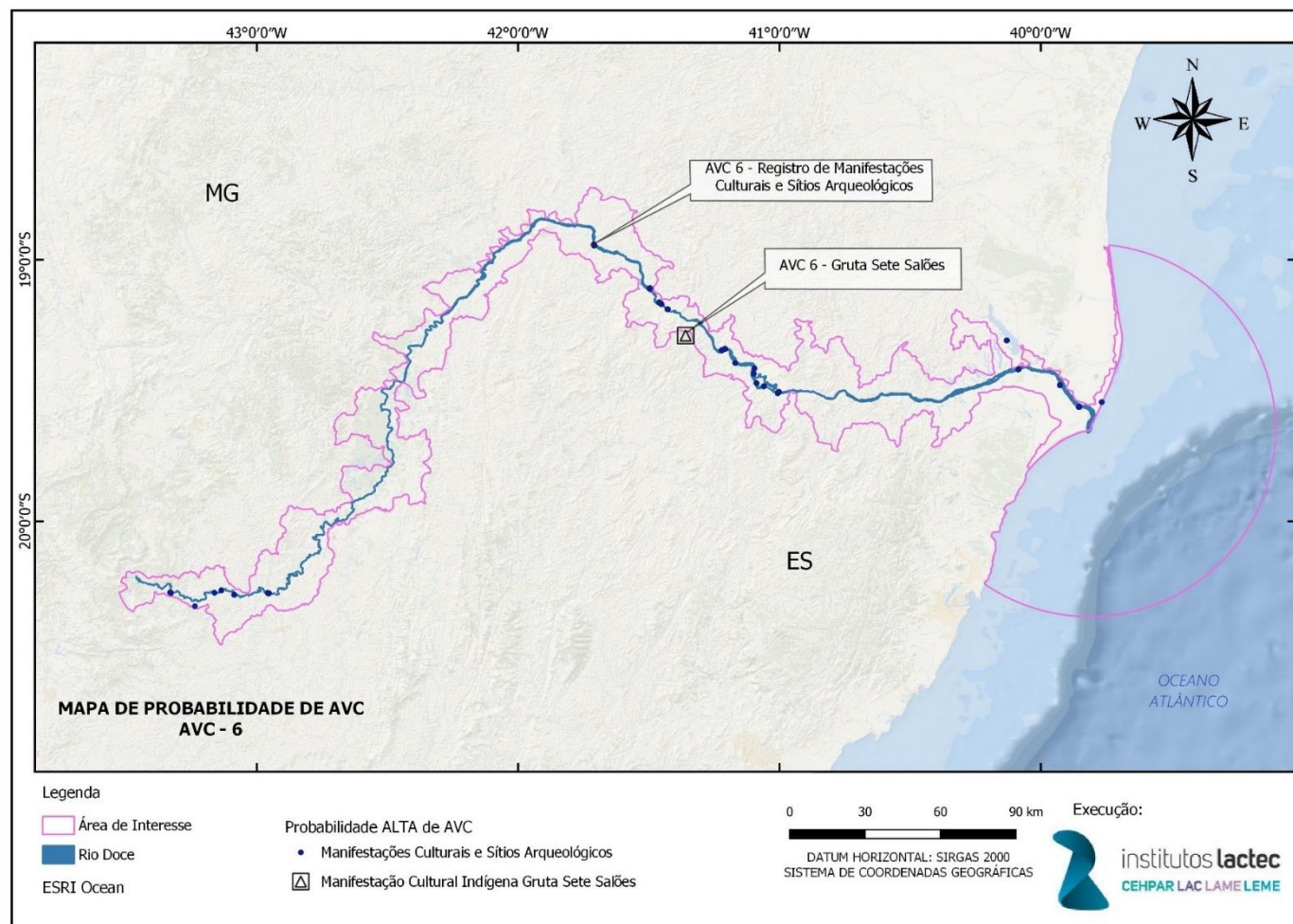


Figura 151 - Probabilidade de AVC 6.



Fonte: Lactec (2020).

9.5 ATRIBUIÇÃO DE NÍVEIS DE AMEAÇA

Além das ameaças já descritas e amplamente conhecidas para cada região, o desastre provocado pela ruptura da Barragem de Fundão provocou diversos danos ao longo dos trechos de rios no ano de 2015, muitos dos quais perduram até hoje, conforme identificados no diagnóstico. A análise aqui descrita e apresentada na Tabela 79 e na Tabela 80 concentrou esforços no aspecto fundamental de uma análise de AVC, que é manter os atributos de cada AVC analisado com base no prognóstico da área avaliada. Uma vez que o rompimento da barragem já ocorreu, a análise sobre os efeitos do rejeito não pode ser desconsiderada, mas fazem parte de um conjunto maior de ameaças que, coletivamente, influenciam os aspectos socioambientais da região de estudo. Nesse sentido, os danos do desastre somam-se às pressões antrópicas já existentes em toda região, potencializando efeitos negativos em diversos casos.

Para a análise de níveis de ameaça foram considerados os estudos produzidos nas diversas etapas do diagnóstico, desde a linha base, estudos pós-desastre, e diagnóstico dos danos. Tais informações são analisadas e avaliadas considerando os indicadores de AVC. Portanto, a matriz apresentada na sequência contém os danos aos indicadores de AVC afetados e sua respectiva classificação em termos de intensidade, vulnerabilidade, nível de ameaça e tendência. Todos os danos avaliados no diagnóstico foram também considerados nesta análise de ameaças. Para os danos aos ambientes terrestre e atmosfera, ambiente aquático continental e zona costeira e marinha, a classificação adotada foi baseada no pior cenário encontrado para aquele dano. Já para os danos ao patrimônio cultural, o critério adotado teve por base a classificação verificada no maior número de bens e/ou conjunto de bens. Esta definição baseia-se no princípio da precaução, assumindo-se que o pior dos cenários identificados deve ser aquele a ser considerado como maior risco aos atributos para conservação.

As análises das ameaças foram agrupadas em dois grupos: Geoambientais e Socioculturais. Assim, poder-se-á analisar os grupos de ameaças e riscos de forma integrada com o contexto de cada indicador avaliado nos resultados.

Tabela 79 - Análise de Níveis de Ameaças aos indicadores de AVCs 1 a 4.

Ameaça	Área/AVC Relacionado	Intensidade	Vulnerabilidade	Nível de ameaça	Tendência
Perda de cobertura vegetal nativa	Bento Rodrigues AVC 1, 2, 3, 4	Baixa	Média. Mesmo com vegetação vulnerável a queimadas (Ver resultados no Item 4.2.1), existe um grau de proteção das áreas por estarem inseridas no contexto de Unidades de Conservação. Presença de áreas de campo rupestre com alta resiliência a eventos de queimadas naturais. Mesmo considerando a presença na região de pesquisas minerais na ANM – Agência Nacional de Mineração a vulnerabilidade a ameaças e riscos é baixa tendo em vista o status de área inserida em um contexto de unidades de conservação de proteção integral.	MÉDIO	↑
	Parque E. Rio Doce AVC 1, 2, 3, 4	Baixa	Baixa. Vegetação menos vulnerável a queimadas e inserida em UC Estadual. Bom estado de conservação. Alta resiliência.	BAIXO	↔
	APAs Ipaba AVC 1, 2, 3, 4	Alta	Alta. Vegetação vulnerável a queimadas, inserida em UC de uso sustentável que permite práticas agropecuárias e vegetação fragmentada. Baixa resiliência. Existe tendência de ameaças crescentes ao longo do tempo considerando a falta de proteção legal efetiva. Não é verificado riscos de pressão por atividade minerária por não ser uma área de potencial geológico considerado importante para mineração.	ALTO	↑
	Região Sete Salões/Krenak AVC 1, 2, 3, 4	Alta	Alta. Apresenta vulnerabilidade ao fogo antrópico tendo em vista a tipologia vegetal (campos de altitude). Mesmo com vegetação vulnerável a queimadas, existe um grau de proteção das áreas por estarem inseridas no contexto de unidades de conservação. Áreas de campo rupestre com alta resiliência a eventos de fogos naturais. Mesmo considerando a presença na região de pesquisas minerais na ANM – Agência Nacional de Mineração, a vulnerabilidade a ameaças e riscos é baixa tendo em vista que a área faz parte de um contexto de áreas destinadas a conservação natural.	ALTO	↔
	Alto Mutum AVC 4	Alta	Alta. Região com topografia acidentada, cuja atividades agrícolas de grande porte são impeditivas. Entretanto, é uma região com alto potencial mineral, com expresso número de requerimentos minerários. A ameaça tem tendência de aumento tendo em vista o número de requerimentos minerários em uma área sem proteção legal.	ALTO	↑
	Degredo AVC 1,2,3, 4	Alta	Média. Vegetação menos vulnerável a queimadas, parcialmente inserida em áreas protegidas e vegetação fragmentada. Baixa resiliência. Área com grande pressão antrópica em relação a expansão urbana por meio de chacreamentos rurais.	ALTO	↑

Ameaça	Área/AVC Relacionado	Intensidade	Vulnerabilidade	Nível de ameaça	Tendência
	RPPN Bucão AVC 1, 2, 3, 4	Baixa	Baixa. A área faz parte de uma RPPN de Propriedade do Instituto Terra, cujo objetivo foi a restauração da área.	BAIXO	↔
	Costa do ES AVC 1, 2, 3, 4	Alta	Alta. Área com intensa pressão por atividades de loteamento devido a presença de região beira mar (ALVES, A. 2004; PADOVAN & LEDERMAN, 2004).	ALTO	↑
	Áreas Florestadas na AI	Alta	Alta. As demais áreas dentro do contexto da AI, sobretudo aquelas sem proteção legal em modalidades de UC estão sujeitas a ameaças relacionadas a pressão por conversão de uso de solo. Áreas com elevado grau de fragmentação. Os remanescentes são vulneráveis a atividades de mineração e a tendência da ameaça é de aumentar.	ALTO	↑
Caça/extrativismo em níveis que comprometem a viabilidade das populações de espécies endêmicas, raras ou ameaçadas no longo prazo	Bento Rodrigues AVC 1	Baixa	Baixa. Local inserido em UC Federal com extensas áreas de vegetação nativa em bom estado de conservação. Alta resiliência.	BAIXO	↔
	Parque E. Rio Doce AVC 1	Baixa	Baixa. Local inserido em UC Estadual com extensas áreas de vegetação nativa em bom estado de conservação. Alta resiliência.	BAIXO	↔
	APAs Ipaba AVC 1	Alta	Alta. Local inserido em UC de uso sustentável que permite práticas agropecuárias, coleta e uso dos recursos naturais. Vegetação fragmentada. Área com presença humana próxima em área não regulamentada em unidades de conservação com risco de pressão por caça ilegal. Baixa resiliência.	ALTO	↑
	Região Sete Salões/Krenak AVC 1	Baixa	Baixa. Local inserido em UC Estadual com extensas áreas de vegetação nativa em bom estado de conservação. Alta resiliência	BAIXO	↔
	Degredo AVC 1	Alta	Alta. Local parcialmente inserido em áreas protegidas e vegetação fragmentada. Baixa resiliência. Áreas sem controle de extrativismo vegetal em uma tipologia vegetacional frágil e rara: florestal aluviais e de tabuleiros (Ver resultados no Item 4.2.6). Área com presença humana próxima em área não inserida em unidades de conservação com risco de pressão por caça ilegal.	ALTO	↑
	RPPN Bucão AVC 1	Baixa	Alta. A vulnerabilidade foi considerada alta pelo fato da área não estar dentro de unidades de conservação de proteção integral, mas de uma RPPN. Entretanto, a intensidade de atividades de caça foi considerada baixa, pois a RPPN é uma	MÉDIO	↔

Ameaça	Área/AVC Relacionado	Intensidade	Vulnerabilidade	Nível de ameaça	Tendência
			propriedade do Instituto Terra, cujo objetivo foi a restauração da área.		
	Costa do ES AVC 1	Alta	Alta. A área da costa do ES recebe grande pressão por pesca e esse impacto tende a aumentar por não ter uma política de proteção a longo prazo do pescado (ICMBio, 2011).	ALTO	↑
Introdução/presença de espécies exóticas que causam competição com espécies endêmicas, raras ou ameaçadas	Bento Rodrigues AVC 1,2,3	Baixa	Baixa considerando que as atividades antrópicas na região estão relacionadas a aspectos não associadas a cultivos de espécies exóticas.	BAIXO	↔
	Parque E. Rio Doce AVC 1,2,3	Alta	Alta. O ecossistema lacustre sofre intensa pressão por pesca e introdução de espécies de peixes exóticos. Há registros de pesca ilegal no parque. O impacto da atividade de pesca é considerado alto e com riscos elevados em relação a soltura de espécies de peixes exóticos no ecossistema.	ALTO	↑
	APAs Ipaba AVC 1 e 3	Baixa	Baixa. Todo o entorno da área é composto por atividades agrícolas, embora não seja prognosticado riscos a espécies endêmicas, raras e ameaçadas.	BAIXO	↔
	Região Sete Salões/Krenak AVC 1 e 2	Baixa	Baixa considerando que as atividades antrópicas na região estão relacionadas a aspectos não associadas a cultivos de espécies exóticas com potencial para risco de espécies nativas.	BAIXO	↔
	Degredo AVC 1,2,3	Baixa	Baixa considerando que as atividades antrópicas na região estão relacionadas a aspectos não associadas a cultivos de espécies exóticas com potencial para risco de espécies nativas.	BAIXO	↔
	Costa do ES AVC 1, 3	Média	Alta. Um problema relevante na região de Linhares, na foz do Rio Doce, é a invasão de espécies marinhas/costeiras e também ao sul, principalmente em Aracruz, onde na última década foram construídos diversos portos e estaleiros (FERREIRA et al., 2006).	ALTO	↑
Contaminação da biota por conta de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)	Ameaça a todas as AAVC 1 identificadas ao longo da Bacia Hidrográfica	Alta	Alta. De acordo com o diagnóstico de danos (BRASIL, MPF/ LACTEC, 2020) há contaminação da biodiversidade em toda a cadeia trófica. A caracterização do rejeito da Samarco constatou a ocorrência de uma série de elementos potencialmente tóxicos, dentre os quais: ferro, alumínio e manganês em concentrações maiores; arsênio, cromo, cobre, chumbo, zinco, níquel, bário e cobalto, em concentrações menores; além de traços de cádmio, mercúrio, prata, antimônio, selênio e estanho.	ALTO	↑
Aumento dos processos erosivos	Bento Rodrigues AVC 4	Alta	Alta. Considerando o evento do rompimento da barragem, a região de Bento Rodrigues foi aquela com danos mais extensos, até mesmo além da calha da	ALTO	↑

Ameaça	Área/AVC Relacionado	Intensidade	Vulnerabilidade	Nível de ameaça	Tendência
por ações antrópicas diversas, assoreamento devido ao rompimento da barragem com formação de Tecnosolo na área de estudo (AI)			drenagem pluvial pela lama da barragem. Tal ação provocou degradação da barragem. A tendência da ameaça é aumentar, tendo em vista que os danos podem perdurar ao longo do tempo.		
	Parque E. Rio Doce AVC 4	Baixa	Baixa. A região do parque não registrou danos diretos provocados pelo desastre do rompimento da barragem. Essa área está inserida em uma unidade de conservação de proteção integral com ausência de atividades antrópicas que poderia gerar processos erosivos.	BAIXO	↔
	Região Sete Salões/Krenak AVC 4	Alta	Alta em virtude da quantidade de áreas com solo não protegido por vegetação nativa, aumentando o risco de degradação da bacia. A tendência do impacto é aumentar.	ALTO	↑
	Alto Mutum AVC 4	Alta	Alta em virtude da quantidade de áreas com solo não protegido por vegetação nativa em uma região com topografia acentuada, aumentando o risco de degradação da bacia.	ALTO	↑
	RPPN Bucão AVC 4	Baixa	Baixo pelo fato que a área está em uma região projetada para recuperação. A tendência que os riscos de erosão da bacia, especialmente a microbacia da área, tende a reduzir com o tempo.	BAIXO	↓
	Região Degredo AVC, 4	Alta	Alta. Local parcialmente inserido em áreas protegidas e vegetação fragmentada. Região formada por vastas áreas associadas a solos descobertos, fontes de erosão.	ALTO	↑
	Demais Áreas na AI	Alta	Alta. Região com alta vulnerabilidade tendo em vista tratar-se de uma região com elevado grau antropização, como presença de solos não protegidos por vegetação nativa.	ALTO	↑

Legenda: ↑ = Tendência de aumentar; ↓ = Tendência de diminuir; ↔ = Tendência de estabilizar

Tabela 80 - Análise de Riscos e Ameaças dos AVCs 5 a 6.

Ameaça	Área/AVC	Intensidade	Vulnerabilidade	Nível de ameaça	Tendência
Contaminação da biodiversidade e do pescado por	Uso do Território por Comunidades Indígena AVC 5	Alta	Alta. De acordo com o diagnóstico de danos (BRASIL, MPF/LACTEC, 2020) há contaminação da biodiversidade em toda a cadeia trófica. Rejeitos de mineração são particularmente preocupantes, especialmente devido à	ALTO	↑

Ameaça	Área/AVC	Intensidade	Vulnerabilidade	Nível de ameaça	Tendência
conta de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)	Uso do Território por Comunidades Quilombolas AVC 5		presença de elementos potencialmente tóxicos em sua composição. Considerando a massa específica média do material, estima-se que tenham sido liberados aproximadamente 86 milhões de toneladas de rejeito de mineração. A caracterização do rejeito da Samarco constatou a ocorrência de uma série de elementos potencialmente tóxicos, dentre os quais: ferro, alumínio e manganês em concentrações maiores; arsênio, cromo, cobre, chumbo, zinco, níquel, bário e cobalto, em concentrações menores; além de traços de cádmio, mercúrio, prata, antimônio, selênio e estanho. Assim, e devido ao aporte destes em função do desastre, é importante ressaltar a sua relevância quanto aos danos que podem causar, uma vez que dentre estes, arsênio, chumbo, bário, cromo, cádmio e níquel possuem toxicidade reconhecida. Porém, mesmo os elementos ferro, manganês, zinco e selênio, que são considerados essenciais para a manutenção dos organismos, podem apresentar toxicidade a partir de uma determinada concentração.		
	Povoados e Comunidades AVC 5				
	Demais Áreas na AI				
Redução da oferta de pescado	Uso do Território por Comunidades Indígena AVC 5	Alta	Alta. De acordo com o diagnóstico de danos (BRASIL/MPF/LACTEC, 2020) há contaminação do pescado ao longo de toda a bacia. Ao longo da cadeia trófica há risco de aumento da contaminação, aumentando nível de ameaça as comunidades que utilizam o pescado como fonte de renda ou proteína.	ALTO	↑
	Uso do Território por Comunidades Quilombolas AVC 5				
	Povoados e Comunidades AVC 5				
	Demais Áreas na AI				
Interrupção das práticas culturais em função dos danos da passagem da onda de lama	Uso do Território por Comunidades Indígena AVC 5	Alta	Alta. De acordo com os relatórios de Danos (BRASIL/MPF/LACTEC, 2020) há diversos impactos na prática cultural ao longo do trajeto da área de passagem e deposição de lama. Há risco de que essas práticas culturais sejam perdidas ao longo do tempo, sendo consideradas irreversíveis.	ALTO	↑
	Uso do Território por Comunidades Quilombolas AVC 5				

Ameaça	Área/AVC	Intensidade	Vulnerabilidade	Nível de ameaça	Tendência
	Povoados e Comunidades AVC5				
	Sítios Arqueológicos AVC 6				
Alteração das redes comunitárias e geração de sofrimento social em função dos danos da passagem da onda de lama	Uso do Território por Comunidades Indígenas AVC 5	Alta	Alta. As redes comunitárias, devido aos impactos provocados pela mudança na microeconomia local, recebem impactos elevados e tendem a ter a relação entre grupos que se compartilhavam economicamente e culturalmente tem riscos de serem perdidos ao longo do tempo.	ALTO	↑
	Uso do Território por Comunidades Quilombolas AVC 5				
	Povoados e Comunidades AVC5				
	Sítios Arqueológicos AVC 6				

Legenda: ↑ = Tendência de aumentar; ↓ = Tendência de diminuir; ↔ = Tendência de estabilizar

9.6 AVALIAÇÃO DE RISCOS E RECOMENDAÇÕES

O próximo passo no processo de triagem das AVCs é uma análise de risco para cada área potencialmente presente nessa paisagem. Os resultados desta etapa podem ser úteis para definição de ações de manejo na paisagem, dando ênfase na manutenção ou melhoria dos atributos socioambientais relevantes na definição das AVCs. Em última instância, é um exercício de priorização de ações baseado nas avaliações dos valores socioambientais e respectivas ameaças à sua manutenção.

Esta etapa também identifica lacunas de informação que devem ser abordadas para implementar estratégias eficazes de gerenciamento dos territórios e recursos. O nível de prioridade dado a determinada AVC e a ameaça a ela é uma função da probabilidade da sua presença e seu nível de ameaça. Aqui são apresentadas recomendações gerais e recomendações prioritárias na sequência: as recomendações gerais estão associadas a indicadores específicos das AVCs; as recomendações prioritárias foram produzidas considerando toda a bacia hidrográfica, incluindo regiões externas à AI, em virtude dos tipos de ações previstos para manutenção dos altos valores de conservação.

As regras de decisão para realizar esta análise são ilustradas na Tabela 81. A partir deste arcabouço analítico, tem-se que determinada estratégia deve endereçar primeiro as áreas identificadas com alta probabilidade da presença de AVCs e/ou alto nível de ameaça, para maximizar a efetividade das ações na manutenção, ou melhoria, dos atributos relacionados aos AVC.

Tabela 81 - Regra de decisão para derivar níveis de risco.

		Nível de ameaça		
		Baixo	Médio	Alto
Probabilidade da presença de AVC	Baixa			
	Média			
	Alta			

Níveis de prioridade são indicadas pelas cores:

Verde = Menor prioridade; Laranja = Média prioridade; Vermelho = Maior prioridade.

9.6.1 RECOMENDAÇÕES GERAIS DE GERENCIAMENTO E MANEJO

AVC 1

Foram identificadas sete áreas com alta probabilidade de presença de AVC 1: Bento Rodrigues e Gandarela, Parque Estadual do Rio Doce, APAs Ipaba, Sete Salões/Krenak, Degredo, RPPN Bulcão e Costa do Espírito Santo. Todos os demais setores geográficos da AI apresentaram baixa probabilidade de presença de AVC 1.

Quatro ameaças foram identificadas para esta categoria de AVC: i) perda de cobertura vegetal nativa, ii) caça e extrativismo de recursos naturais, iii) introdução de espécies exóticas e iv) a contaminação da biota por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT). A remoção da vegetação nativa quando da passagem da onda de rejeitos, somada à contaminação da biodiversidade que se seguiu, afetaram de forma significativa as áreas identificadas com alta probabilidade da presença de AVC1 ao longo da Bacia do Rio Doce. O rompimento da barragem provocou redução da área de vida da fauna pela supressão da vegetação nativa (com impactos mais significativos nas regiões de Bento Rodrigues e Gandarela, Parque Estadual do Rio Doce e as APAs Ipaba) e a contaminação da cadeia trófica por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) ao longo de toda a bacia, conforme apresentado na Matriz de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Os atributos de AVC identificados nas áreas atingidas pelo desastre foram danificados em diversos graus, muitos dos quais com perdas irreversíveis. O desastre, atualmente, é parte do histórico ambiental daquela paisagem, cujos efeitos passaram a ser reconhecidos para além da APDL e atingindo outras áreas com AVCs em potencial, assim como deixando efeitos duradouros (e ameaça continuadas) a outras potenciais áreas de AVC. Especialmente na região do Compartimento 1, e em virtude dos indicadores relacionados à AVC 1, a recomendação de atividades gira em torno da restauração dos ecossistemas da região, garantindo a melhoria dos atributos identificados como relevantes à determinação deste AVC.

A partir dos resultados da triagem e considerando a fragilidade dos indicadores de AVC identificados, associados à vulnerabilidade natural dos ecossistemas afetados pela onda de rejeitos, não é possível afirmar que o ambiente retornará às condições existentes antes do desastre. Há, inclusive, diversas previsões que indicam a impossibilidade de retorno às condições pré-desastre de forma satisfatória, no que diz respeito à biodiversidade. Essa conclusão está amparada na permanência de rejeitos de mineração nos ambientes que anteriormente não continham tais elementos nas concentrações atuais. É razoável admitir que a biota nesses locais não disponha de mecanismos biológicos naturais para eliminação desses resíduos, exigindo a realização de ações efetivas de restauração e monitoramentos de sua eficácia ao longo do tempo. A seguir, apresenta-se a análise de priorização com base na probabilidade da presença do AVC 1 e do nível de ameaça.

Perda de Cobertura Vegetal Nativa

Das sete áreas com alta probabilidade da presença do AVC 1, cinco foram classificadas com maior prioridade seguindo as regras de decisão da Tabela 81. São elas: Bento Rodrigues e Gandarela, APAs Ipaba, Sete Salões/Krenak, Alto Mutum, Degredo e a Costa do ES.

Caça/extrativismo

Das sete áreas com alta probabilidade da presença do AVC 1, três foram classificadas com maior prioridade e uma com média prioridade seguindo as regras de decisão da Tabela 81. São elas:

- a) Alta prioridade: APAs Ipaba, Degredo e a Costa do ES;
- b) Média prioridade: RPPN Bucão.

Introdução de Espécies Exóticas

Das sete áreas com alta probabilidade da presença do AVC 1, duas foram classificadas com maior prioridade seguindo as regras de decisão da Tabela 81. São elas: Parque Estadual do Rio Doce e a Costa do ES.

Contaminação da Biota por conta de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs)

A contaminação da biota por conta dos EPTs se deu por toda extensão da Bacia do Rio Doce, logo todas as sete áreas foram consideradas com maior prioridade, seguindo as regras de decisão da Tabela 81.

AVC 2

Foram identificadas quatro áreas com alta probabilidade de AVC 2 (Bento Rodrigues e Gandarela, Parque Estadual do Rio Doce, Sete Salões/Krenak e a Costa do ES) e três com média probabilidade (APAs Ipaba, Degredo e RPPN Bucão). A probabilidade da presença de AVC 2 no restante da área de interesse é considerada baixa. As ameaças são as mesmas das quatro listadas no AVC 1, porém aqui nesta seção são contextualizadas considerando as características do AVC 2.

Em relação aos efeitos a ecossistemas extensos a nível de paisagem, os efeitos da passagem da lama não são considerados altos para os indicadores desse AVC. Já o risco de queimadas, pode ser considerado potencialmente alto nos AVCs Bento Rodrigues e Gandarela e Sete Salões/Krenak, tendo em vista que são ambientes formados em parte por áreas com presença de vegetação campestre (campos rupestres), cuja predominância de gramíneas cria um ambiente potencializador de eventos de queimadas.

Em relação ao desmatamento, as áreas inseridas em Unidades de Conservação apresentam baixo nível de ameaça; já aquelas como a AVC Região Degredo, não inserida em áreas consolidadas como Unidades de Conservação de Proteção Integral, há risco alto de ações de desmatamento, embora não tenha sido registrado indicadores de risco elevados de ações de extrativismo insustentável nem introdução de espécies exóticas.

AVC 3

Foram identificadas cinco áreas com alta probabilidade de ocorrência de AVC 3 (Bento Rodrigues e Gandarela, Parque Estadual do Rio Doce, Sete Salões/Krenak, Região Degredo e a Costa do ES) e duas com média probabilidade (APAs Ipaba e RPPN Bulcão). As ameaças são as mesmas das quatro listadas no AVC 1, porém aqui nesta seção são contextualizadas considerando as características do AVC 3.

Em relação aos efeitos a ecossistemas e habitats ou refúgios da biodiversidade raros os danos provocados pela passagem da lama não são considerados altos. Considerando o risco de queimadas, estes são potencialmente altos nos AVCs Bento Rodrigues e Gandarela e Sete Salões/Krenak, tendo em vista os ambientes formados em parte por áreas com vegetação campestre (campos rupestres), cuja predominância de gramíneas cria um ambiente potencializador de eventos de queimadas.

Em relação ao desmatamento as áreas inseridas em Unidades de Conservação têm baixo nível de ameaça, já aquelas como a AVC Região Degredo, cuja área não está em Unidades de Conservação de Proteção Integral, há risco alto de ações de desmatamento, embora não tenha sido registrado níveis de risco elevados de ações de extrativismo insustentável nem introdução de espécies exóticas.

AVC 4

Foram identificadas cinco áreas com alta probabilidade de AVC 4 (Bento Rodrigues e Gandarela, Parque Estadual do Rio Doce, Sete Salões/Krenak, Região Degredo e a Costa do ES) e três com média probabilidade (APAs Ipaba, Região Alto Mutum e RPPN Bulcão) - (Seção 6.1). As ameaças principais a esta categoria de AVC são: i) perda de cobertura vegetal nativa e ii) aumento dos processos erosivos.

Em relação a serviços ecossistêmicos, é possível avaliar que por toda a calha dos rios ao longo da APDL, assim como em ambientes associados, foram detectados danos aos indicadores de AVC 4, em especial com relação à presença de rejeitos no leito do rio e na região costeira do Espírito Santo. Além de danos provocados pela turbidez, cuja ação é cíclica devido à sazonalidade da chuva, os efeitos para a comunidade aquática, sobretudo fitoplâncton e zooplâncton tem efeitos duradouro por todo o ecossistema aquático e ambientes associados.

Em relação às atividades antrópicas desenvolvidas na bacia foi possível avaliar que áreas com solos frágeis em ambientes com relevo acidentado (Sete Salões/Krenak e Região Alto Mutum) tem nível de ameaça alto pela combinação desses dois fatores. A manutenção de cobertura vegetal em todos os AVCs, inclusive políticas de zoneamento para conservação da cobertura vegetal, é considerada condição crucial para manutenção do serviço ambientais associados. A seguir, é apresentado a análise de priorização com base na probabilidade da presença do AVC 4 e do nível de ameaça.

Perda de Cobertura Vegetal Nativa

Segue a mesma priorização aplicada ao AVC 1.

Aumento dos Processos Erosivos

Das cinco áreas com alta probabilidade do AVC 4, apenas a região do Parque Estadual do Rio Doce apresenta média prioridade, todas as outras foram classificadas com maior prioridade, seguindo as regras de decisão da Tabela 81. Das três áreas com média probabilidade da presença do AVC 4, apenas a RPPN Bucão apresenta menor prioridade, as outras duas foram classificadas com maior prioridade.

AVC 5 e 6 - Socioculturais

Foram identificadas três áreas com alta probabilidade de AVC 5 e 6 (Uso do Território por Comunidades Indígenas - Krenak, Comboio e Tupiniquim -, Uso do Território por comunidade Quilombola Degredo, Sítios Arqueológicos e Manifestações Culturais) e uma com média probabilidade (Povoados e Comunidades) - (Seção 4.3). As ameaças principais a esta categoria de AVC são:

- i) Contaminação da biodiversidade e do pescado por conta de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT);
- ii) Redução da oferta de pescado;
- iii) Interrupção das práticas culturais em função dos danos da passagem da onda de lama;
- iv) Alteração das redes comunitárias e geração de sofrimento social em função dos danos da passagem da onda de lama.

Como todas as áreas possuem alta ou média probabilidade da presença do AVC 5 ou 6 e todas as ameaças foram consideradas com um nível alto de ameaça, ao seguir as regras de decisão da Tabela 81, todas as áreas foram consideradas com maior prioridade.

Apesar das lacunas de conhecimento em relação às necessidades individuais das comunidades e valores culturais presentes nas AVCs, os danos provados pelo rompimento da barragem afetaram de forma imensurável toda a cadeia socioeconômica e cultural ao longo dos trechos de APDL. Não somente comunidades ribeirinhas tiveram seus modos de vida alterados, do ponto de vista econômico, mas todas aquelas que de alguma forma possuem relação social e cultural com o rio Doce. Recomendações associadas aos indicadores específicos de AVCs estão relacionadas sobretudo à cadeia de valores culturais perdidos ao longo do tempo, que, porventura ainda podem ser resgatados e incentivados.

Em relação aos aspectos socioculturais, àqueles indicadores de AVC relacionados a bens

arqueológicos e arquitetônicos que sofreram danos provocados pelo desastre não retornarão às condições naturais sem a intervenção por processos de restauração, da mesma forma que danos aos indicadores de patrimônio imaterial precisam de acompanhamento contínuo para evitar danos permanentes.

9.6.2 RECOMENDAÇÕES ESPECÍFICAS DE GERENCIAMENTO E MANEJO

A seguir descrevemos as recomendações de gerenciamento e monitoramento, que foram produzidas considerando toda a bacia hidrográfica, mesmo áreas que não tenham sido citadas dentro do nível de estudo avaliado. De forma bem objetiva, resumimos as principais recomendações:

- Fortalecimento das Unidades de Conservação (UC) ao longo do rio Doce para possibilitar uma gestão territorial eficaz dos recursos naturais, especialmente aquelas mais vulneráveis à degradação ambiental (p.ex. as Áreas de Proteção Ambiental – APAs). Esse fortalecimento deve levar em conta a situação atual, a infraestrutura disponível, e os objetivos de cada UC, buscando melhorias tanto em termos de estrutura (para uso público e condução de pesquisas, qualificação do corpo técnico, equipamentos e recursos para fiscalização, criação de brigadas de incêndio) como de governança (regulamentação fundiária, elaboração e implementação dos Planos de Manejo, garantia de orçamento adequado à realidade e aos objetivos da UC, criação e participação ativa dos conselhos das UCs nas tomadas de decisão, engajamento com as comunidades do entorno e promoção de parcerias com universidades e centros de pesquisa para diagnóstico e monitoramento das AACV). Essas ações são fundamentais para o gerenciamento adequado de diversas áreas identificadas com alto valor de conservação.

- A restauração das matas ciliares do rio Doce e seus afluentes é fundamental para reduzir o assoreamento do rio e garantir a manutenção da qualidade da água. Apesar do rompimento da barragem ter provocado sérios danos que levaram ao assoreamento e piora da qualidade da água do rio Doce, a condição de degradação ambiental e falta de cobertura vegetal nativa na margem ciliar no rio Doce e seus afluentes ao longo da Bacia do rio Doce já era uma realidade antes do desastre. Nesse contexto, uma ação robusta de recuperação das áreas de mata ciliar do Rio Doce que sofreram danos por conta do rompimento da barragem e das Áreas de Preservação Permanente (APPs) das propriedades rurais localizadas próximas ao rio Doce e seus afluentes deveria ser desenvolvida e priorizada, no sentido de reduzir o processo de assoreamento do rio Doce e garantir a manutenção da qualidade da água. Essa medida é importante para o gerenciamento das áreas de AVC 4 identificadas ao longo da Bacia do rio Doce.

- Ampliar a oferta de assistência técnica para promoção de práticas agropecuárias sustentáveis e alternativas à indisponibilidade de pescados. Essas ações são necessárias para reduzir

a pressão do extrativismo insustentável nos remanescentes de vegetação nativa, reduzir o número de queimadas por ações antrópicas que podem causar sérios danos à vegetação nativa e comprometer sua resiliência e mitigar os efeitos negativos da introdução de espécies exóticas invasoras. Através da adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis pelas comunidades que vivem no entorno do rio Doce, é possível promover melhor diversificação da produção agropecuária para fins de subsistência e geração de renda através dos Sistemas Agroflorestais ou da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, por exemplo. Alterar práticas culturais de preparo do solo, com uso da queimada, priorizando uma abordagem agroecológica, ao tempo em que se capacitam as comunidades no uso e manejo de espécies exóticas, para que as mesmas não ofereçam riscos de se tornarem invasoras. Estas ações contribuem diretamente na mitigação das principais ameaças aos AVCs identificados na área de estudo, além de fomentar a melhoria da qualidade de vida dos atingidos.

- **Resgate e valorização de práticas culturais dos povos tradicionais.** O rompimento da barragem trouxe danos imediatos nas práticas culturais de diversas comunidades ao longo do rio Doce, que tinham como característica uma forte conexão com o rio e seus recursos. Em função desta situação, é recomendado um trabalho cuidadoso de manutenção e resgate de práticas culturais tradicionais juntos às comunidades atingidas, assim como a revitalização de espaços culturais que sofreram danos para que, ao longo do tempo, seja viável a manutenção das redes comunitárias e redução do sofrimento social em função do desastre. Essas medidas são fundamentais para o gerenciamento das áreas identificadas como AVC 6.

- **Melhoria do entendimento sobre a relação dos povos tradicionais e comunidades rurais com os recursos naturais ao longo da Bacia do rio Doce.** Apesar da pequena disponibilidade de dados e informações sobre os aspectos ambientais e socioeconômicos da Bacia do rio Doce, foi identificada uma lacuna ainda maior de informações sobre a relação das comunidades localizadas próximas ao rio Doce com seus recursos naturais, que pudessem subsidiar a avaliação da probabilidade da presença de AVCs 5. Informações quali-quantitativas como quais recursos são fundamentais para atender as necessidades básicas dessas comunidades, em relação à alimentação, uso de água e manutenção da saúde não se encontram disponíveis, mas são fundamentais para assegurar o gerenciamento eficiente das áreas de AVC 5.

10 ANÁLISE INTEGRADA

Após a entrega do Relatório de Diagnóstico dos Danos Socioambientais (BRASIL(MPF)/LACTEC (2020b-h), com a continuidade dos trabalhos em laboratório, bem como com a evolução e desdobramentos dos danos previamente diagnosticados, novos danos ao meio ambiente foram identificados. Além disso, para certos danos, apesar de identificados, na ocasião do diagnóstico, não havia sido possível mensurá-los em virtude de sua escala temporal. Desse modo, o presente documento apresentará uma análise integrada atualizada sobre a perspectiva dos aspectos físicos, químicos e biológicos do desastre da Samarco. Tal análise foi desenvolvida a partir dos mesmos conceitos relativos às ciências e química ambientais, abordados no estudo que efetuado juntamente ao diagnóstico de danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), porém, dividida em dois tópicos norteadores.

No primeiro tópico, que constitui a parte introdutória, foi dado o enfoque ao resumo dos resultados do diagnóstico em si, os quais foram detalhados nos diversos tomos que compuseram os relatórios entregues no ano de 2020 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b-h). Ainda, foram contemplados outros documentos predecessores deste, entre os quais se destaca a qualificação e a quantificação de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) em pescados provenientes da área de proibição de pesca (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020l), o Terceiro Relatório Parcial de Resultados, contemplando os estudos de análise da Cheia de 2020 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i), tal qual o parecer técnico n° 31 sobre a área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão ao longo dos rios afetados – APDL 2016 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020m). Na segunda parte procedeu-se, especificamente, o acompanhamento dos danos. Neste sentido, com base na análise temporal e, a partir das novas análises realizadas, foi realizada a revisão da interpretação dos resultados obtidos, tal qual a conclusão do diagnóstico de danos. Ressalta-se que o detalhamento dos mesmos está nos tomos específicos que compõem este relatório, e que aqui são apenas citados, de maneira sucinta, para compreensão das interligações entre os temas.

10.1. REVISÃO DO CONTEXTO DO DESASTRE DA SAMARCO E DO DIAGNÓSTICO DOS DANOS SOCIOAMBIENTAIS

O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido no dia 05 de novembro de 2015 resultou no extravasamento de 44 milhões de m³ de rejeito de mineração, representando um dos maiores desastres ambientais mundiais. O desastre afetou os ambientes Aquático Continental, Terrestre, Atmosfera, Zona Costeira e Marinha, além do Patrimônio Cultural, Bens Materiais e Imateriais, ocasionando mais de 90 danos socioambientais os quais foram diagnosticados e classificados entre reversíveis e irreversíveis e, com diversas escalas de gravidade (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b).

caracterizando uma condição sem precedentes em termos de extensão espacial e temporal. O levantamento da complexidade dos efeitos advindos do desastre demandou um amplo estudo científico, pautado nas melhores técnicas para a identificação e a mensuração destes danos, o que acabou por gerar um grande volume de dados, relacionados a pesquisas bibliográficas, levantamentos de campo, modelagens e análises laboratoriais pré e pós-desastre (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b-h).

Reconhecidamente, entende-se que o estado de Minas Gerais, em decorrência das atividades extrativo-minerais, apresenta histórico, bem como importantes fontes ambientais de emissão/liberação EPTs ao meio ambiente, tais como os elementos Fe, Mn, As, Pb, Zn, Cu, Sb e Ag (GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; PALMIERI, 2006; VAREJÃO, 2008; COSTA et al., 2010; RHODES, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014). Especificamente a cabeceira do rio Doce, a Mina Alegria e o Complexo de Germano, onde está localizada a barragem de Fundão, estão inseridos no Quadrilátero Ferrífero (QF), área de fundamental importância para a mineração nacional, pois representa uma anomalia geoquímica, devido à complexidade de espécies químicas presentes no local.

Do mesmo modo, a bacia hidrográfica do rio Doce (BHRD) já era marcada pela grande ocupação humana, crescimento desordenado, uso inadequado do solo, intensa atividade industrial e minerária, além de uma agropecuária extensiva, o que contribuiu (e ainda contribui) para que diferentes danos ambientais assolassem a região, especialmente com significativo prejuízo às áreas de mananciais, várzeas e rios (ANDRADE, 2003; ALMEIDA et al., 2004; RAMOS, 2005; BRASIL, 2006; QUEIROZ, 2006; ÁVILA; MONTE-MÓR, 2007; GUIMARÃES, 2007; VAREJÃO, 2008; VIOLA, 2008; MORAIS, 2009; CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010; RHODES, 2010; SILVA, 2010; LIMA E SILVA et al., 2013; CBH-DOCE, 2014; PARREIRAS, 2014a, b; GUEDES et al., 2015; LIMA 2016; QUEIROZ et al., 2017). O rio Doce, objeto mais específico dos estudos, foi considerado o quinto rio mais poluído do Brasil (JACOB, 2016) e sua bacia apontada como a mais degradada de Minas Gerais (PARREIRAS, 2014a). Assim, o reconhecimento da complexidade ambiental dos ecossistemas ocorrentes na região, tal qual o levantamento pretérito da eventual ocorrência de espécies químicas naturais locais ou oriundas de atividades antrópicas, foi de fundamental importância para que fossem diagnosticadas as reais consequências do desastre. Os relatórios referentes à Linha Base, elaborados a partir de dados históricos secundários, foram desenvolvidos visando a caracterização pretérita da área e serviram como balizadores do diagnóstico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017a,b; 2019a,b,c,d).

O trabalho seguiu com o desenvolvimento de estudos complementares, relacionados ao levantamento de dados secundários das matrizes ambientais, para o período subsequente ao desastre (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2018a,b). Em paralelo o rejeito de mineração do Complexo de Germano e da barragem de Fundão, tal qual aquele depositado a montante e a jusante da barragem de Santarém, em seu trecho até a UHE Risoleta Neves foi caracterizado (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2018f). Este material, conforme caracterização físico-química efetuada (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), apresentou

composição química elementar similar à rocha minerada da mina Alegria, sendo predominantemente composto por Fe, Al e Mn, em concentrações da ordem de 10^3 mg/kg a 10^6 mg/kg; As, Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, Ba e Co, em teores da ordem de 10^2 mg/kg; além de Cd, Hg, Ag, Sb, Se e Sn, em concentrações da ordem e inferiores a 10^{-1} mg/kg. No rejeito, além de EPTs, foi constatada, especificamente para parte das amostras coletadas nas barragens de Germano e de Fundão e nas margens do córrego Santarém, a ocorrência de fenóis e fenóis clorados, em concentrações variáveis de 0,98 mg/kg a 69,28 mg/kg. A ocorrência dessas substâncias, também foram descritas por outros autores em materiais com características similares (BASTOS, 2013; FRANCO et al., 2014; BATISTA et al., 2016). Além disso, pelo levantamento bibliográfico efetuado (CASTRO, 2012 *apud* RABELO, 1994; PEREIRA, 2004; LOPES, 2009), foram associadas ao processo de beneficiamento de minério de ferro, nas etapas de concentração do material e dispersão das partículas, como agentes quelantes, embora estudos anteriores, como a documentação referente ao licenciamento ambiental das barragens, não indicassem a utilização de produtos desta natureza no processo produtivo da Samarco ou mesmo a ocorrência de tais espécies químicas no rejeito oriundo das barragens de Germano e de Fundão (GOLDER 2016a-b, BRANDT, 2005, FUNDAÇÃO RENOVA, 2018).

Após dois anos de trabalho o diagnóstico de danos, também baseado nos resultados obtidos para a caracterização do rejeito de mineração, foi finalizado e entregue. O documento denominado “Diagnóstico de danos” foi, na verdade, dividido por temática em cinco tomos e 7 volumes: Contextualização (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b); Ambientes Aquáticos Continentais (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c); Ambiente Terrestre e Atmosfera (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d); Zona Costeira e Marinha (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e), bem como Patrimônio Arqueológico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f), Cultural Material (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020g) e Imaterial (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020h). O referido diagnóstico reforçou o impacto do aporte da lama de rejeito, a interrelação entre os compartimentos ambientais e a necessidade de análises periódicas para acompanhamento das ações dele decorrentes, ao longo do tempo.

A análise dos resultados apresentados permitiu afirmar que os ambientes foram alterados profundamente, especialmente no momento imediato após o desastre, sendo o trecho que sofreu danos mais intensos e agudos aquele localizado entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves. Nesse trecho, intitulado como Compartimento 1 (ou C1), a onda de lama passou com tamanha força e volume que acabou por destruir e descaracterizar tudo o que havia pela frente, dentro e fora da calha do rio. Organismos da flora e da fauna morreram pela força mecânica, pelo soterramento ou por asfixia. Houve supressão de uma parte importante da vegetação, fato que potencializou outros efeitos do desastre nesses ambientes, como alterações no solo e nos animais que viviam e dependiam das áreas vegetadas. Ainda, nesse Compartimento (1), foi onde ficou retida a maior parte do rejeito, que passou a ser disponibilizado ao ambiente periodicamente. Para além do Compartimento 1, os danos

estiveram concentrados especialmente na calha do rio Doce, ao longo do qual a parte do material oriundo do desastre que transpôs a barragem da UHE Risoleta Neves se dispersou, chegando até o estuário e oceano. Esse fato resultou, juntamente com a contaminação por EPTs, na diminuição acentuada da qualidade dos habitats (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b-e). Essas alterações geraram danos aos ecossistemas, tanto naturais quanto modificados, incluindo unidades de conservação e outras áreas naturais protegidas e, em consequência, nas funções ecológicas e nos benefícios providos por eles aos seres humanos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b-e).

Nos rios, o efeito imediato do desastre foi a alteração da qualidade das águas, além da mortandade de toneladas de peixes e de outros organismos ali presentes. Tanto no ambiente aquático quanto no terrestre esse comprometimento da qualidade ambiental prejudicou, e continua a prejudicar, os organismos que sobreviveram a passagem da onda de lama ou as novas gerações que passaram a ocupar as áreas afetadas, haja vista a alteração das propriedades físicas e, principalmente, o tempo de permanência dos EPTs oriundos do rejeito ou disponibilizados do sedimento. O mesmo ocorreu no ambiente costeiro e marinho, onde se observaram danos crônicos e a degradação da qualidade dos habitats, inclusive para espécies ameaçadas de extinção (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c,e).

Os danos ao patrimônio cultural e bens arqueológicos (materiais e imateriais) foram os mais afetados pelos efeitos mecânicos do desastre, pois, aqueles que não foram soterrados passaram a apresentar perturbação de camadas sedimentares a estas associadas, alterando a sua estabilidade original. Ademais, sobre estes, ocorreu também a influência das ações emergenciais/reparatórias, relacionadas à pressão acarretada aos bens edificados, móveis e paisagísticos por conta da circulação de maquinários. Além disso, tais ações também suscitaram tensões e disputas nas comunidades, as quais foram somadas as dúvidas quanto ao que seria do futuro, gerando insegurança e sofrimento social, especialmente relacionado ao “medo da água” (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f-h).

Em resumo, com o espalhamento do rejeito ao longo de toda a Área de Passagem e Deposição da Lama (APDL) e da pluma de sedimentos no mar, os diferentes compartimentos ambientais foram danificados e, portanto, passaram a apresentar prejuízos à manutenção dos serviços ecossistêmicos por eles efetuados. Do mesmo modo, danos significativos ocorreram aos bens arqueológicos e culturais. No que diz respeito, especificamente, ao aporte de EPTs notou-se a ocorrência e maior disponibilidade de diferentes espécies químicas, independentemente da matriz analisada, as quais ainda encontram-se presentes nos diferentes compartimentos, estando esses, e os organismos a eles pertencentes, sujeitos a presença e toxicidade desses elementos cujas dinâmicas são altamente dependentes da variação nos parâmetros abióticos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b).

Desse modo, no caso de danos caracterizados como graves/gravíssimos e irreversíveis ou para aqueles onde não existe plena certeza científica sobre a magnitude e a reversibilidade sugeriu e

sugere-se fortemente o investimento em medidas de controle para evitar maior degradação ambiental e riscos à saúde humana (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b).

Até o fechamento do diagnóstico, porém, não havia ocorrido nenhum grande evento de precipitação, com exceção daquele de janeiro de 2016 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i), que devido a ressuspensão e remobilização dos rejeitos depositados, promoveu novamente um elevado aumento da concentração de EPTs e da turbidez no rio Doce. Este fato, verificado pelas análises de concentração de sedimentos e qualidade de água, levou à definição da área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão, a jusante da UHE Risoleta Neves, pela abrangência espacial do território afetado pela cheia de janeiro de 2016. Este estudo foi baseado em medições diretas de levantamento de cotas da lama depositada nas margens, avaliação *in loco* de marcas nas encostas e árvores e, principalmente, através de imagens de satélite e ortoimagens (Compartimento 1), associada às modelagens hidrodinâmicas (Compartimentos 2 a 4 – trecho correspondente entre a UHE Risoleta Neves e o estuário do rio Doce). Os resultados obtidos estimaram uma área de deposição e passagem da lama total de 922,8 km², desde Fundão, em Mariana (MG), até a foz do rio Doce, em Linhares (ES), passando por 43 municípios em Minas Gerais e no Espírito Santo (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

No início de 2020, um novo pico de pluviosidade na região provocou a ocorrência de mais um evento de cheia no rio Doce. Este, demandou uma investigação emergencial sobre os potenciais danos socioambientais relacionáveis ao rompimento da barragem de Fundão e que pudessem ter sido ampliados ou magnificados. Os resultados obtidos foram apresentados em um documento específico, o qual contém uma avaliação geral das alterações provocadas, a partir de informações compiladas, com base em estudos de campo, de levantamentos planialtimétricos, avaliações hidrometeorológicas e atmosféricas, além de dados analíticos referentes aos resultados de amostras de água, de solos e de sedimentos. Concluiu-se que a cheia de 2020 foi um evento relativamente atípico e, por consequência, provocou alagamentos, inundações, ressuspensão e deposição de sedimentos e materiais correlatos aos rejeitos de Fundão em diversas áreas, sendo todos os compartimentos afetados, mas, sobretudo, os C2B e C3, compreendidos entre a UHE Mascarenhas e a foz do rio Doce, que passaram a apresentar uma contaminação elevada de As, Fe, Mn, Pb, Co, Cu, Sr e Ni (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

Em linhas gerais, os resultados indicaram que, pelas observações realizadas *in loco*, imediatamente após as chuvas, todos os pontos analisados aparentavam turbidez da água superior, comparativamente às campanhas anteriores, embora inferiores à condição imediatamente após o desastre. As análises em si, avaliadas comparativamente com os dados de pré e pós desastre, permitiram verificar que o aumento expressivo da pluviosidade esteve associado a alterações na concentração de alguns elementos, em teores equivalentes ao verificado nos primeiros meses após o desastre e, inclusive, alguns deles excederam os máximos históricos, como no caso dos elementos Al,

Ba, Co, Sr, Mn e o Fe. Com relação aos sedimentos notou-se uma alteração da sua mineralogia, com um aumento da ocorrência de minerais correlacionados às rochas do QF, ou seja, em parte correlatos ao rejeito, como a Goethita, a Hematita, a Magnetita e a Gibsita. Também, foi verificada a alteração da granulometria da matriz, com um aumento das frações mais finas, siltosas e argilosas, tanto para a porção continental, quando na região costeira e marinha. Nos Compartimentos 4 e 5 (correspondentes ao estuário do rio Doce e oceano) o sedimento também apresentou alteração nas concentrações de EPTs, com aumento dos teores de Al, Fe, Mn e As (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

Especificamente na região de Governador Valadares, coletas realizadas para o material extravasado permitiram concluir que o evento pluviométrico de 2020 proporcionou depósitos característicos de misturas de solo e sedimentos da bacia, podendo estes conter contribuição do rejeito de mineração da barragem de Fundão. Os materiais analisados possuíram predominância de partículas de tamanho silte e teores de As, Ba, Co, Se e Zn acima da resolução que estabelece teores seguros para os solos de Minas Gerais (BRASIL, 2011). No que se refere a fertilidade, porém, o material não apresentou restrição (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

Quanto à qualidade do ar, conforme observado em campo, a deposição de material nas ruas e calçamentos de Governador Valadares é uma característica da região, especialmente desde o rompimento da barragem de Fundão. Entretanto, o evento da cheia no final de janeiro de 2020 acentuou a ocorrência, em determinados bairros, principalmente nas ruas mais próximas do leito do rio. Atividades para a remoção do material depositado foram executadas por equipes da prefeitura e pelos próprios moradores, como a umidificação das ruas e calçadas para amenizar a ressuspensão de partículas à atmosfera. No entanto, foi possível observar a deposição de um material fino nas laterais das ruas. Este material que ficou depositado, quando seco, pela ação do vento e pelo tráfego de veículos, tem a capacidade de permanecer em ressuspensão, estando disponível para ser inalado (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

A contaminação de ecossistemas terrestres e aquáticos por EPTs, decorrente do desastre e magnificada pelos eventos pluviométricos recentes, em especial a cheia de 2020, constitui risco iminente de intoxicação à biota e ao homem, pois, todo EPT (e seus compostos) possui toxicidade potencial (MUNIZ; OLIVEIRA-FILHO, 2006). Organismos aquáticos apresentam uma maior tendência à concentração de elevados teores de EPTs relativamente às encontradas nos demais compartimentos do ambiente (água e sedimento), devido aos processos naturais de bioacumulação e biomagnificação ocorrentes na cadeia trófica, apresentando, deste modo, relevante importância sobre a dinâmica de sua ciclagem nos ecossistemas (PFEIFFER et al., 1995; RAMOS, 2005; MUNIZ; OLIVEIRA-FILHO, 2006; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014).

Os estudos efetuados de qualificação e quantificação de EPTs em pescado proveniente da área de proibição de pesca (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i), enfocados nos Compartimentos 4 e 5,

constatarem que todos os pescados analisados (moluscos, crustáceos e peixes), capturados nos diferentes pontos ao longo da costa do Espírito Santo, estavam contaminados por EPTs. Dentre eles, o mais representativo foi o As, verificado para todos os grupos taxonômicos, mas, especialmente para crustáceos, em concentrações superiores aos limites máximos estabelecidos pela legislação brasileira que regulamenta as concentrações de elementos químicos inorgânicos em alimento (ANVISA, 1998; 2013). No entanto, o estudo destacou ainda que outros elementos como Cd, Cu, Cr, Hg e Se (para moluscos); Cu, Hg e Se (para crustáceos) e Hg e Se (para peixes) também estavam em concentrações cuja representatividade estava acima de 50% e, por vezes de 100%, do limite máximo diário estabelecido pelas regulamentações alimentares nacional e internacionais (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020I).

Assim, como toda a região costeira adjacente à foz do rio Doce representa uma das principais áreas de recursos pesqueiros no estado, de onde são obtidos recursos por meio de diversas modalidades de pesca (UFES, 2013), concluiu-se que o consumo de pescado de toda a região acometida pelo desastre pode se caracterizar como uma forte fonte de contaminação e risco para a saúde da população local, quiçá nacional, uma vez que a ingestão de alimentos contendo EPTs é a principal forma de contaminação humana para populações expostas de forma não ocupacional (RAMOS, 2005; DENOBILE, 2007; FERNANDES et al., 2016, BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020I).

Tais estudos, efetuados posteriormente ao diagnóstico, em especial no que diz respeito à cheia de 2020 e à qualificação e quantificação de EPTs em pescado proveniente da área de proibição de pesca, comprovaram as hipóteses doravante levantadas a respeito da necessidade de acompanhamento da evolução dos danos, especialmente no que diz respeito aos aspectos ambientais.

10.2. ACOMPANHAMENTO DOS DANOS E INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

Os danos identificados ao longo dos Compartimentos 1 a 5, estão associados, em maior ou menor grau, à presença e composição química do rejeito. Tal qual exposto (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), elementos como As, Pb, Ba, Cr, Cd, Ni e Hg possuem toxicidade reconhecida e podem afetar a saúde dos diversos organismos, mesmo que em baixas concentrações, além de apresentarem tempos de residência no ambiente da ordem de centenas a milhares de anos, estendendo os seus efeitos por períodos indeterminados (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; PINTILIE et al., 2007; MAGALHÃES; FERRÃO FILHO, 2008; OMS, 2008; SISINNO; OLIVEIRA-FILHO, 2013; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014; NIKINMAA, 2014, SKEAFF; DURBEUIL; BRIGHAM, 2002; PINTILIE et al., 2007; WOOD, 2012; ALI; KHAN; ILAHI, 2019; SZIKSZAY, 2012; LÉCUYER, 2016). Porém, mesmo elementos considerados essenciais, como Fe, Mn, Zn e Se, apresentam toxicidade potencial, a partir de uma determinada concentração, cuja ordem de grandeza é dependente da espécie biológica (OMS, 2008;

WOOD, 2012). Tal qual os demais, os elementos essenciais também tendem a permanecer no ambiente, especialmente em sedimentos, sendo a sua disponibilização passível de ocorrência diante de alterações físico-químicas naturais (devido a eventos pluviométricos extremos, como cheias, por exemplo) ou antropogênicas (relacionadas ao revolvimento do fundo por ações mecânicas diversas), atuando, assim, como fonte potencial de contaminação constante e difusa no ambiente aquático (BEVILACQUA, 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; PINTILIE et al., 2007; VAREJÃO, 2008; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; PUPPIM, 2014; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014; SOUZA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016; IBAMA, 2016; MAIA, 2017; JUNCÁ et al., 2017; ALI; KHAN; ILAHI, 2019; SILVA, 2010).

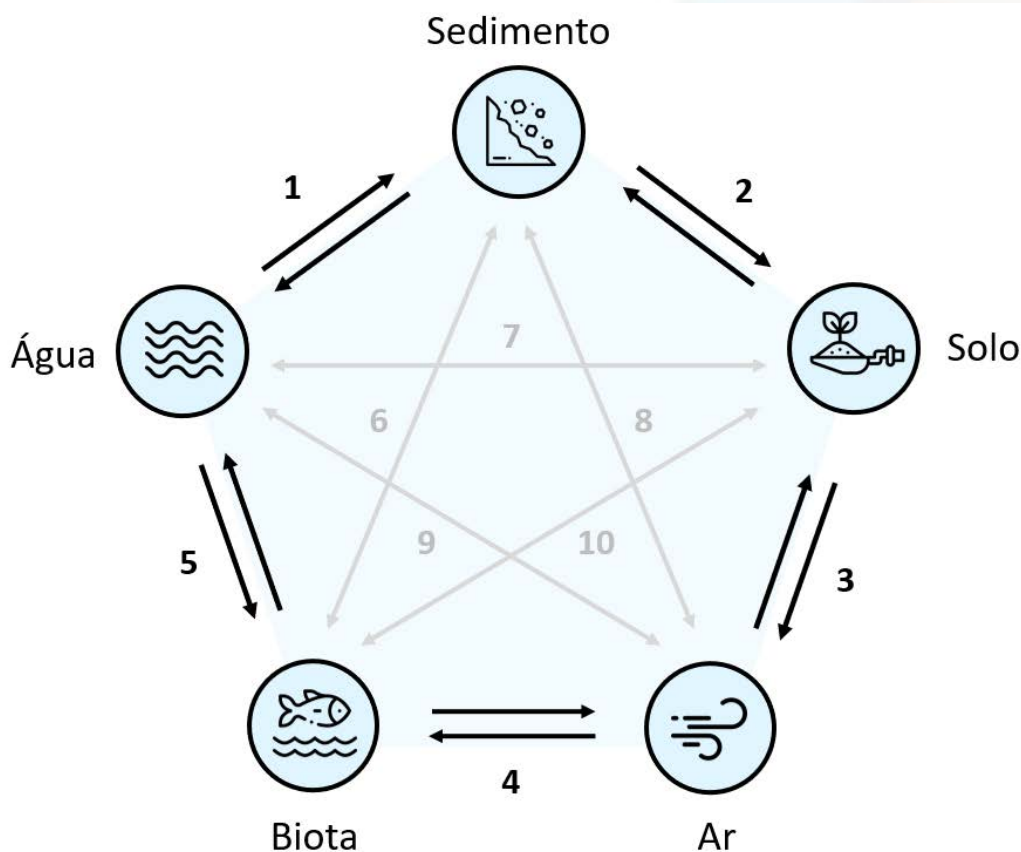
Embora tenha sido determinado um perímetro dos limites da passagem ou deposição da lama de 2.380,76 ha (ou 23,8 km²) no Compartimento 1 (entre os municípios de Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), em termos espaciais não foi possível fixar uma área total afetada, isso porque a abrangência do dano sobre o meio ambiente e o patrimônio cultural foi diagnosticada como diversa entre cada componente estudado, assim como dinâmica, ou seja, que sofrerá mudanças em função da ocorrência de eventos naturais ou antrópicos. Desse modo, a delimitação da extensão, por onde a lama de rejeitos passou e se depositou, foi baseada em modelos matemáticos hidrodinâmicos que compreenderam os tempos de retorno (TRs) de 5 a 100 anos, para determinar eventuais áreas de susceptibilidade futura ou ASER (Área de Susceptibilidade ao Extravasamento de Rejeito).

Os resultados da ASER de 2020, conforme descrito neste relatório e em seus DOCUMENTOS SUPLEMENTARES, reforçaram então, a hipótese de que, enquanto houver disponibilidade de material composto com rejeito, depositado nas margens dos rios ou associado ao sedimento, haverá a possibilidade de ressuspensão ou disponibilização durante as cheias, na forma de partículas solúveis e insolúveis, contendo elementos e substâncias de toxicidade potencial. Assim, além da preocupação inerente em virtude dessa situação, constatou-se a necessidade de proteção de lagoas, principalmente aquelas que estão mais próximas e suscetíveis ao alagamento pelas águas do rio Doce. Verificou-se, ainda, a importância do monitoramento dos ecossistemas que compõem as regiões costeira e marinha, para os quais irão convergir os sólidos suspensos e os elementos e substâncias potencialmente tóxicos (ESPTs) associados, provenientes tanto da ressuspensão do sedimento quanto da erosão do solo, alterando a turbidez da água, a composição dos corpos de água e, especialmente, prejudicando organismos aquáticos ou os que dependem desses ambientes para alimentação, dessedentação e reprodução, dentre os quais encontram-se, inclusive, organismos utilizados para o consumo humano.

Diante desse quadro, as dinâmicas de aporte, incorporação e ciclagem de espécies químicas no ambiente, diretamente ligados à esta ASER, e que acarretam na bioacumulação e biomagnificação

de ESPTs na cadeia trófica, foram objeto de estudo do relatório da cheia de 2020 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i). Nesse relatório que constatou um aumento da área acometida em 72% em relação àquela obtida pela APDL-2016 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i), foi possível identificar que, embora o evento seja relativamente atípico, este provocou ampliação ou, até mesmo, novas alterações nas condições ambientais, bem como nas mais diversas matrizes, especialmente, nos Compartimentos 2B e 3, levando, por exemplo, à nova contaminação por As, Fe, Mn, Pb, Co, Cu, Sr e Ni, mesmo quatro anos após o desastre (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i). Neste contexto, reforça-se a manutenção de estudos de acompanhamento dos danos, haja vista que, pelos resultados de modelagem, as áreas de extravasamento concernentes aos TRs de 5, 10, 25, 50 e 100 anos poderiam e poderão proporcionar acréscimos espaciais percentuais de 132 a 173%, respectivamente, demonstrando matematicamente que, enquanto houver rejeito no leito do rio Doce e ausência de ações de manejo e de reparação efetiva, os municípios e distritos adjacentes estarão sujeitos a novos danos, em consequência da interrelação intrínseca entre os compartimentos ambientais, assim como demonstrado na Figura 152.

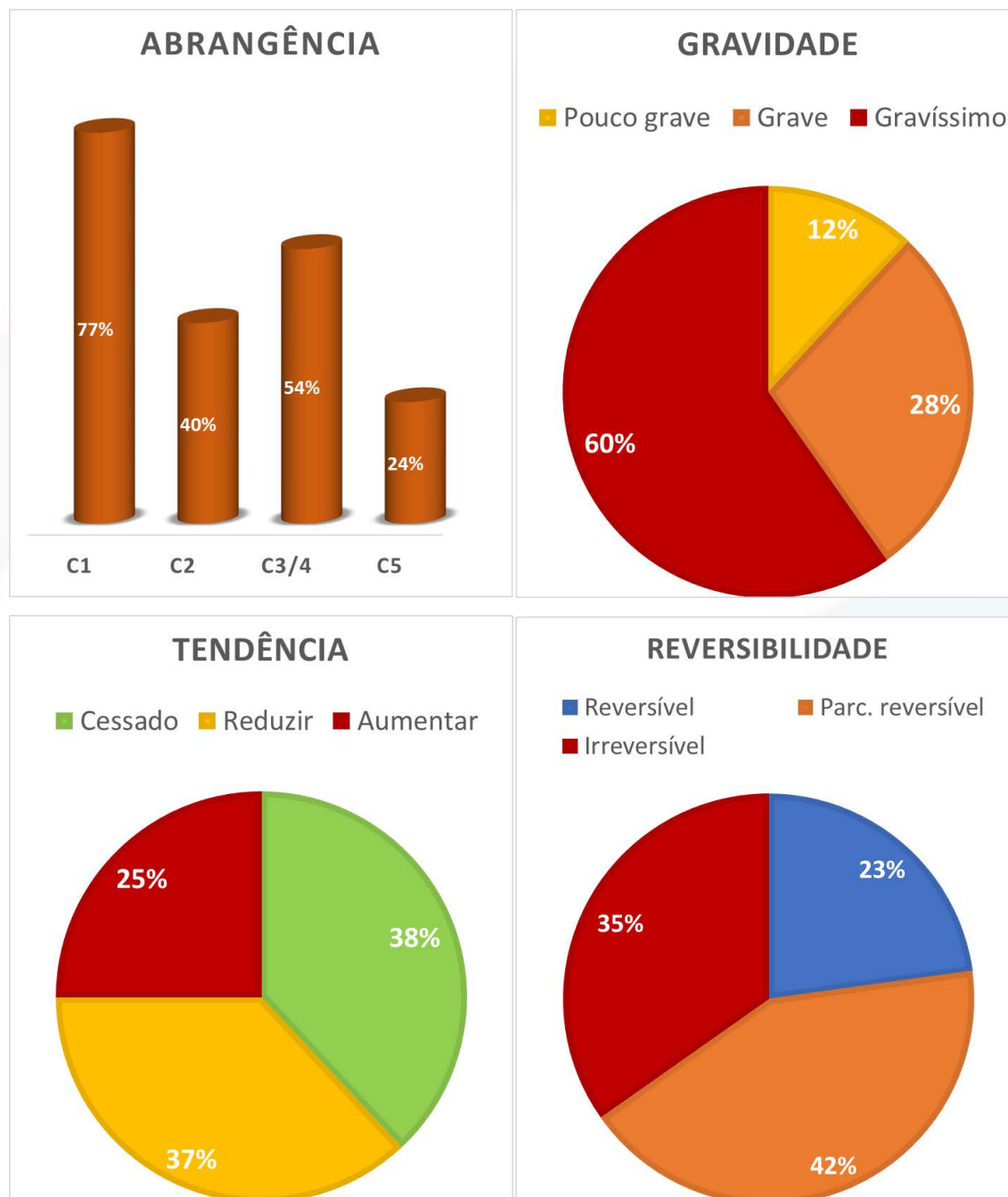
Figura 152 - Diagrama da interrelação entre os compartimentos ambientais Água, Sedimento, Solo, Atmosfera (ou Ar) e Biota, na qual as setas numeradas indicam o fluxo passível ocorrente principal (em preto) e secundário (em cinza) da disponibilização de EPTs entre matrizes.



A interrelação entre as diferentes matrizes ambientais (Água, Sedimento, Solo, Atmosfera (ou Ar) e Biota), conforme observado na Figura 152, ocorre através de fluxos primários (setas e números em preto) e secundários (em cinza), pelos quais os EPTs, aportados naturalmente ou por ações antropogênicas, podem ser disponibilizados. Assim, os elementos e espécies químicas presentes no compartimento Água, por exemplo, devido à processos de complexação e precipitação, tendem a se depositar nos Sedimentos, conforme representado no fluxo direto de 1. No entanto, o processo pode ser revertido, seja em decorrência de revolvimento mecânico do material ou mesmo pela alteração, natural ou antropogênica, das propriedades físico-químicas do meio, como aquelas promovidas durante as estações chuvosas. Do mesmo modo, a Água relaciona-se com o Solo (conforme representado em 7), devido ao provimento de elementos pelas ações erosivas, das margens para os corpos hídricos; ou pela deposição de partículas em áreas de susceptibilidade de inundação (BEVILACQUA, 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; PINTILIE et al., 2007; VAREJÃO, 2008; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; PUPPIM, 2014; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014; SOUZA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016; IBAMA, 2016; MAIA, 2017; JUNCÁ et al., 2017; ALI; KHAN; ILAHI, 2019; SILVA, 2010) e estes, sucessivamente, direta ou indiretamente relacionam-se aos demais compartimentos ambientais, o que torna altamente complexa a relação entre as fontes de disponibilização e os compartimentos que poderão sofrer a deposição de elementos e substâncias, mesmo que estes não estejam diretamente associados a uma determinada fonte de contaminação.

Corroborando os dados da modelagem hidrodinâmica e as hipóteses levantadas na conclusão do diagnóstico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), a análise dos resultados obtidos com o acompanhamento de danos revelaram novos danos nos diferentes ambientes analisados, tais como: perda da biodiversidade terrestre; a contaminação da vegetação aquática continental e da biota na Zona Costeira e Marinha, a qual foi associada à contaminação e ao aumento da incidência de encalhes de quelônios e a mortalidade e degradação da saúde de cetáceos pelo ao aumento da concentração de EPTs. Esses danos podem ser justificados pelos fluxos interrelacionais das matrizes, assim como exemplificado na Figura 152, , mas também, pela evolução temporal, dinamicidade dos ambientes ou mesmo em função da ocorrência da cheia de 2020. Não obstante, a matriz de danos apresentada no Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b) passou por uma criteriosa revisão através da qual alguns itens foram reclassificados em termos de abrangência, tendência e reversibilidade. Parte dos danos que, até então, não haviam sido classificados, tiveram a sua gravidade representada. Ainda, todos eles foram avaliados em relação à importância para o provimento de serviços ecossistêmicos. O resumo da consolidação dos danos avaliados está apresentado na Figura 153.

Figura 153 – Análise sintética da consolidação e abrangência dos danos socioambientais, após a revisão da matriz efetuada com a conclusão dos estudos de acompanhamento.



Conforme pode ser verificado na Figura 153, o Compartimento 1, compreendido no trecho entre Fundão e a UHE Risoleta Neves, continuou apresentando a maior parte dos danos, em termos numéricos. Segundo o diagnóstico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), a área foi fortemente alterada, principalmente nas margens, devido ao aporte local de rejeito. Isso promoveu alterações em todo o ecossistema, especialmente no que diz respeito à supressão de vegetação nativa ciliar e por implantação de infraestrutura – danos prioritários, dentre todos os 96 diagnosticados, devido à sua

essencial função de regulação ambiental, em termos de provimento de serviços ecossistêmicos (SE). Além da remoção de 859,40 ha de vegetação, a deposição do rejeito ocorrida em C1 promoveu a formação de um substrato novo, o Tecnosolo. A formação deste novo material, de menor qualidade física, embora tenha comprometido pouco as características locais de fertilidade, apresentou contaminação por EPTs, considerada pouco grave, quando comparado à linha-base e avaliado relativamente aos valores orientadores de qualidade de solo (VRQs) (GUEVARA et al., 2018; MINAS GERAIS, 2011). No entanto, por seu adensamento e falta de estruturação física, associada à supressão de vegetação nativa ciliar, foi observado como capaz de contribuir com uma maior disponibilização de espécies químicas nos corpos hídricos, devido ao seu potencial erosivo superior em relação aos solos naturais da região. Desse modo, o dano de formação deste Tecnosolo foi classificado como gravíssimo e de muita importância para o comprometimento de SE.

O ambiente aquático continental inserido no Compartimento 1, também apresentou alterações em decorrência das características físicas e químicas do rejeito e da força da passagem da onda de lama, muitas das quais perdurarão por longo período nesse Compartimento, uma vez que diversas espécies químicas tendem a permanecer no ambiente na forma de materiais dissolvidos e particulados, de natureza orgânica e inorgânica, que tenderiam a associar-se por meio de processos de superfície (como a sorção, complexação e reprecipitação) aos particulados preexistentes no ambiente, sendo estes meios importantes para o transporte de EPTs (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; CHAPMAN et al., 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; PINTILIE et al., 2007; SOUZA, 2007; VAREJÃO, 2008; RHODES, 2010; SILVA, 2010; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; SOUZA et al., 2015; IBAMA, 2016; ALI; KHAN; ILAHI, 2019). Também classificados como de muita importância para SE, os danos à qualidade da água mantiveram, durante as análises do acompanhamento de danos, a magnitude anteriormente estabelecida na qual o período logo após o desastre demonstrou ser o mais crítico. No entanto, um novo dano foi constatado neste ambiente, o de contaminação da vegetação aquática por EPTs, tais quais possivelmente aquelas identificadas pela formação do Tecnosolo, devido à sua tendência a erodibilidade com constante disponibilização de partículas e espécies químicas para os corpos hídricos. Dano gravíssimo, irreversível, com tendência à redução, este foi diagnosticado pela constatação da diferença nos teores de EPTs entre as áreas controle e afetada, para cinco espécies em estudo, destacando-se a incorporação dos elementos Al, Cd, Ce, Cr, Hg, Se, Pb, Co, Sn, Ni, Ba, Ln, Sb, As, Mn, Cu, Ag e Zn, todos os elementos similares, em composição, ao rejeito de mineração.

Associados aos ambientes aquáticos continentais, seja devido à presença de Tecnosolo nas margens, com potencial disponibilização ocasional, ou devido à ocorrência de espécies químicas nos corpos hídricos, para o Compartimento 1, o acompanhamento de danos permitiu ainda a

reclassificação da reversibilidade em relação à qualidade de sedimentos, associado tanto à sua composição granulométrica, como também, à contaminação por EPTs em si. De muita importância para SE, os danos, até então classificados como parcialmente reversíveis, foram reconsiderados pelas metodologias aplicadas como irreversíveis. Isso indica que, embora os ecossistemas apresentem certa resiliência potencial, a ocorrência do desastre alterou profundamente as propriedades da referida matriz ambiental. Em termos de equilíbrio ecológico, tal alteração representa uma importante preocupação, haja vista a função dos sedimentos em atuar como uma fonte potencial de contaminação constante e difusa no ambiente aquático, com tendência a disponibilização de EPTs em decorrência de alterações naturais ou antropogênicas das propriedades físico-químicas locais, como temperatura, hidrodinâmica, potencial redox, quantidade de matéria orgânica e, principalmente pH (BEVILACQUA, 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; PINTILIE et al., 2007; VAREJÃO, 2008; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; PUPPIM, 2014; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014; SOUZA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016; IBAMA, 2016; MAIA, 2017; JUNCÁ et al., 2017; ALI; KHAN; ILAHI, 2019; SILVA, 2010).

Os danos à ictiofauna (anteriormente identificados qualitativamente), com destaque para as alterações nas condições corporais e/ou na saúde e pelo aumento na bioacumulação e biomagnificação, puderam ser mensurados e classificados. Ambos os danos foram considerados gravíssimos, irreversíveis, com tendência ao aumento, embora de importância inferior para a provisão de serviços ecossistêmicos (pelos critérios metodológicos aplicados). Foram assim classificados devido às alterações histopatológicas constatadas, especialmente na estação chuvosa, tal qual pela maior incorporação de EPTs, ocorrente em maior proporção para a área diretamente afetada (DA), comparativamente às de controle (positivo e negativo – CP e CN) e, quando disponível, à linha-base. Em termos gerais, os resultados obtidos nestes estudos demonstraram que houve aumento, em concentração, de 2 vezes para Cr, 38 vezes para Cu, 25 vezes para Fe e de 10 vezes para Mn e Zn (novamente, elementos disponíveis, entre os de maior concentração, no rejeito de Fundão). Ainda, constatou-se que peixes de fundo, associados ao sedimento, tenderam a acumular mais EPTs, sendo esta observação corroborada pelos demais estudos pretéritos e pelos próprios resultados obtidos pelo diagnóstico e acompanhamento de danos e anteriormente discutidos.

Ainda para o Compartimento 1, alguns danos tiveram a sua tendência e reversibilidade reavaliadas e passaram a ser considerados cessados, são eles: danos de alteração da comunidade fitoplanctônica e de macroinvertebrados bentônicos, ainda que não tenham sido recuperados, sendo estes danos referentes às alterações de comunidade, que pararam de apresentar alteração, porém ainda em valores inferiores à linha-base. Também, se reconsiderou, como tendência à redução, os danos de alterações nas comunidades zooplanctônicas e na composição e estrutura das comunidades de peixes, sendo o primeiro ainda reclassificado como parcialmente reversível diante dos novos

resultados obtidos.

Toda essa alteração verificada para o Compartimento 1 promoveu a perda de adequabilidade ambiental e fragmentação dos habitats terrestres, o que impactou diretamente as comunidades faunísticas residentes na área, que dependem dos recursos naturais para sua sobrevivência. Danos de alterações nas assembleias e populações dos animais, bem como de comprometimento à saúde da fauna silvestre, em especial no que diz respeito à avaliação de biomarcadores de respostas essenciais para a sobrevivência e bioacumulação, foram verificados no diagnóstico e corroborados durante o trabalho de acompanhamento de danos. Em função das condições adversas para a ocupação da fauna, do afugentamento e da perda de qualidade dos ambientes para a permanência dos animais, as métricas de populações e assembleias faunísticas demonstraram ter havido queda dos índices de abundância e diversidade de diversos grupos de animais. De maneira geral, a fauna passou por modificações no conjunto de espécies que conseguem se estabelecer nas áreas afetadas pelo rejeito, em que muitas espécies de maior sensibilidade foram substituídas por comunidades mais simplificadas e de hábitos generalistas. Além disso, detectou-se maior presença de animais domésticos na região da APDL, o que ratifica a presença de um ambiente degradado e de menor qualidade ambiental. Essas relações podem ter contribuído de diferentes formas ao comprometimento da saúde da fauna silvestre, assim como nas evidências de bioacumulação de EPTs, constatados pela comparação entre as áreas de controle (C) e diretamente afetadas (DA) para os indicadores das matrizes da fauna (sangue, hemolisado, penas, pelos e fezes). Adicionalmente, o efeito sinérgico entre a bioacumulação de EPTs nos animais e a deterioração do ambiente podem ser as causas da detecção de piora das condições físicas da fauna, como o aumento da presença de parasitas em resposta ao estresse ambiental a que estão submetidos.

Importante ressaltar que, no que tange à fauna, o acompanhamento de danos permitiu verificar, ainda, que diversos indícios apontam para a baixa efetividade – para a recuperação da biodiversidade como um todo – das ações previstas de restauração florestal pela Fundação Renova. A abordagem metodológica aplicada, baseada em análises espaciais e modelagens de nicho, permitiram identificar que a reversão dos danos à biodiversidade no Compartimento 1 deve ser concebida de modo a não focar unicamente na área de abrangência da APDL, mas sim de desenvolver medidas de recomposição florestal na região como um todo, buscando melhorar a conectividade e a configuração da paisagem em benefício à biodiversidade. Assim, além da cobertura florestal em si, também devem ser alvo de ações de recuperação métricas como tamanho dos fragmentos restaurados e conexão física dos ambientes florestados da região. O uso de técnicas de restauração que envolvam dispersores naturais deve ser fomentado, uma vez que estas vias de dispersão podem subsidiar maior heterogeneidade ambiental em áreas restauradas.

Estes resultados foram traduzidos pela constatada perda de biodiversidade terrestre, verificada

para a área, tal qual pela análise dos serviços ecossistêmicos que mostraram, para C1, maior abrangência e intensidade da perda aos valores de IPSE (Índice de Perda de Serviço Ecossistêmico). O ambiente fluvial foi avaliado como o mais impactado (maior valor de IPSE), também em decorrência da supressão de mata nativa, elencada como prioritários pela análise efetuada. Foi constatada, na área, a perda dos benefícios que eram oferecidos por esse sistema na provisão de alimentos, matéria-prima para indústria, controle de pragas e redução da disponibilidade de organismos patogênicos, suporte à qualidade dos habitats, manutenção da integridade ambiental, reprodução cultural, identidade cultural e espiritual, beleza cênica, recreação, turismo, educação e pesquisa.

Nos Compartimentos 2 e 3, embora a deposição do rejeito nas margens, no momento do desastre, não tenha ocorrido em tamanha proporção por conta do barramento da lama de rejeitos provido pela estrutura da UHE Risoleta Neves, as partículas transportadas e depositadas ao longo do corpo hídrico afetaram, em demasia, as características dos ambientes aquáticos continentais. Essa afetação, associada aos processos de cheias ocorridas em 2016 e, especialmente, em 2020, que levou à ampliação da área de susceptibilidade ao extravasamento do rejeito (ASER), fomentou novas análises relativas ao dano de contaminação do solo por EPTs. As áreas, estudadas exclusivamente nesta etapa dos trabalhos em decorrência deste levantamento da ASER, constataram a ocorrência de um dano grave, irreversível e com tendência ao aumento, com especial destaque para os elementos As e Mn, que apresentaram concentrações, nas áreas afetadas, superiores à linha-base. Além desses elementos, detectou-se a possibilidade de transferência de Fe e Mn (elementos mais biodisponíveis) para espécies vegetais desenvolvidas nesses solos, com potencial de intoxicação de plantas nativas e exóticas por Mn, e de toxicidade de Fe em bovinos que se alimentarem exclusivamente das pastagens cultivadas nessas áreas. Esses resultados, relativos ao Fe e ao Mn, corroboraram os indicativos de contaminação verificados no Tecno solo, formado no Compartimento 1. Porém, diferentemente do observado para o Tecno solo, a contaminação dos solos de várzea nas manchas de inundação dos Compartimentos à jusante da UHE Risoleta Neves é considerada preocupante, especialmente no Compartimento 2, haja vista que o As é um elemento de alta toxicidade para mamíferos. Embora esse EPT não tenha sido prontamente absorvido pelas plantas, o mesmo foi detectado no solo em níveis superiores à linha base, e pode entrar para a cadeia trófica no futuro. Isso ocorreu e continuará ocorrendo constantemente devido ao provimento de EPTs, na ausência de ações de manejo de rejeitos e da efetiva reparação dos danos, pelo carreamento do material a partir do Compartimento 1 e redistribuição local pelos sedimentos em função de novas cheias, que também apresentaram irreversível contaminação em C2 e C3.

Tal alteração dos ecossistemas locais, analogamente ao ocorrido para o Compartimento 1, somada à certa supressão de vegetação nativa por implantação de infraestrutura, principalmente verificada em C3, levou, mais uma vez, ao comprometimento da saúde e bioacumulação de EPTs nos

diversos grupamentos de fauna. Para peixes (ictiofauna), ao longo do acompanhamento dos danos, novamente foram verificadas alterações nas condições corporais, como, por exemplo, relacionadas à histopatologia, para a qual os indicadores mostraram a ocorrência de um dano gravíssimo e irreversível, especialmente pronunciado nas coletas efetuadas após a estação chuvosa. Também, foi avaliado o grave aumento na bioacumulação e biomagnificação, sendo que comparações entre CN, CP e DA, juntamente com a análise de estudos pretéritos, identificaram aumento nas concentrações dos diferentes EPTs, sendo mais uma vez, observados teores duas vezes superiores para Cr, 38 vezes para Cu, 25 vezes para Fe e de 10 vezes para Mn e Zn (relativamente aos estudos pretéritos, conforme detalhado no item de Ecotoxicologia do presente Tomo).

Relativamente à fauna silvestre, os mesmos danos observados para o Compartimento 1, foram também constatados nos Compartimentos 2 e 3: simplificação das assembleias e populações faunísticas e piora nas condições físicas dos animais, decorrentes da perda de conectividade na paisagem e de adequabilidade ambiental, ocorridas em função do desastre, associadas ao comprometimento à saúde da fauna silvestre e ao aumento na bioacumulação de EPTs provenientes do rejeito e da disponibilização de contaminações históricas da bacia pela passagem da onda de lama.

Para C2 e C3, tal qual verificado para C1, constatou-se ainda a reclassificação dos danos de alteração da comunidade fitoplanctônica e zooplanctônica, sendo estes considerados cessados para o primeiro grupo; e com tendência à redução e de reversibilidade parcial, para o segundo. A tendência das alterações na composição e estrutura das comunidades de peixes também foi reclassificada, sendo o dano, anteriormente avaliado como cessado, reclassificado com tendência à redução. Tal alteração se deu pelas novas observações realizadas em relação a riqueza, sendo registrado, nas coletas realizadas em 2018 e 2019, representatividade de cerca de 50% dos valores registrados na linha-base. Também, foi observado o aumento na dominância de espécies oportunistas, pela análise das curvas de abundância e biomassa acumuladas.

Em relação aos serviços ecossistêmicos, para o Compartimento 2, observou-se que, embora o impacto nas áreas extracalha tenha sido menor do que aquele verificado em C1, o ambiente fluvial apresentou perdas similares, sendo principalmente observadas, em termos gerais, maiores valores de IPSE para a disponibilidade de áreas vitais para espécies de flora e fauna, serviços de regulação e de provisão de alimentos, de recursos genéticos e bioquímicos da mata nativa e vegetação secundária. Assim, constatou-se, para a área, comprometimento do suporte à qualidade dos habitats, prejuízos aos processos e interações ecológicas e à manutenção da integridade ambiental, além da afetação dos SE culturais relativos à reprodução e identidade cultural e espiritual, beleza cênica, inspiração, recreação e turismo, educação e pesquisa.

No Compartimento 3 (C3), os danos no ambiente aquático foram, também, mais acentuados e em maior proporção do que no ambiente terrestre, ainda que de menor magnitude se comparados

aos C1 e C2. Assim, os maiores valores de IPSE ocorreram para o sistema fluvial, relacionados às perdas dos serviços de suporte de disponibilidade de áreas vitais para espécies de flora e fauna, ciclagem de nutrientes e produção primária e as perdas completas dos serviços de provisão de alimentos e de recursos genéticos e bioquímicos, associadas à perda dos serviços de suporte. Ainda, tendo em vista a contaminação da água, a diminuição e/ou remoção de pessoas circulando nas áreas atingidas, dificuldades de acesso, aumento das distâncias e a quebra dos laços existentes, diversas celebrações, festividades, encontros religiosos, atividades esportivas/de lazer e atividades tradicionais foram afetados (tais como faiscação e pesca), o que levou a alterações das práticas culturais e à perda dos serviços culturais de recreação, lazer e educação e de relações sociais e modo de vida.

No Compartimento 4, mais especificamente no estuário do rio Doce, de forma similar ao constatado para os Compartimentos 2 e 3 desde o diagnóstico, a alteração das características aquáticas, relacionadas à qualidade de água, dos sedimentos e as alterações na biota ali ocorrentes foram as mais expressivas. Nesta área, foi possível observar que o aporte de rejeitos continua ocorrendo e que os danos observados em relação à qualidade ambiental e alterações nos organismos da flora e da fauna ainda não cessaram, entretanto, tal qual para o ambiente continental, o período de piores condições foi constatado logo após a ocorrência do desastre e chegada da onda de rejeitos à costa. A exceção disso é a disponibilidade de EPTs na coluna d'água e sedimentos, que mesmo em concentrações mais estáveis no ambiente, se acumula nos organismos e ao longo da cadeia trófica, levando à observação do aumento na bioacumulação e nas alterações das condições corporais e/ou na saúde da biota. Para as comunidades bênticas e ictiofauna, os danos foram considerados gravíssimos, irreversíveis e com tendência ao aumento, haja vista a já comentada tendência ao carreamento constante de materiais oriundos dos Compartimentos 1 ao 3, na ausência de ações de manejo dos rejeitos e reparação efetiva dos danos, e aos processos de bioacumulação e biomagnificação. Comparações efetuadas entre a foz do rio Doce e a do rio Piraquê-Açú, constataram alterações para os diferentes marcadores nos peixes coletados na área estuarina do rio Doce, sendo os resultados corroborados pelos dados da FAURG no caso do marcador de peroxidação lipídica. O aumento na bioacumulação, avaliado sob a mesma premissa comparativa, foi verificado pela observação de concentrações superiores de EPTs, especialmente no que se refere ao As. Os resultados obtidos, detalhadamente descritos no item de Ecotoxicologia do presente TOMO, demonstram que os peixes da localidade da foz e adjacências estavam mais contaminados do que aqueles coletados na baía de Vitória. Novamente, os espécimes de fundo apresentaram maior contaminação, sendo constatados incrementos, em relação aos dados pretéritos, de 1000 vezes para Cd, 5566 vezes para Cr, 534 vezes para Cu, 3074 vezes para Fe, 1102 vezes para Mn e 300 vezes para Pb.

Analogamente, no que se refere às características aquáticas de meio físico e biótico, o mesmo foi observado para a área marinha (Compartimento 5). Foi constatado que as alterações em toda a

biota aquática continuam ocorrendo, sendo que para a comunidade bêntica marinha, de praias e manguezais os danos relacionados à contaminação por EPTs, que haviam sido identificados apenas qualitativamente, puderam ser classificados como gravíssimos, irreversíveis e com tendência de aumento. Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna, relativas aos diversos marcadores em estudo, tal qual aumento na bioacumulação, em comparações efetuadas entre pontos próximos (5 km) e distantes (25 km) da foz do rio Doce, da mesma maneira como havia sido observado nos estudos anteriores sobre o pescado (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020I), a contaminação dos peixes em proporção ainda mais significativa do que a observado nos Compartimentos 1 a 3. Ressalta-se que parte desses animais são comumente utilizados para consumo humano.

Assim como levantado na ocasião do diagnóstico, as áreas com ocorrência de salinidade, em especial as regiões estuarinas, por apresentarem-se em ambiente de transição podem favorecer à incorporação de EPTs pela biota. A salinidade age como fator abiótico interferente pois o aumento no teor cátions livres na coluna d'água, como Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , tende a intensificar os processos de dessorção das espécies químicas sorvidas nos materiais sólidos, em especial de espécies metálicas, devido à competição destas com os íons ocorrentes. Assim, as espécies químicas que se apresentavam ligadas e com menor mobilidade relativa, em ambientes salinos tendem a ser novamente disponibilizadas, favorecendo a sua absorção pelos organismos ali ocorrentes (PACHANA, WATTANAKORNSIRI, NANUAM, 2010).

Além das observações relativas à ictiofauna, a ocorrência e constância de redistribuição de EPTs para o ambiente marinho, sendo o Compartimento 5 a área de recepção final de todo o carregamento da bacia, dois novos danos foram diagnosticados: o aumento da incidência de encalhes de quelônios e contaminação por EPTs; e a mortalidade e degradação da saúde de cetáceos, em decorrência do aumento da concentração destas espécies químicas. Danos gravíssimos, irreversíveis e com tendência ao aumento, devido à bioacumulação e natural biomagnificação promovida pela cadeia trófica, aliada à já comentada disponibilização constante de contaminantes. O aumento da incidência de encalhes de quelônios foi constatado pela observação dos dados médios anuais (analisados com base no Programa de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo (PMP-BC/ES), realizado pela PETROBRAS), que variaram de 117, para o período de 2010 e 2015 (na localidade São Mateus) para 207, entre 2016 e 2018 (no mesmo ponto), representando um incremento de cerca de 43%. Esse fato pode também estar relacionado à degradação da qualidade dos habitats marinhos, diagnosticada por meio de modelagem ecológica de nicho, e com alterações e contaminação de itens alimentares. Relativamente à mortalidade e degradação da saúde de cetáceos, embora a linha-base apresente dados escassos, constatou-se uma tendência de aumento da concentração anual média em botos-cinza para Al, As, Co, Cr e Mn (novamente, todos elementos presentes em teores significativos no rejeito de mineração). Essa constatação, aliada à degradação da qualidade dos habitats marinhos,

à diminuição da oferta e contaminação dos seus itens alimentares (como peixes, crustáceos e moluscos) foi associada ao aumento da mortalidade da espécie. Assim, concluiu-se que os mecanismos do dano foram iniciados com a ingestão de presas contaminadas, seguido de acumulação de EPTs nos tecidos, incorrência de efeitos imunotóxicos, levando à degradação da saúde com potencial aumento de mortalidade por processos infecciosos. A contaminação por EPTs foi, também, identificada em quelônios marinhos por meio da análise de ovos e de filhotes neonatos da espécie *Caretta caretta*, o que pode vir a refletir em danos a nível populacional futuramente.

Associados aos danos diagnosticados para a Zona Costeira e Marinha, foi verificada a perda de serviços ecossistêmicos, principalmente relacionada à uma resposta negativa aos usos do ambiente pelo homem. Nestes locais, verificou-se que as comunidades inseridas apresentam seu sustento direcionado aos bens que o ambiente aquático proporciona. Assim, os beneficiários da pesca foram observados como os mais afetados, tal qual aquelas comunidades que utilizam o litoral para fins culturais, mesmo que de forma esporádica (comunidade regional), relacionadas às registradas perdas ao turismo.

Ainda para a área, observou-se a perda em vários outros SE, ocorrida de forma simultânea e possivelmente agravada pelos efeitos sinérgicos dos danos. Tal panorama demonstrou a fragilidade do sistema diante da entrada e constante disponibilização da pluma de rejeito que, temporariamente, diminuiu ou até mesmo pode ter colapsado a funcionalidade ecossistêmica nas proximidades da foz do rio Doce. Os sistemas de praias e manguezais apresentaram perdas dos serviços de provisão de alimento e recursos genéticos e bioquímicos, de suporte a disponibilidade de áreas vitais para espécies de flora e fauna e de relações sociais e modo de vida. Especificamente o sistema de praias ainda apresentou a perda de serviços culturais relacionados a recreação, lazer e educação e a herança e expressão cultural e espiritual.

Em síntese, mais uma vez reavaliando cada uma das matrizes em termos do aporte de ESPTs em decorrência do desastre, constatado para cada um dos ambientes e compartimentos, foi possível notar que as diferentes espécies químicas avaliadas, mesmo após cinco anos do desastre, estiveram e estão presentes nos mais variados meios, sendo a sua disponibilidade e toxicidade dependentes das dinâmicas ambientais ocorrentes. Sua presença alterou, de forma grave e gravíssima, muitas vezes irreversível, grande parte dos grupamentos de fauna, pela deterioração da saúde dos indivíduos observados, tal qual pela bioacumulação e biomagnificação das espécies químicas. Assim como discutido na etapa de diagnóstico dos danos, verificou-se, pelos estudos de acompanhamento que o tempo de exposição, tal qual o nível trófico foram fatores decisivos na influência da toxicidade das espécies químicas, sendo, quanto maior o tempo de exposição, mais significativo o grau de absorção e, também, os efeitos dos elementos nos organismos, uma vez que efeitos tóxicos crônicos podem ser observados em decorrência da acumulação, levando à efeitos tóxicos irreversíveis devido à ausência

de tempo suficiente para a recuperação do sistema ambiental. Assim como observado no presente estudo, para todas as áreas mas, em especial para C1 e C5, organismos de diferentes níveis tróficos irão, cedo ou tarde, absorver EPTs, estando aqueles posicionados no topo da cadeia alimentar mais susceptíveis a apresentarem condições de saúde agravadas devido às concentrações mais elevadas e tóxicas destes elementos promovida pelo aumento progressivo dos mesmos ao longo dos diferentes níveis tróficos (SISINNO; OLIVEIRA-FILHO, 2013; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014).

Assim sendo, diante dos resultados obtidos, analisados comparativa e integrativamente, para os ambientes Terrestre, Atmosférico, Aquático Continental e Zona Costeira e Marinha, há indicativos de que o meio ambiente não será capaz, por si só, de reverter grande parte dos efeitos ocorridos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão. Dados da literatura científica, já citados na ocasião das hipóteses efetuadas para a análise integrada do Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), indicavam que, relativamente aos tempos de residência de elementos no ambiente, estimativas da ordem de centenas a milhares de anos estão relacionados ao período de permanência de determinadas espécies químicas no ambiente, fator especialmente crítico no caso de ambientes marinhos, uma vez que podem ser considerados como reservatórios semi-infinitos, com aporte constante de contaminação oriunda de toda a bacia (SKEAFF; DURBEUIL; BRIGHAM, 2002; PINTILIE et al., 2007; WOOD, 2012; ALI; KHAN; ILAHI, 2019; SZIKSZAY, 2012; LÉCUYER, 2016).

Diante deste complexo cenário, aliado à observação de possível ampliação das áreas de susceptibilidade em decorrência de eventos pluviométricos futuros, embora a resiliência seja uma das principais características do meio ambiente, pode-se afirmar que há indícios técnico-científicos robustos de que, na ausência de ações de reparação e mitigação, relacionadas principalmente ao manejo dos rejeitos e a aplicação de ações de reparação efetiva, o comportamento de grande parte dos danos no futuro, em curto e médio prazo, poderá manter-se ou até progredir, alterando, ainda mais, as características dos meios físico e biótico, tal qual as dinâmicas com a sociedade que faz uso e reside na bacia do rio Doce. Ações bem planejadas e embasadas tem grande potencial e efetividade em auxiliar na recuperação ambiental ou minimamente na melhoria das condições dos ecossistemas. Deste modo, reitera-se que, onde houver ameaças de danos graves ou irreversíveis e falta de plena certeza científica sobre a magnitude e reversibilidade dos danos, é imperativo o investimento em medidas de controle para evitar maior degradação ambiental e riscos à saúde humana.

11 CONCLUSÕES

O presente relatório apresentou o acompanhamento dos danos ambientais advindos do desastre do rompimento da barragem de Fundão, em referência ao diagnóstico efetuado e entregue em 2020 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b-f). Os resultados aqui apresentados forneceram um quadro consolidado dos efeitos drásticos que o desastre da Samarco teve, e ainda tem, sobre o meio ambiente.

De modo a otimizar as principais conclusões, foram listadas as principais questões que nortearam o desenvolvimento do diagnóstico e deste acompanhamento da evolução dos danos, até o final do ano de 2020:

- **Qual a extensão espacial total da área de passagem e deposição da lama (APDL)?**

A extensão espacial da chamada Área de Passagem e Deposição da Lama (APDL), para os primeiros cálculos efetuados, totalizou 922,92 km² de área, quando somada àquela calculada no Compartimento 1 (23,80 km²), entre a barragem de Fundão e a barragem da UHE de Risoleta Neves (Brasil (MPF)/LACTEC, 2020b), com a área verificada nos Compartimentos 2 a 4 (899,02 km²), a jusante da UHE Risoleta Neves até foz do rio Doce, conforme parecer de nº 31, referente a cheia de 2016 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

No mar (Compartimento 5), conforme já apresentado no diagnóstico (Brasil (MPF)/LACTEC, 2020b), a extensão aproximada da pluma de rejeitos, em diferentes concentrações, junto a costa, foi de 93 km para norte (até o município de São Mateus – ES) e 325 km para o sul (até o município de Campos dos Goytacazes – RJ), com uma largura (avanço para o mar) variável entre 12 e 23 km. Essa extensão representa o resultado obtido pelas análises após o desastre. Atualmente essa abrangência é maior pela dinâmica natural de dispersão da pluma, porém em concentrações pequenas que não permitem sua delimitação.

Ressalta-se que essas áreas representam a extensão do alcance dos rejeitos, não se limitando a ela a área afetada pelo desastre. Essa é variável conforme a temática analisada, uma vez que os danos provocados pelo desastre não se limitam a região por onde o rejeito passou e/ou se depositou.

- **Qual a área potencial de susceptibilidade ao extravasamento dos rejeitos?**

Os resultados obtidos e apresentados no presente TOMO e demais (II a IV) indicaram que o rejeito depositado ao longo do rio permanecia susceptível à ressuspensão durante os eventos de cheia, podendo este se depositar novamente nos solos e nas margens, ao longo do curso de todo o rio Doce, alterando a APDL anteriormente calculada.

No início do ano de 2020 registrou-se a maior cheia pós-ruptura da barragem de Fundão, a qual foi responsável pela deposição de uma nova camada de rejeito nas margens do rio Doce e em

áreas que antes não haviam sido alcançadas pela onda de rejeitos. Essa área foi denominada de Área de Susceptibilidade ao Extravasamento de Rejeito (ASER). A ASER foi calculada para a cheia de 2020 e, devido a imprevisibilidade de ocorrência de novos eventos, foi complementada por um estudo de modelagem hidrodinâmica das áreas alagadas considerando-se vários tempos de retorno (TRs) (5, 10, 25, 50 e 100 anos), sendo estas avaliadas para o trecho a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves até a foz do rio Doce.

Com a cheia de 2020, notou-se um aumento da área em 72% em relação àquela obtida pela APDL-2016, considerando o trecho a jusante da UHE de Risoleta Neves até a foz do Rio Doce. Quando as áreas de extravasamento concernentes aos TRs de 5, 10, 25, 50 e 100 anos foram comparadas com esta (a APDL-2016), verificou-se uma possível ocorrência de um acréscimo espacial percentual de 132, 147, 160, 168 e 173%, respectivamente.

- **Quais os efeitos da expansão da extensão espacial sobre o meio ambiente?**

Um dos principais efeitos dessa expansão da extensão espacial afetada foi a propagação de diversos danos identificados para áreas não atingidas nas imediações da APDL original. Tal qual levantado como hipótese na análise integrada do diagnóstico de danos efetuado (Brasil (MPF)/LACTEC, 2020b), a ocorrência dos eventos pluviométricos de 2016 e 2020, principalmente, propiciaram a disseminação dos danos ocasionados em solo, água e ar, em decorrência da verificada susceptibilidade das matrizes ocorrentes nas áreas inundáveis dos corpos hídricos atingidos. Além do mais, em virtude da dinâmica dos rios afetados, da presença de barramentos e da grande extensão do rio Doce até a sua foz, as áreas de suscetibilidade apresentam diversas proporções e características diferenciadas, dificultando uma identificação prévia e consolidada. Desta forma, para a mitigação dos danos futuros associados a essa possível expansão é fundamental a realização de um monitoramento frequente das áreas na adjacência da APDL e a definição de planos estratégicos para ações emergenciais conforme o intervalo de recorrência conhecido das inundações para os compartimentos estudados. Tal afirmação tem como base os estudos desenvolvidos de modelagem, relativos aos tempos de retorno estudados, que foram associados à uma eventual expansão da área, de até 173%.

Esses resultados demonstraram que, enquanto existir rejeito no leito do rio Doce, os municípios e distritos adjacentes estarão sujeitos a um aumento expressivo em termos de susceptibilidade ao extravasamento de rejeito. Especialmente no que diz respeito aos solos, o potencial aumento das áreas de extravasamento dos rejeitos, em função das TRs avaliadas, pode ter como consequência o incremento gradativo da contaminação dessa matriz, nas várzeas à jusante da UHE Risoleta Neves. Os solos aluvionares dos Compartimentos 2, 3 e 4 apresentaram indicadores de contaminação moderada a alta por As e Mn em decorrência do desastre, estando os mesmos

suscetíveis à ampliação da área contaminada em função de novas eventuais deposições do rejeito misturado ao sedimento, proveniente da calha do rio Doce, a cada novo evento de cheia.

- **Como os ambientes continuam sendo afetados?**

A análise do acompanhamento de danos indicou que as alterações ambientais, observadas desde o rompimento da barragem de Fundão, continuam modificando as características dos ecossistemas nas imediações de toda a área afetada. Devido à ausência de implementação de ações reparadoras efetivas, tal qual em decorrência da não aplicação do plano de manejo de rejeitos, os materiais depositados nas áreas extra e intra calha do Compartimento 1, seguem sendo erodidos e transportados até o mar, além de estarem susceptíveis à remobilização e ao extravasamento em decorrência de eventuais eventos pluviométricos intensos, como a cheia verificada em 2020. Todos esses processos são contínuos e dinâmicos e seguem ocorrendo, provocando novos danos, como, por exemplo, a constatada contaminação de solos por EPTs, em especial por As e Mn, nos Compartimentos 2 a 4; e intensificando danos doravante diagnosticados, como a afetação da saúde e bioacumulação de EPTs na biota, ocorrente em todas as áreas investigadas e com tendência ao aumento, devido aos processos de biomagnificação promovidos ao longo da cadeia trófica.

À medida que as cheias promovem o aumento dos processos erosivos nas margens de C1 e o transporte de material dissolvido e suspenso, seja pela redistribuição de sedimentos ou pelo extravasamento da água nas áreas de susceptibilidade, tem-se o aporte do material e deposição deste nas margens e nos solos do entorno, mesmo a jusante de Candonga, afetando as diversas matrizes ambientais.

Dentre outras questões, tal redistribuição frequente dos materiais oriundos do desastre também promove a piora nas condições de saúde dos organismos de flora e fauna, pelo comprometimento das funções vitais, além da ocorrência de bioacumulação de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), junto à perda de conectividade na paisagem, de adequabilidade ambiental e de biodiversidade terrestre ressaltam a presença de danos já identificados, mas que ainda não foram cessados. E, mesmo em determinados danos cuja afetação foi considerada como finalizada, como é o caso da supressão de vegetação nativa, os seus efeitos decorrentes ainda foram verificados como persistentes, alterando outras características do ecossistema.

Estes danos foram verificados ao longo de toda a área de estudo. Porém, na região costeira e marinha, receptora final de todo o carreamento da bacia, com tendência ao favorecimento de incorporação de EPTs pela biota devido à atuação da salinidade como fator abiótico magnificador interferente (PACHANA, WATTANAKORNSIRI, NANUAM, 2010), os efeitos são ainda mais severos, tendo sido já constatados novos danos de afetação de espécies de grande porte, pela contaminação

por EPTs (relativo ao aumento da incidência de encalhes de quelônios e a mortalidade e degradação da saúde de cetáceos).

- **Foram identificados novos danos e/ou foram encontradas diferenças nos danos já diagnosticados?**

Após a conclusão dos relatórios de acompanhamento dos danos, em decorrência da evolução temporal, dinamicidade dos ambientes ou mesmo em função da ocorrência da cheia de 2020, que aumentou a abrangência da área alcançada pelos rejeitos, foram diagnosticados novos danos nos ambientes terrestre, aquático continental e zona costeira e marinha, os quais: i. perda da biodiversidade terrestre, relativamente ao Ambiente Terrestre (TOMO III); ii. contaminação da vegetação aquática, no Ambiente Aquático Continental (TOMO II); e, para a Zona Costeira e Marinha (TOMO IV), iii. contaminação por EPTs e aumento da incidência de encalhes de quelônios e iv. mortalidade e degradação da saúde de cetáceos, ambos associados ao aumento da concentração de EPTs.

Além dos novos danos diagnosticados, a matriz apresentada no Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b) foi revisada no presente estudo, tendo alguns itens sido reclassificados, em termos de sua abrangência, tendência e reversibilidade. Neste contexto, para o Ambiente Terrestre, o dano de contaminação do solo por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) foi alterado, em relação à abrangência, devido à expansão da área de estudo para os Compartimentos 2, 3 e 4, para os quais notou-se uma tendência ao aumento, associada a novas deposições relativas aos eventos de cheia, sendo tal dano considerado grave. Para este ambiente, o acompanhamento também permitiu a alteração da tendência de evolução dos Danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas e de Alterações de paisagem para cessado (embora ambos continuem classificados como gravíssimos e com parcial reversibilidade).

Para o Ambiente Aquático Continental, o dano de alteração da comunidade fitoplanctônica foi reclassificado como cessado, enquanto para as alterações nas comunidades zooplanctônicas, notou-se uma tendência à redução, com reavaliação da reversibilidade como parcial. Também, foram analisados os danos de alteração na composição granulométrica e da concentração de EPTs do sedimento, sendo ambos revistos como irreversíveis. Ainda em sedimentos, para a alteração na comunidade de macroinvertebrados bentônicos, foram revistos os indicadores, tal qual reclassificados para cessados nas áreas do Compartimento 1, incluindo o reservatório da UHE Risoleta Neves. Por fim, para a ictiofauna, relativamente às alterações na composição e estrutura das comunidades de peixes, a tendência foi reclassificada como redução, para os Compartimentos 1 a 3. No entanto, para as alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna, tal qual para o aumento na bioacumulação e biomagnificação, os resultados do acompanhamento levaram à classificação dos

danos como grave e gravíssimo, sendo constatada a tendência de aumento e a sua irreversibilidade.

Para a Zona Costeira e Marinha, houve ainda a modificação da tendência, como cessado, para a alteração na estrutura das comunidades bênticas de fundos inconsolidados e para os danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas. Também, foram revisados os danos de alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna e de aumento na sua bioacumulação. Para estes, embora não haja indicadores de linha-base exatamente para os mesmos pontos avaliados, foi adotado o estudo da FAURG, o qual foi realizado em pontos do mar e na foz dias antes da chegada da lama, possibilitando a classificação de ambos como gravíssimos, irreversíveis e com tendência de aumento ao longo do tempo.

Ademais, toda a matriz foi revisada, com a inclusão da análise importância, relativa ao provimento de Serviços Ecossistêmicos, visando destacar os danos com maior influência sobre os serviços ecossistêmicos ofertados nas regiões afetadas, os quais sugere-se que sejam alvo prioritário de ações de reparação. Nesse contexto foram priorizados, como alta, dois danos, ambos para o Ambiente Terrestre, relativos à supressão de vegetação nativa ciliar e por implantação de infraestrutura. Para os Ambientes Aquático Continental e Zona Costeira e Marinha, pela metodologia adotada, todos os danos classificados apresentaram importância intermediária (muito importante) ou inferior (importante). Para o primeiro ambiente, 10 deles apresentaram o parâmetro médio, os quais: Soterramento de cavas e açudes, Aumento das concentrações de sólidos e de EPTs na água, Supressão de vegetação nativa, Perda da biodiversidade de flora, Assoreamento do canal do rio, Alteração na composição granulométrica e das concentrações de EPTs do sedimento, Mortandade de peixes nos corpos d'água afetados e Alterações na composição e estrutura das comunidades de peixes. Já para o segundo, importância intermediária (muito importante) foi classificada para cinco danos: Aumento das concentrações de sólidos e de EPTs na água, Alteração na composição granulométrica e das concentrações de EPTs do sedimento e Redução da riqueza e diversidade da ictiofauna.

- **Como os serviços ecossistêmicos foram afetados pelo desastre?**

Um dano ao meio ambiente não é um fato isolado, com consequências determinadas somente para o recurso natural afetado, mas ao contrário, pode prejudicar diversos outros sistemas e refletir em perdas de processos ecológicos e de importantes serviços ecossistêmicos (SE). Os SE são definidos como os benefícios que os ecossistemas fornecem à economia e ao bem-estar da humanidade e podem ser divididos em quatro grandes grupos: suporte, provisão, regulação e cultural. São os SE os responsáveis por garantir aos seres humanos a obtenção de alimentos, fibras, energia, água limpa, entre outros, e até mesmo proporcionar relacionamentos sociais e com a própria natureza, modos de vida, recreação e bem-estar.

Após o rompimento da barragem de Fundão e o espalhamento do rejeito ao longo da bacia do rio Doce foi realizado o diagnóstico socioambiental, resultando na identificação de 92 danos individuais às diversas matrizes dos ambientes terrestre e atmosfera, aquático continental, zona costeira e marinha, além do patrimônio cultural. Na sequência, foi realizado o estudo de acompanhamento desses danos, apresentado no presente relatório, em que foram incorporados 4 danos a esse total. Portanto, em conjunto, foram identificados 96 danos socioambientais.

A partir dessa etapa foi empregada uma abordagem holística de modo a permitir a quantificação da perda de processos ecológicos e SE associados ao impacto funcional causado por esses danos. Para o contexto da bacia do rio Doce, foram listados 27 SE potencialmente afetados, sendo seis serviços de provisão, 11 serviços de regulação, sete serviços de suporte e três serviços culturais. Houve serviços mais severamente impactados do que outros e, ainda, um mesmo SE foi associado a mais de um dano, ou mesmo afetado em mais de uma matriz ou ambiente. Dessa maneira, para o entendimento sobre quais os serviços que tiveram uma maior redução em sua oferta e/ou quais foram os ambientes que tiveram um maior decréscimo em número e qualidade de serviço oferecido, foi criado um índice chamado de IPSE (Índice de Perda de Serviço Ecosistêmico). Quanto maior o IPSE, maior a magnitude de perda do serviço.

Os maiores valores de IPSE ocorreram para o Compartimento 1 (C1), tanto devido à maior abrangência de serviços quanto na intensidade da perda. Nesse compartimento, o ambiente fluvial foi um dos mais impactados, sendo que os benefícios que deixaram de ser oferecidos por esse sistema foram: alimentos, matéria-prima para indústria, controle de pragas e redução da disponibilidade de organismos patogênicos, suporte à qualidade dos habitats, manutenção da integridade ambiental, reprodução cultural, identidade cultural e espiritual, beleza cênica, recreação, turismo, educação e pesquisa.

Após extravasar a calha dos rios, a lama primeiramente atingiu as várzeas, ocasionando a diminuição da oferta de 15 serviços oferecidos por este sistema, destacando ter havido a perda completa do serviço de disponibilidade de áreas vitais para fauna e flora no C1. Além desse SE, um IPSE de magnitude de alto impacto foi detectado para os SE de formação de corredores de fluxo gênico, provisão de alimentos e de recursos genéticos e bioquímicos, retenção de solo e sedimentos e regulação biológica e de teias tróficas, que de forma geral podem ser associados à supressão de vegetação na área diretamente afetada e as alterações relacionadas a estrutura dos solos.

Além da degradação ambiental evidente dos sistemas, estes também ficaram sem a capacidade de oferecer espaços para lazer, recreação e turismo; os componentes materiais e imateriais relacionados a herança e expressão cultural e espiritual dos sistemas ficaram indisponíveis, e o modo de vida e as relações sociais proporcionados pelo sistema urbano (Bento Rodrigues) ou pelo rio Doce foi completamente perdido. De modo geral, as comunidades locais e regionais (tradicionais,

de pescadores e urbana) foram as mais afetadas com a perda de todos esses benefícios.

Para o Compartimento 2 (C2), o impacto nas áreas extracalha foi menor quando comparado ao C1, sendo que os maiores valores de IPSE foram registrados para o serviço de disponibilidade de áreas vitais para espécies de flora e fauna, serviços de regulação e serviços de provisão de alimentos e de recursos genéticos e bioquímicos da mata nativa e vegetação secundária. No entanto, o ambiente fluvial apresentou perdas similares às aquelas verificadas no C1, sendo que o IPSE indicou um alto comprometimento dos serviços de disponibilidade de áreas vitais para espécies de flora e fauna, produção primária e ciclagem de nutrientes. O suporte à qualidade dos habitats, processos e interações ecológicas e a manutenção da integridade ambiental foram prejudicados com a perda destes serviços, afetando a oferta de outros, especialmente os serviços de provisão, prejudicados pela mortalidade de peixes e pela alteração na composição, estrutura e dinâmica populacional da ictiofauna. Ainda, o desastre comprometeu significativamente a oferta de SE culturais no C2, e como consequência, a comunidade local deixou de desfrutar dos benefícios potencialmente ofertados pelos serviços, representados pela reprodução cultural, identidade cultural e espiritual, beleza cênica, inspiração cultural, recreação e turismo, educação e pesquisa.

Da mesma maneira que no C2, no Compartimento 3 (C3) os danos no ambiente aquático foram mais graves e em maior número que no ambiente terrestre. Assim, os maiores valores de IPSE ocorreram para o sistema fluvial. Dentre os SE afetados nesse compartimento, citam-se: as perdas dos serviços de suporte de disponibilidade de áreas vitais para espécies de flora e fauna, ciclagem de nutrientes e produção primária e as perdas completas dos serviços de provisão de alimentos e de recursos genéticos e bioquímicos, associadas à perda dos serviços de suporte. Ainda, tendo em vista a contaminação da água, diminuição e/ou remoção de pessoas circulando nas áreas atingidas, dificuldades de acesso, aumento das distâncias e a quebra dos laços existentes, diversas celebrações, festividades, encontros religiosos, atividades esportivas/de lazer e atividades tradicionais foram afetados (tais como faiscação e pesca), o que levou a alterações das práticas culturais no C3 e à perda dos serviços culturais de recreação, lazer e educação e de relações sociais e modo de vida.

A perda de SE está sempre relacionada a uma resposta negativa aos usos do ambiente pelo homem. No caso da zona costeira e marinha (Compartimentos 4 e 5 – C4 e C5), a comunidade local inserida nessa região e que apresenta seu sustento direcionado aos bens que o ambiente aquático estuarino/marinho proporciona, foi a mais afetada, como por exemplo, os beneficiários da pesca. De maneira semelhante, as comunidades que utilizam o litoral para fins culturais, mesmo que de forma esporádica (comunidade regional), algumas delas relacionadas ao turismo, também foram diretamente prejudicadas.

No C4 e C5 ocorreram perdas em vários SE, muitos destes simultaneamente e possivelmente agravados pelos efeitos sinérgicos dos danos ocorridos. Tal panorama demonstra a fragilidade do

sistema marinho costeiro frente à entrada da pluma de rejeito que, temporariamente, diminuiu ou até mesmo pode ter colapsado sua funcionalidade ecossistêmica nas proximidades da foz do rio Doce. Os sistemas de praias e manguezais apresentaram perdas dos serviços de provisão de alimento e recursos genéticos e bioquímicos, de suporte a disponibilidade de áreas vitais para espécies de flora e fauna e de relações sociais e modo de vida. Especificamente o sistema de praias ainda apresentou a perda de serviços culturais relacionados a recreação, lazer e educação e a herança e expressão cultural e espiritual.

A partir da metodologia empregada para avaliar a perda de SE, foi possível compreender quais e com que magnitude ocorreram as alterações ecossistêmicas, à luz da dimensão do desastre. De forma geral, o serviço mais afetado foi o de disponibilidade de áreas vitais para espécies de fauna e flora, seguido do serviço de recreação, lazer e educação. Essa abordagem permitiu ponderar o real significado ecológico dos danos ambientais resultantes do desastre.

- **Quais danos foram mais significativos em cada ambiente?**

Levando em conta os resultados de avaliação da perda dos serviços ecossistêmicos, dos mais de 90 danos ocorridos e diagnosticados devido ao desastre do rompimento da barragem de Fundão, 89 foram considerados como indicadores de mudança de estado dos sistemas ambientais, pela contabilização de todos os danos que afetaram algum serviço em algum sistema ambiental existente em um dos 5 compartimentos da área de estudo. Para o desastre como um todo, identificado no ambiente terrestre, o dano mais significativo foi o de alteração das assembleias faunísticas, afetando os mais diversos serviços ecossistêmicos. Ainda no ambiente terrestre, para citar os 5 danos mais significativos pelo número de serviços afetados, destacam-se os danos de supressão da vegetação nativa pela implementação de infraestrutura, aumento na bioacumulação, perda da biodiversidade terrestre e perda de recursos florestais não madeireiros. No ambiente aquático continental, os danos mais significativos foram o aumento das concentrações de sólidos na água, aumento na bioacumulação, alteração na composição granulométrica do sedimento, assoreamento do canal do rio e mortandade de peixes nos corpos d'água afetados. Para o ambiente de zonas costeiras e marinhas os danos que mais trouxeram perdas de serviços ecossistêmicos foram o aumento da bioacumulação, aumento das concentrações de EPTs na água e redução nas concentrações de oxigênio dissolvido. Já para o patrimônio cultural os danos de alteração dos espaços relacionados às práticas culturais, alteração de espaços de referência de memória e alteração de práticas culturais, foram os que se destacaram em termos de significância para a perda de serviços ecossistêmicos, embora tal tema não tenha sido abordado nesta etapa de acompanhamento de danos.

- **Houve alterações no comportamento dos danos desde o diagnóstico?**

O acompanhamento dos danos ambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, apresentado nesse documento, foi elaborado de maneira diferenciada entre as diversas matrizes e ambientes estudados. Ou seja, em alguns casos houve a inserção e atualização da série de dados com resultados mais recentes (obtidos a partir de campanhas realizadas nos anos de 2019 e 2020); já em outros casos, os danos diagnosticados nos Tomos I a IV (Brasil (MPF)/LACTEC, 2020b-e) foram analisados sob a ótica de uma nova abordagem metodológica (buscando a melhor interpretação possível dos indicadores), ou mesmo foram mensurados em compartimentos que até então não apresentavam classificação nessas regiões. Por fim, à luz de novos resultados e da experiência acumulada durante a primeira etapa do diagnóstico, houve também a identificação e a classificação de novos danos ambientais para algumas matrizes que anteriormente não haviam sido listados.

Todas essas abordagens foram realizadas de modo a identificar eventuais mudanças no comportamento das tendências de evolução e reversibilidade dos danos, com especial enfoque aqueles que ainda não cessaram.

Em casos pontuais, a partir da reinterpretação das evidências, foram definidos como danos cessados aqueles que já apresentavam tendência de redução na classificação do diagnóstico (como por exemplo, o dano de Alterações da Paisagem). Porém, de modo geral, o acompanhamento permitiu verificar que, mesmo após decorridos mais de cinco anos do desastre, os danos socioambientais permanecem ocorrendo.

Nesse sentido, o acompanhamento permitiu dar maior robustez às discussões sobre os comportamentos dos danos, mas, na maior parte das vezes, houve apenas a ratificação da matriz de danos apresentada no diagnóstico (Brasil (MPF)/LACTEC, 2020b). Essa conclusão pode ser verificada com a consolidação da classificação dos 96 danos, conforme apresentado na Matriz, item 7 do presente relatório.

O que é perceptível é que permanece a grande maioria dos danos se concentrando no trecho entre Fundão e a UHE Risoleta Neves (C1) e que a maioria dos danos foi classificada como gravíssimo ao menos em um compartimento afetado. A tendência mostra que apenas 1/3, aproximadamente, dos danos já está cessado, porém mais preocupante é o fato de 1/4 ainda possuir tendência de aumento. A reversibilidade continua apontando para o fato que as alterações provocadas pelo desastre foram tão profundas nos ambientes afetados que os mesmos não voltarão às condições existentes antes do desastre. Os ambientes afetados são resilientes e com os resultados obtidos entende-se que eles alcançarão um novo estado.

- **Qual o cenário para o comportamento dos danos no futuro?**

Por meio das avaliações apresentadas no presente relatório, tal como nos demais TOMOs (II a IV), que fazem parte deste compêndio e detalham o acompanhamento de danos para, respectivamente, os Aquático Continental, Terrestre e Atmosfera, e Zona Costeira e Marinha, há indicativos de que os cenários futuros não serão capazes, por si só, de reverter grande parte dos efeitos ocorridos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão.

Pelos dados obtidos, relativamente aos elementos e substâncias potencialmente tóxicos (ESPTs) aportados em decorrência do desastre, observou-se que as diferentes espécies químicas avaliadas estiveram e estão presentes nos mais variados meios, físico e biótico, estando a sua disponibilidade e toxicidade relativas às dinâmicas ambientais ocorrentes. Dados da literatura científica, já citados na ocasião das hipóteses efetuadas para a análise integrada do Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), indicam que, relativamente aos tempos de residência de elementos no ambiente, estimativas da ordem de centenas a milhares de anos foram levantadas quanto à permanência de espécies químicas ocorrentes em menor concentração, como o Mn^{2+} (SKEAFF; DURBEUIL; BRIGHAM, 2002; PINTILIE et al., 2007; WOOD, 2012; ALI; KHAN; ILAHI, 2019SZIKSZAY, 2012; LÉCUYER, 2016).

Tais aspectos foram evidenciados, de modo geral, pelo acompanhamento dos danos, no qual se permitiu constatar que, mesmo após decorridos mais de cinco anos do desastre, os indicadores da grande maioria deles ainda não apresentaram sinais evidentes de recuperação. Especificamente em relação aos danos de contaminação e bioacumulação dos EPTs na biota, que não haviam sido classificados até então em função da importância de avaliar um maior número de campanhas para um diagnóstico preciso, foram apresentados, nesse relatório, resultados de danos graves ou gravíssimos, reversíveis ou irreversíveis (dependendo do grupo taxonômico avaliado), sendo todos sujeitos à tendência de aumento dos seus efeitos ao longo do tempo.

No presente relatório, foi também realizada a modelagem hidrodinâmica, de modo a compreender eventuais efeitos futuros da ocorrência de novas cheias. Os resultados obtidos, relacionados às cotas de inundação relativas aos TRs de 5 a 100 anos avaliados, constataram que, em decorrência da ausência de ações de manejo de rejeitos, devido ao fato da grande maioria do volume de material extravasado continuar depositada ao longo da calha e das margens, ou seja, a permanência do passivo no local, as áreas afetadas permanecem susceptíveis à ampliação, em termos espaciais percentuais de até 173%, comparativamente ao hoje verificado. Neste momento, como já comentado, o principal meio de remoção do rejeito tem sido pela erosão fluvial, um processo lento e que, embora promova a retirada do contaminante de uma determinada área, leva a afetação de pontos a jusante, em especial à zona costeira e marinha, receptores finais dos corpos hídricos.

Estas mesmas conclusões foram obtidas pela análise das áreas com alto valor para conservação (AVC). Conforme comentado no item específico (capítulo 9), pela triagem efetuada e considerando a fragilidade dos indicadores de AVC identificados, associados à vulnerabilidade natural dos ecossistemas afetados, não é possível afirmar que o ambiente retornará às condições existentes antes do desastre. Há, inclusive, diversas previsões que indicam a impossibilidade de retorno às condições pré-desastre de forma satisfatória, no que diz respeito à biodiversidade.

No entanto, este mesmo estudo (AVC) apontou cinco recomendações essenciais de gerenciamento e monitoramento, produzidas considerando toda a bacia hidrográfica, que poderão, a longo prazo, juntamente com aquelas elencadas nos tomos específicos de cada um dos ambientes (Relatórios de Acompanhamento de Danos – TOMOS II a IV) auxiliar na restauração das condições ambientais, dentre as quais: (1) fortalecimento das Unidades de Conservação (UC) ao longo do rio Doce, para possibilitar uma gestão territorial eficaz dos recursos naturais, especialmente aquelas mais vulneráveis à degradação ambiental; (2) restauração das matas ciliares do rio Doce e seus afluentes, visando reduzir o assoreamento do rio e garantir a manutenção da qualidade da água; (3) ampliar a oferta de assistência técnica para promoção de práticas agropecuárias sustentáveis e alternativas à indisponibilidade de pescados; (4) resgate e valorização de práticas culturais dos povos tradicionais; e (5) melhoria do entendimento sobre a relação dos povos tradicionais e comunidades rurais com os recursos naturais ao longo da Bacia do rio Doce.

Diante deste complexo cenário, embora a resiliência seja uma das principais características do meio ambiente, pode-se afirmar que há indícios técnico-científicos robustos que indicam que, na ausência de ações de reparação e mitigação, o comportamento de grande parte dos danos no futuro, em curto e médio prazo, poderá manter-se ou até progredir, alterando as características dos meios físico e biótico, tal qual as dinâmicas com a sociedade que faz uso e reside da bacia do rio Doce. Assim, torna-se imperativa a manutenção das atividades de acompanhamento dos danos e monitoramento dos efeitos decorrentes, aliada a ações de manejo dos rejeitos e de reparação efetiva, com enfoque nos aspectos e áreas de maior valor de conservação, de modo a garantir a saúde e segurança das comunidades e ecossistemas ali presentes.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio Doce**. Volume 1, n. 1, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS/COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (ANA/CBH-DOCE). **A bacia do Rio Doce: caracterização da bacia**. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/cbhriodoce/bacia/caracterizacao.asp>. Acesso em: 2 Ago. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Portaria - nº 685, de 27 de agosto de 1998. **Aprova o Regulamento técnico: "Princípios gerais para o estabelecimento de níveis máximos de contaminantes químicos em alimentos" e seu anexo: "Limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos**, 1998. 5p.
- AGÊNCIA BRASIL. Tragédia em Mariana: água segue imprópria para o consumo. 2017. Disponível em: <https://www.folhadelondrina.com.br/geral/tragedia-em-mariana-agua-segue-impropria-para-o-consumo-992733.html>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Hindawi Journal of Chemistry*, 1-15, 2019, Article ID 6730305, <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>.
- ALMEIDA, N. L.; RODRIGUES, L. C. R.; CAMPOS, J. C. F.; AMODEO, N. B. P. Diagnóstico socioeconômico e ambiental do leste mineiro como subsídio para políticas públicas de planejamento e desenvolvimento regional. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2., 2004, Santa Cruz do Sul. **Anais...** Santa Cruz do Sul, 2004. Disponível em: <www.unisc.br/site/sidr/2004/planejamento/15.pdf>. Acesso em: 3 maio 2017.
- ALVES, A. **Os argonautas do mangue**. Pp. 17-72. Campinas: Editora da UNICAMP, São Paulo, 2004.
- ALVES, R.J.V. & J. Kolbek. **Plant species endemism in savanna vegetation on table mountais (Campo Rupestre) in Brazil**. *Vegetation* 113: 125-139, 1994.
- ANDRADE, C. A. Estudo ecotoxicológico no trecho médio da bacia do rio Doce – MG. 2003. Dissertação (Mestrado) – **Programa de Pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução - RDC nº 42**, de 29 de agosto de 2013. Dispõe sobre o Regulamento Técnico MERCOSUL sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos, 2013. 11p.
- ASMUS, M.L.; NICLODI, J.L.; SCHERER, M.; GIANUCA, K.; COSTA, J.; GOERSCH, L.; HALLAL, G.; VICTOR, K.; FERREIRA, W.; RIBEIRO, J.; PEREIRA, C.; BARRETO, B.; TORMA, L.; SOUZA, B.; MASCARELLO, M.; VILLWOCK, A. Simples para ser útil: base ecossistêmica para o gerenciamento costeiro. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**. 2018.
- ATKINS, J.P.; BURDON, D.; ELLIOTT, M.; GREGORY, A.J. Management of the marine environment: Integrating ecosystem services and societal benefits with the DPSIR framework in a systems approach. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 2, p 215-226, 2011.
- ÁVILA, J. L. T.; MONTE-MÓR, R. L. M. Urbanização e impactos ambientais: uma análise da relação entre as características dos espaços urbanos e a poluição hídrica na região do médio rio Doce (MG). In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 7., 2007, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza, 2007. p. 1-18. Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/vii_en/mesa3/trabalhos/urbanizacao_e_impactos_ambientais.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2017.
- BARBOSA, F.A.R. ALONSO, L. BRITO, M.C.W. LAUREANO, F.V. MAY, P. SÁNCHEZ L.E. KAKABADSE, Y. Painel do Rio Doce - Questões em Foco N° 3. **Riscos da supressão de fluxos naturais em um sistema fonte-mar. O caso da Lagoa Juparanã, Espírito Santo, Brasil**. Disponível em: https://www.iucn.org/sites/dev/files/rio-doce-panel-issue-paper-3-pt_0.pdf. Acesso em 20.jul.2021.
- BARRAGÁN, J.M. **Política, Gestión y Litoral: una nueva visión de la gestión integrada de áreas litorales**. Madrid:

- Tébar Flores. 685p., ISBN: 978-84-7360-518-2, 2016.
- BATISTA, J. O.; COSTA, E. C. P.; DOS SANTOS, D. H.; DE SANT'ANA FILHO, J. N.; BASTOS, L. A. C.; FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. F. Utilização de Rejeito de Barragem de Minério de Ferro na Construção Civil. **Relatório Técnico**. Ouro Preto-MG, 2016.
- BASTOS, L. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária. Dissertação de mestrado. **Universidade Federal de Ouro Preto**. 2013.
- BASTOS, S. C. **Evaluation indicators application and monitoring of a forestry regeneration project, Private Reserve of Natural Patrimony - RPPN Farm Bulcão, Aimorés, MG**. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado em Botânica estrutural; Ecologia e Sistemática) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- BEVILACQUA, J. E. Estudo sobre a caracterização e a estabilidade de amostras de sedimentos do rio Tietê, SP. 1996. Tese (Doutorado) - **Programa de Pós-graduação em Química do Instituto de Química da USP**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. 190p.
- BÖHNKE-HENRICH, Anne; BAULCOMB, Corinne; KOSS, Rebecca; HUSSAIN, S. Salman; GROOT, Rudolf S. de. Typology and indicators of ecosystem services for marine spatial planning and management. **Journal Of Environmental Management**, v. 130, p. 135-145, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.027>.
- BRAGA, F. Acordo define pagamento de quase R\$1 bi para reparar desastre de Mariana. **UOL Notícias**, 01 set. 2020. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agencia-estado/2020/09/01/acordo-define-destinacao-de-quase-r-1-bi-em-reparacao-por-desastre-de-mariana.htm>. Acesso em: 04 dez. 2020.
- BRANDT MEIO AMBIENTE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA. Samarco Mineração S.A. – Mariana, MG. Estudo de Impacto Ambiental - EIA. Barragem de Rejeito do Fundão. Novembro de 2005.
- BRASIL. **Decreto nº 2.519/1998**. Promulga a Convenção sobre Diversidade Biológica, assinada no Rio de Janeiro, em 05 de junho de 1992. Presidência da República Federativa do Brasil. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em http://planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2519.htm.
- _____. **Decreto nº 4.340/2002**. Regulamenta artigos da Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4340.htm.
- _____. **Decreto nº 5.092/2004**. Define regras para identificação de áreas prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade, no âmbito das atribuições do Ministério do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5092.htm.
- _____. **Decreto nº 5.746/2006**. Regulamenta o art. 21 da Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Decreto/D5746.htm.
- _____. **Decreto nº 5.758/2006**. Institui o Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas - PNAP, seus princípios, diretrizes, objetivos e estratégias, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Decreto/D5758.htm.
- _____. **Decreto nº 90.222/1984**. Cria, no Estado do Espírito Santo, a Reserva Biológica de Comboios, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-90222-25-setembro-1984-440496-publicacaooriginal-1-pe.html>.
- _____. **Decreto nº 87.588 de 20/09/1982**. Cria, no Estado do Espírito Santo, a Reserva Biológica de Sooretama, com os limites que especifica e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1982.
- _____. **Decreto s/ nº de 13/10/2014**. Cria o Parque Nacional da Serra do Gandarela, localizado nos Municípios de Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, Itabirito e Rio Acima, Estado de Minas Gerais. Brasília, DF, 2014.
- _____. **Decreto nº s/nº de 28/11/2002**. Cria a Floresta Nacional de Goytacazes, no Município de Linhares, no Estado do Espírito Santo, e dá outras providências. Brasília, DF, 2002.
- _____. **Decreto nº s/nº de 18/06/2010**. Dispõe sobre a criação do Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz, no Estado do Espírito Santo, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

- _____. **Decreto nº de 5/2012.** Dispõe sobre a criação e ampliação dos limites da Floresta Nacional de Goytacazes, no Município de Linhares, no Estado do Espírito Santo, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 jun. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Dsn/Dsn13322.htm>.
- _____. **Deliberação CONABIO nº 40/2006.** Dispõe sobre a aprovação das Diretrizes e Prioridades do Plano de Ação para implementação da Política Nacional de Biodiversidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/conabio/_arquivos/Delib_040.pdf.
- _____. **Guia para gestão de planos de ação nacional para a conservação das espécies ameaçadas de extinção: PAN - elabore - monitore - avalie.** Brasília: ICMBio, 2018b.
- _____. **Lei nº 12.651/2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. In: Diário Oficial da União. Brasília, 2012.
- _____. **Lei nº 9.985/2000.** Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação e dá outras providências. Brasília, DF, 2000.
- _____. **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Goytacazes,** Espírito Santo, 202 p. 2013.
- _____. **Plano de Manejo da Reserva Biológica de Comboios.** Espírito Santo, 87p. 2018a.
- _____. **Portaria MMA nº 9/2007.** Dispõe sobre as Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira. Brasília, DF: MMA, 2007. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Portaria/2007/p_mma_09_2007_areaprioritariaparabiodiversidade_revvd_p_126_2004.pdf.
- _____. **Portaria MMA nº 126/2004.** Dispõe sobre as Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/chm/_arquivos/port126.pdf. Acesso em 19 de dezembro de 2010.
- _____. **Portaria MMA nº 463/2018.** Dispõe sobre as Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira. Disponível em: http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/55881195/do1-2018-12-19-portaria-n-463-de-18-de-dezembro-de-2018-55880954.
- _____. **Portaria MMA Nº 444/2014.** Dispõem sobre o reconhecimento das espécies da fauna brasileira ameaçadas de extinção. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao-ARQUIVO/00-saiba-mais/04_-_PORTARIA_MMA_N%C2%BA_444_DE_17_DE_DEZ_DE_2014.pdf. Acesso em: 09 dez. 2020.
- BRASIL. ESPÍRITO SANTO. **Decreto nº 2.529-R, de 2 de junho de 2010.** Institui Corredores Ecológicos Prioritários do Espírito Santo no âmbito do Corredor Central da Mata Atlântica e o Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Muriquis (PAN Muriqui). Diário Oficial da União, Vitória, ES, 2010.
- _____. **Lei ordinária nº 2.322 de 05/12/2002.** Dispõe sobre o código municipal do meio ambiente do Município de Linhares, e dá outras providências. Linhares, ES, 2002.
- _____. **Lei ordinária nº 994 de 14/07/1986.** Cria Reserva Ecológica dos Manguezais Piraque-Açú e Piraque-Mirim. Aracruz, ES, 1986.
- BRASIL. MINAS GERAIS. **Lei ordinária nº 4.495 de 14/06/1967.** Cria o Parque Estadual do Itacolomi, nos municípios de Ouro Preto e Mariana, em terrenos devolutos do Estado de Minas Gerais. Brasília, DF, 1967.
- _____. **Decreto nº 19.157 de 24/04/1978.** Cria a estação biológica do Tripuí, no município de Ouro Preto, e da outras providências. Ouro Preto, MG, 1978.
- _____. **Decreto nº 30.264 de 16/10/1989.** Dispõe sobre a implantação de Área de Proteção Ambiental - APA no município de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 1989.
- _____. **Decreto nº 35.624 de 08/06/1994.** Declara como Área de Proteção Ambiental a região situada nos municípios de Belo Horizonte, Brumadinho, Caeté, Ibirité, Itabirito, Nova Lima, Raposos, Rio Acima e Santa Bárbara, e dá outras providências. Brasília, DF, 1994.
- _____. **Decreto nº 45.179 de 21/09/2009.** Cria o Monumento Natural Estadual de Itatiaia, nos municípios de Ouro Branco e Ouro Preto. Brasília, DF, 2009.
- _____. **Decreto nº 45.180 de 21/09/2009.** Cria o Parque Estadual da Serra do Ouro Branco, nos municípios de

- Ouro Branco e Ouro Preto. Brasília, DF, 2009.
- _____. **Decreto-Lei nº 1.119 de 14/07/1944.** Cria o Parque Florestal do Rio Doce. Belo Horizonte, MG, 1944.
- _____. **Decreto nº s/nº de 21/10/2003.** Cria a Floresta Estadual do Uaimii. Belo Horizonte, MG, 2003.
- _____. **Lei nº 447 de 01/10/2008.** Denomina o Parque Horto dos Contos. Ouro Preto, MG, 2008.
- _____. **Lei nº 695 de 15/09/2011.** Define como Unidade de Proteção Integral, na categoria Monumento Natural Municipal, a área da Gruta Nossa Senhora da Lapa. Ouro Preto, MG, 2011.
- _____. **Lei nº 305 de 30/12/1968.** Dispõe sobre a criação de parque (PARQUE MUNICIPAL DA CACHOEIRA DAS ANDORINHAS.) - Revogada pela Lei nº 69-2005. Ouro Preto, MG, 1968.
- _____. **Lei ordinária nº 465 de 07/01/2009.** Cria o Parque Natural Municipal Arquelógico Do Morro Da Queimada. Ouro Preto, MG, 2009.
- _____. **Deliberação Normativa Copam Nº 147, de 30 de abril de 2010.** Aprova a Lista de Espécies Ameaçadas de Extinção da Fauna do Estado de Minas Gerais, 2010.
- _____. **Decreto nº 39.908/1998 de 22/09/1998.** Cria o Parque Estadual de Sete Salões e dá outras providências.
- _____. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011.** Estabelece os Valores de Referência de Qualidade dos Solos. Belo Horizonte: Diário do Executivo, 2011.
- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). 4ª Câmara de Coordenação e Revisão Série Manuais de Atuação. **Valoração de danos em matéria de meio ambiente e patrimônio cultural** - Roteiros para vistoria expedita e perícia multidisciplinar em procedimentos do Ministério Público Federal. Série Manuais de Atuação, 2. Brasília – DF. 2014.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Sudeste.** Brasília, DF, 2006.
- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório de Linha-Base: Volume I – Meio Físico.** Curitiba: Lactec, 2017a.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório de Linha-Base: Volume I – Meio Físico.** Curitiba: Lactec, 2017a.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório de Linha-Base: Volume II – Meio Biótico.** Curitiba: Lactec, 2017b.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório de Linha-Base: Resumo Executivo.** Curitiba: Lactec, 2017c.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório Pós-desastre – Grupo 1: Qualidade de água, Águas subterrâneas, Pesca e Ecotoxicologia.** Curitiba: Lactec, 2018a.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório Pós-desastre – Meios Físico e Biótico: Geologia, Solos, Hidrologia e Hidrossedimentologia, Qualidade de sedimentos, Unidades de Conservação, Flora e Fauna.** Curitiba: Lactec, 2018b.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório Consolidado Bens Arqueológicos e Culturais.** Curitiba: Lactec, 2018c.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **1º Relatório Parcial de Resultados.** Curitiba: Lactec, 2018d.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório Metodológico de Valoração Econômica e Identificação de Danos Ambientais – Versão Preliminar.** Curitiba: Lactec, 2018e.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Caracterização Parcial do Rejeito de Mineração do Complexo de Germano.** Curitiba: Lactec, 2018f.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do

rio Doce. **Atualização Linha-Base – Contextualização**. Curitiba: Lactec, 2019a.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Atualização Linha-Base – Ambientes Aquáticos Continentais**. Curitiba: Lactec, 2019b.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Atualização Linha-Base – Ambientes Terrestres e Atmosfera**. Curitiba: Lactec, 2019c.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Atualização Linha-Base – Zona Costeira e Marinha**. Curitiba: Lactec, 2019d.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **2º Relatório Parcial de Resultados**. Curitiba: Lactec, 2019e.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais**. Curitiba: Lactec, 2020a.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO I – Contextualização. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020b.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO II – Ambientes Aquáticos Continentais. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020c.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO III – Ambiente Terrestre e Atmosfera. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020d.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO IV – Zona Costeira e Marinha. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020e.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO V – Patrimônio Cultural. Bens Materiais. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020f.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO V – Patrimônio Cultural. Bens Imateriais. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020g.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO V – Patrimônio Cultural. Bens Arqueológicos. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020h.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Terceiro Relatório Parcial de Resultados: Cheia de 2020**. Curitiba: Lactec, 2020i.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Valoração Econômica dos Danos Socioambientais: Valoração Contingente**. Curitiba: Lactec, 2020j.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Diagnóstico dos danos ao patrimônio cultural nas Terras Indígenas**. Curitiba: Lactec, 2020k.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Aditivo da pesca - Qualificação e quantificação de Elementos Potencialmente Tóxicos (metais e semimetais) em pescado proveniente da área de proibição da pesca – região entre a Barra do Riacho, em Aracruz, e Degredo/Ipiranguinha, em Linhares, litoral do Espírito Santo**. Curitiba: Lactec, 2020l.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Parecer técnico sobre a área de passagem e deposição dos rejeitos advindos do rompimento da barragem de Fundão ao longo dos rios afetados – APDL 2016**. Curitiba: Lactec, 2020m.

- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Parecer técnico conjunto Lactec/Ramboll acerca da reparação dos danos ao patrimônio histórico cultural decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, ao longo da bacia**. Curitiba: Lactec, 2020n.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Valoração Econômica dos Danos Socioambientais**. Curitiba: Lactec, 2021a.
- _____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **Parecer técnico nº 35 – Cenários de danos ao patrimônio cultural**. Curitiba: Lactec, 2021b.
- BRASIL. Ministério da Saúde (MS). Portaria Nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 dez. 2011.
- BREMER, S.; GLAVOVIC, B. Mobilizing knowledge for coastal governance: re-framing the science–policy interface for integrated coastal management. **Coastal Management**, v. 41, n. 1, p. 39-56, 2013.
- BROWN, E. et al. **Guia geral para identificação de Altos Valores de Conservação**. HCV Network, p. 74, 2013.
- CAMPOS, I. C. **As áreas de preservação permanentes de recursos hídricos são capazes de manter a conectividade estrutural e funcional da paisagem? Um estudo de caso no entorno do Parque Estadual do Rio Doce**. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia. 2017. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/IGCM-AXAJ75/1/iara_campos.pdf
- CARMO, F.F. **Importância Ambiental e Estado de Conservação dos Ecossistemas de Cangas no Quadrilátero Ferrífero e Proposta de Áreas-Alvo para a Investigação e Proteção da Biodiversidade em Minas Gerais**. Dissertação (UFMG), 90 p, 2010.
- CARR, E.R.; WINGARD, P.M.; YORTY, S.C.; THOMPSON, M.C.; JENSEN, N.K; ROBERSON, J. Applying DPSIR to sustainable development. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 14, n.6, p.543-555, 2007.
- CARVALHO B.; et al. **Anurofauna do Parque Nacional da Serra do Gandarela, Minas Gerais: uma contribuição do Plano de Ação Nacional para a Conservação da Herpetofauna da Serra do Espinhaço**. Anais do VIII Congresso Brasileiro de Herpetologia. ISSN 2527-0877, 2017.
- CASTRO, E. Produção de Pellet Feed a Partir de Lamas. **Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais**. 2012.
- CBD. **The Ecosystem Approach** (CBD Guidelines). Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 50p. 2004. Disponível em: <https://www.cbd.int/doc/publications/ea-text-en.pdf>. Acesso em: 07 set. 2020.
- CHAPMAN, P. M.; PAINE, M. D.; ARTHUR, A. D.; TAYLOR, L. A. A triad study of sediment quality associated with a major, relatively untreated marine sewage discharge. **Marine Pollution Bulletin**, v. 32, n. 1, p. 47-67, 1996.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1ª ed. São Paulo: Blucher. 240p. 1999.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE CBH-DOCE, 2005. **Diagnóstico Consolidado da Bacia**. Disponível em <http://www.cbhdoce.org.br/documentos-sobre-a-bacia/diagnostico-consolidado-da-bacia-do-rio-doce>.
- COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH-DOCE). **A bacia**. Governador Valadares: CBH-DOCE, 2014. Disponível em <<http://www.cbhdoce.org.br/a-bacia>>. Acesso em: 3 maio 2017.
- CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio Doce: relatório final**. Consórcio Ecoplan-Lume, 2010. 1 v. Disponível em: <www.cbhdoce.org.br/wpcontent/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf>. Acesso em: 2 maio 2017.
- CORRÊA, R.S.; SOUZA, A.N. 2013. Valoração de danos indiretos em perícias ambientais. **Revista Brasileira de Criminalística**, v.2, n.1, p.7-15, 2013.
- COSTA, A. T.; NALINI JR, H. A.; CASTRO, P. T. A.; TATUMI S. H. Análise estratigráfica e distribuição do arsênio em depósitos sedimentares quaternários da porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, bacia do Ribeirão do Carmo, MG. **Geociências**, v. 63, n. 4, p. 703-714, 2010.
- DE GROOT, R.S.; ALKEMADE, R.; BRAAT, L.H.; WILLEMEN, L. Challenges in integrating the concept of ecosystem

- services and values in landscape planning, management and decision making. **Ecological Complexity**, v.7, p.260-272, 2010.
- DENOBILE, M. Estudo da ocorrência de compostos arseniais, mercuriais e de selênio em cações comercializados na cidade de São Paulo. 2007. Tese (Doutorado) - **Programa de Pós-graduação em Toxicologia e Análises Toxicológicas da USP**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 166p.
- DRUMMOND, G.M.; et al. **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação**. 2ª ed, Fundação Biodiversitas, Belo Horizonte. 222 p, 2005.
- EEA. Environmental indicators: Typology and overview. **Technical report No 25**. Copenhagen: European Environment Agency, 1999.
- EHARA, M., HYAKUMURAB, K., SATOC, R., KUROSAWAB, K., ARAYAD, K., SOKHE, H., KOHSAKAF, R. 2018. Addressing Maladaptive Coping Strategies of Local Communities to Changes in Ecosystem Service Provisions Using the DPSIR Framework. **Ecological Economics**. V. 149, p. 226-238. 2018.
- ELLIOT, M. Marine science and management means tackling exogenic unmanaged pressures and endogenic managed pressures – a numbered guide. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n.4, p. 651-655, 2010.
- ELLIOTT M.; O'HIGGINS, T.G. From DPSIR the DAPSI(W)R(M) Emerges... a Butterfly – 'protecting the natural stuff and delivering the human stuff'. In: O'HIGGINS, T.G.; LAGO, M.; DEWITT, T.H. **Ecosystem-Based Management, Ecosystem Services and Aquatic Biodiversity: Theory, Tools and Applications**, Springer. p.61-86, ISBN 978-3-030-45843-0, 2020.
- ELLIOTT, M. The role of the DPSIR approach and conceptual models in marine environmental management: an example for offshore wind power. **Marine Pollution Bulletin**, v.44, n.6, p. iii–vii, 2002.
- FAO. Ecosystem Services & Biodiversity (ESB). Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/en/>. Acesso em: 23 out. 2020.
- FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; BUSTAMANTE, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D.C.; DIRZO, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JR, P. M.; MILLAN, V. E. G.; MIELKE, C.; RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P.; SCARIOT, A.; SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.
- FERREIRA, C. E. L.; GONÇALVES, J.E.A. & COUTINHO, R. **Ship hulls and oil platforms as potential vectors to marine species introduction**. Journal of Coastal Research, SI 39. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium. 1341 - 1346. Itajaí, SC, Brazil, 2006. ISSN 0749-0208
- FIOROTT, T. H. A morte do Uatu: impactos do desastre da Samarco/Vale/BHP sobre a sustentabilidade do povo Krenak. **Dissertação de Mestrado**. Universidade de Brasília. 2017.
- FOLHA VITÓRIA. **Barragem do Rio Pequeno, em Linhares, é totalmente retirada**. 2019. Disponível em: <<https://www.folhavitória.com.br/geral/noticia/12/2019/barragem-do-rio-pequeno-em-linhares-e-totalmente-retirada>>. Acesso em 01/12/2020.
- FORMIGONI, Y.; BRITES, A. P.; FERNANDES, C.; PORTO, M. Análise crítica da curva de permanência de qualidade da água com base em dados históricos. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió, Brasil, 2011.
- FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G. T. W. **Metal pollution in the aquatic environment**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- FRANCO, L. C.; DOS SANTOS, D. H.; ROSA, P. P. G.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. F. Aplicação de Rejeito de Mineração como agregado para a Produção de Concreto. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto**, Natal – RN, Outubro de 2014.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DO ÍNDIO (FUNAI). Disponível em: <https://www.gov.br/funai/pt-br>. Acesso em 28 dez. 2020.
- FUNDAÇÃO PALMARES. Disponível em: <http://www.palmares.gov.br/>. Acesso em 28 dez.2020.
- FUNDAÇÃO RENOVA, JACOBS, CH2M. Volume 3 – Aplicação do plano de manejo de rejeito nos trechos 1 ao 4. Relatório Técnico. Fevereiro de 2018.

- FUNDAÇÃO RENOVA. Modelo digital de terreno obtida de dados oriundos de perfilamento aéreo a laser executado no período entre 30/11/2018 e 19/06/2019 pela empresa Fototerra. 2019.
- GERAIS, B. Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão, v. 38, n. 2, p. 139-162, 2016.
- GIULIETTI, A.M., J.R. PIRANI & R.M. HARLEY. Espinhaço Range region – Eastern Brazil. In: S.D. Davis, V.H. Heywood, O. Herrera-MacBryde, J. Villa-Lobos & A.C. Hamilton (eds). **Centres of plant diversity: a guide and strategy for their conservation**. Vol. 3. The Americas. WWF/IUCN Publications Unit., Cambridge. pp. 397-404, 1997.
- GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. Memorando Técnico MT-253_159-515-2282. Concentração de metais em água, sedimentos, tecido de peixes e organismos aquáticos coletados na região marinha e estuarina da foz do rio Doce. Março, 2016a.
- _____. Memorando Técnico MT-023_159-515-2282_01-B. Rompimento da Barragem de Fundão – Caracterização Geoquímica de Rejeitos de Fonte e de Rejeitos Depositados (Base de Dados Secundária). Abril, 2016b.
- GREGORY, A.J.; ATKINS, J.P.; BURDON, D.; ELLIOTT, M. A problem structuring method for ecosystem-based management: The DPSIR modelling process. **European Journal of Operational Research**, v.227, n.3 p. 558-569, 2013.
- GUEDES, G. R.; SIMÃO, A. B.; DIAS, C. A.; BRAGA, E. O. Risco de adoecimento por exposição às águas do Rio Doce: um estudo sobre a percepção da população de Tumiritinga, Minas Gerais, Brasil. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 31 (6): 1257-1268, 2015.
- GUEVARA, Y. Z. C; SOUZA, J.J.L.L.; VELOSO, G.V.; VELOSO, R.W.; ROCHA, P.A.; ABRAHÃO, W.A.P.; FILHO, E.I.F. Reference Values of Soil Quality for the Rio Doce Basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 42, p. 1-16, 2018.
- GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI, M. A. P.; ZULIANI, D. Q.; CAMPOS, M. L.; MARCHI, G. Elementos traço em solos e sistemas aquáticos. **Tópicos em Ciências do Solo**, v. 4, p. 345-390, 2005.
- GUIMARÃES, C.S. et al. **Anfíbios do Parque Estadual do Rio Doce**, Minas Gerais. Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Biologia Animal, Museu de Zoologia João Moojen, Viçosa, Minas Gerais, 57 pp. 2019.
- GUIMARÃES, M.C.C.S. Ecotoxicologia como ferramenta de monitoramento na gestão municipal de recursos hídricos no município de Barão de Cocais – MG. 2007. Monografia – **Programa de Pós-graduação em Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- IBAMA. Levantamento de imagens aéreas. Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. **Sistema Compartilhado de Informações Ambientais**, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2016. Disponível em: http://siscom.ibama.gov.br/imgmariana/3_Imagens_IBAMA_Sobrevoo_Trecho_Ipatinga-GovValadares_14112015/GOPR3518.JPG. Acesso em: 04 dez. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Arquivos geoespaciais de povoados e comunidades no Brasil**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em 28 dez. 2020.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/apacostadasalgas/>. Acesso em 28 dez. 2020.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). **Proposta de criação do Parque Nacional da Serra do Gandarela**, Brasília, 202 p. 2010.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). **Atlas da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção em Unidades de Conservação Federais**. Brasília: ICMBio, 2011.
- INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (IEF). **Plano de Manejo do Parque Estadual do Rio Doce**. Unidade de conservação e Zona de amortecimento. Encarte 4. Belo Horizonte: IEF, 2001.
- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (IEMA). **Plano de Manejo da Reserva Ecológica dos Manguezais Piraquê-açu e Piraquê-mirim, Aracruz, Espírito Santo**. Relatório Final. 2010.

- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). **Síntese do Processo de Definição e Planejamento dos Corredores Prioritários no Espírito Santo**. Projeto Corredores Ecológicos. Cariacica: 2006. 28p.: il. Disponível em <http://nipoa.sp.gov.br/Uploads/Cartilhas/CARTILHAEDUCATIVAPROJETOCORREDORESECOLOGICOS.pdf?iframe=true&width=720&height=100%>.
- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO (IEMA). Dados topográficos de um levantamento realizado por “Hiparc Geotecnologia”, entre os anos de 2012 a 2015. Disponível em: http://geobases.static.es.gov.br/MAP_ES_2012_2015/MAP_ES_2012_2015_MDT_URL_LIST.txt.
- INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). Disponível em: <http://incra.gov.br/pt/>. Acesso em 28 dez. 2020.
- INSTITUTO TERRA. Disponível em: <https://institutoterra.org/rppn-fazenda-bulcao-e-refugio-para-especies-ameacadas-da-fauna-brasileira/>. Acesso em: 28 dez. 2020.
- INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). Disponível em: <https://www.iucnredlist.org/>. Acesso em 28 dez. 2020.
- IOCCG. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Lee, Z.-P. (ed.), **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5, IOCCG, Dartmouth, Canada**. 2006.
- IUCN. Novas recomendações divulgadas pelo Painel do Rio Doce da UICN pedem uma abordagem mais unificada sobre a proibição da pesca na região. **International Union for Conservation of Nature**, 12 jun. 2019. Disponível em: <https://www.iucn.org/pt/news/rio-doce-panel/201906/novas-recomendacoes-divulgadas-pelo-painel-do-rio-doce-da-uicn-pedem-uma-abordagem-mais-unificada-sobre-a-proibicao-da-pesca-na-regiao>. Acesso em: 04 dez. 2020.
- JACOB, A. C. P. Os 5 rios mais poluídos do Brasil. **Aquafluxus**, 23 dez. 2016. Disponível em: <<http://www.aquafluxus.com.br/os-5-rios-mais-poluidos-do-brasil>>. Acesso em: 4 maio 2017.
- JACOBI, C.M. & F.F. CARMO. **The contribution of ironstone outcrops to plant diversity in the Iron Quadrangle, a threatened Brazilian landscape**. *Ambio* 37: 324-326, 2008.
- JUNCÁ, F. A.; PAVAN, D.; JESUS, T.B.; ETEROVICK, P. Girinos como bioindicadores da qualidade da água do rio Doce. **Relatório Final Greenpeace**, junho, 2017. 33p.
- KEESEN, F.; NUNES, A. V.; SCOSS, L. M. **Updated list of mammals of Rio Doce State Park**, Minas. 2016.
- KEBLE, C.R.; LOOMIS, D.K.; LOVELACE, S.; NUTTLE, W.K.; ORTNER, P.B.; FLETCHER, P.; COOK, G.C.; LORENZ, J.J.; BOYER, J.N. The EBM-DPSER Conceptual Model: Integrating Ecosystem Services into the DPSIR Framework. **PLOS ONE**, v. 8, n.8: e70766, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070766>, 2013.
- LANDERS, D.H.; NAHLIK, A.M. **Final Ecosystem Goods and Services Classification System (FECS-CS)**. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C. EPA/600/R-13/ORD-004914, 2013.
- LANDSBERG, F.; TREWEEK, J.; STICKLER, M.M.; HENNINGER, N.; VENN, O. **Weaving Ecosystem Services into Impact Assessment: A Step by Step Method (version 1.0)**. WRI World Resources Institute, 47p. 2013.
- LANG, D.J.; WIEK, A.; BERGMANN, M.; STAUFFACHER, M.; MARTENS, P.; MOLL, P.; SWILLING, M.; THOMAS, C.J. Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. **Sustainability Science**, v.7, p. 25-43, 2012.
- LÉCUYER, C. Seawater Residence times of some elements of geochemical interest and the salinity of the oceans. **Bulletin de la Societe Geologique de France**. 187. P. 245-260. 2016.
- LIMA E SILVA, C.; COSTA, A. T.; LANDA, G. G.; FONSECA, H. F. C.; SILVEIRA, A. Evaluation of sediment contamination by trace elements and the zooplankton community analysis in area affected by gold exploration in Southeast (SE) of the Iron Quadrangle, Alto Rio Doce, (MG) Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 25, n. 2, p. 150-157, 2013.
- LIMA, H. S. Qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do Rio Doce e sua relação com aspectos socioambientais. 2016. Dissertação (Mestrado) - **Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 170p.

- LITIG, Claudio Ernani et al. Povos indígenas no Espírito Santo: uma história de luta e resistência. **Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo**. 2016.
- LOPES, G. M. Flotação direta de minério de ferro. Dissertação de Mestrado. **Universidade Federal de Ouro Preto**. 2009.
- MAGNAGO, Luiz Fernando S.; EDWARDS, David P.; EDWARDS, Felicity A.; MAGRACH, Ainhoa; MARTINS, Sebastião V.; LAURANCE, William F.. Functional attributes change but functional richness is unchanged after fragmentation of Brazilian Atlantic forests. **Journal Of Ecology**, v. 102, n. 2, p. 475-485, 15 jan. 2014. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2745.12206>.
- MAIA, F. F. Elementos traços em sedimentos e qualidade da água de rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, MG. 2017. Dissertação (Mestrado). **Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, 2017. 57p
- MALINOWSKI, R., GROOM, G., SCHWANGHART, W., & HECKRATH, G. (2015). Detection and delineation of localized flooding from WorldView-2 multispectral data. **Remote sensing**, **7(11)**. 2015. pp 14853-14875.
- MAGALHÃES, D. P.; FERRÃO FILHO, A. S. A ecotoxicologia como ferramenta no biomonitoramento de ecossistemas aquáticos. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 3, p. 355-381, 2008.
- MAPAS DE COBERTURA VEGETAL (MAPBIOMAS). Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. Acesso em: 28 dez. 2020.
- MATEUS, M.; CAMPUZANO, F. The DPSIR framework applied to the integrated management of coastal areas. **Perspectives on Integrated Coastal Zone Management in South America**, p. 28-42, IST Press, 2008.
- MAYER, L.; BOUFADEL, M.; BRENNER, J.; CARNEY, R.; COOPER, C.; DEMING, J.; DIE, D.; EAGLE, J.; GERACI, J.; KNUTH, B.; LEE, K.; MORRIS, J.; POLASKY, S.; RABALAIS, N.; REDDY, C.; STAHL, R.; YOSKOWITZ, D. **An Ecosystem Services Approach to Assessing the Impacts of the Deepwater Horizon Oil Spill in the Gulf of Mexico**. Ocean Studies Board, Division on Earth and Life Studies. Washington, DC: The National Academies Press, p.266, 2013.
- MEA. **Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment**. Washington, DC: Island Press, 266p., 2003. Disponível em: http://pdf.wri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf. Acesso em: 24 out. 2020.
- MERÇON, L. Pesca está proibida na Bacia do Rio Doce em Minas Gerais, diz governo. **G1 Minas Gerais**, Belo Horizonte, 01 nov. 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/11/pesca-esta-proibida-na-bacia-do-rio-doce-em-minas-gerais-diz-governo.html>. Acesso em: 04 dez. 2020.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção**. MACHADO, A. B. M.; DRUMMOND, G. M.; PAGLIA, A. P. (Eds.). 1. ed. Brasília, DF: MMA (Biodiversidade 19), 2 volumes, 2008.
- _____. **O corredor central da mata atlântica: uma nova escala de conservação da biodiversidade**. Ministério do Meio Ambiente, Conservação Internacional e Fundação SOS Mata Atlântica. Brasília: 2006. 46 p. Disponível em https://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_corredores/_publicacao/
- _____. **Serviços Ecosistêmicos**. Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/biodiversidade/economia dos ecossistemas e da biodiversidade/serviços ecossistêmicos.html](http://www.mma.gov.br/biodiversidade/economia%20dos%20ecossistemas%20e%20da%20biodiversidade/servi%C3%A7os%20ecossist%C3%AAmicos.html). Acesso em: 27 ago. 2020.
- MORAIS, A. C. T. Concentração de metais pesados em peixes teleósteos do Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. 2009. Dissertação (Mestrado) – **Programa de Pós-graduação em Biologia Animal**, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- MOUNEYRAC, C.; AMIARD-TRIQUET, C. Biomarkers of ecological relevance. In: Férard, J.; Claise, C. (Eds.) **Encyclopedia of Aquatic Toxicology**. Springer, Berlin, 210-219 pp., 2013.
- MULLER, F.; BURKHARD, B. The indicator side of ecosystem services (short communication). **Ecosystem Services**, v.1, p.26-30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.001>, 2012.
- MUNIZ, D.H.F.; OLIVEIRA-FILHO, E.C. **Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente**. Universitas: Ciências da Saúde, v. 4, n. 1 / 2, p. 83-100, 2006.
- NALINI JÚNIOR, Hermínio Arias; MACHADO, Rômulo; BILAL, Essaid. Geoquímica e petrogênese da Suíte Galiléia: exemplo de magmatismo tipo-I metaluminoso pré-colisional Neoproterozóico da região do médio rio Doce

- (MG). **Revista Brasileira de Geociências**. 2005.
- NIKINMAA, M. **An Introduction to Aquatic Toxicology**, 1st. Edition, Academic Press, 252p., 2014.
- OECD. **Environmental Indicators: OECD Core Set**. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development. 1994.
- OLIVEIRA, J. C. S. **Geoparques no Brasil: foco geográfico na solução dos desafios**. Instituto de Ciências Humanas do Departamento de Geografia da Universidade de Brasília. 124 p, 2014. Disponível em http://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/geoparques/monografia_geoparques.pdf.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS) - **Programa Internacional de Segurança Química: Substâncias químicas perigosas à saúde e ao ambiente**/Tradução: Janaína Conrado Lyra da Fonseca, Mary Rosa Rodrigues de Marchi, Jassyara Conrado Lyra da Fonseca. São Paulo: Cultura Acadêmica, 120 p., 2008.
- PACHANA, K., WATTANAKORNIRI, A., NANUAM, J. Heavy Metal Transport and Fate in the Environmental Compartments. **Naresuan Science Journal**, 7(1): 1-11, 2010.
- PADOVAN, M. P.; LEDERMAN, M. R. **Análise da situação do manejo das unidades de conservação do Espírito Santo, Brasil**. In: IV Congresso Brasileiro De Unidades De Conservação. Anais. Curitiba: Fundação O Boticário. p. 316-325, 2004.
- PALMIERI, H. E. L. Distribuição, especiação e transferência de Hg e As para a biota em áreas do sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. 2006. Tese (Doutorado) – **Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas**, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. 193p.
- PAULA, T.A.R., G.R. ARAUJO, T. DECO-SOUZA, A.C. CSERMAK JR., L.C.F. BERGO, J.E. MANTOVANI, L.C. SILVA, R.C.F. MAGALDI, A.S. TRECE, J.P. CALIMAN. **Aspectos do uso territorial por onça parda (*Puma concolor*), através de monitoramento via satélite, na região do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro, MG**. Universidade Federal de Viçosa, 2015.
- PARREIRAS, M. Rio Doce, que começa a correr quase morto, tem a bacia mais degradada de Minas. 8 abr. 2014a. Disponível em: <<http://www.em.com.br/app/noticia/especiais/nascentes/2014/04/08/noticiasinternas-nascentes,516596/rio-doce-que-comeca-a-correr-quase-morto-tem-a-baciamais-degradada.shtml>>. Acesso em: 4 maio 2017.
- PARREIRAS, M. **Retrato do descaso, Rio Piracicaba está sufocado por minério, esgoto e assoreamento**. 8 abr. 2014b. Disponível em: <<http://www.em.com.br/app/noticia/especiais/nascentes/2014/04/08/noticiasinternas-nascentes,516595/retrato-do-descaso-rio-piracicaba-esta-sufocado-por-minerio-esgoto-e.shtml>>. Acesso em: 4 maio 2017.
- PEREIRA, S. R. N. O uso de óleos apolares na flotação catiônica reversa de um minério de ferro. Dissertação de Mestrado. **Universidade Federal de Minas Gerais**. 2004.
- PIMENTEL, T. Criados após desastre de Mariana, projetos de recuperação estão suspensos por falta de verba. **G1 Minas Gerais**, Belo Horizonte, 04 nov. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2018/11/04/criados-apos-desastre-de-mariana-projetos-de-recuperacao-estao-suspensos-por-falta-de-verba.ghtml>. Acesso em 04 dez. 2020.
- PINTILIE, S.; BRÂNZĂ, L.; BEȚIANU, C.; PAVEL, L. V.; UNGUREANU, F.; GAVRILESCU, M. Modelling and simulation of heavy metals transport in water and sediments. **Environmental Engineering and Management Journal**, 6 (2): 153-161, 2007.
- POREMBSKI, S., W. BARTHOLOTT, S. DÖRRSTOCK & N. BIEDINGER. **Vegetation of rock outcrops in Guinea: granite inselbergs, sandstone table mountains, and ferricretes - remarks on species numbers and endemism**. *Flora* 189: 315-326. 1994.
- PUPPIM, L. G. Avaliação de metais pesados e biomarcadores fecais no sedimento da foz do rio Doce, Linhares – ES. 2005. Monografia - **Curso de graduação em Oceanografia da UFES**, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2014. 48p.
- QUEIROZ, M. T. A. Bioacumulação de metais pesados no rio Piracicaba, Minas Gerais, aplicando a análise por ativação neurotrônica instrumental. 2006. Dissertação (Mestrado) – **Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais**, UNILESTE, MG, Coronel Fabriciano, 2006.

- QUEIROZ, M. T. A.; SABARÁ, M. G.; QUEIROZ, C. A.; LEÃO, M. M. D.; AMORIM, C. C.; LIMA, L. R. P. Estudo sobre os teores de tório, urânio e potássio nas águas superficiais e sedimento marginal do rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 371-380, 2017.
- QUIGLEY, H. & HORNOCKER, M. **Cougar population dynamics**. p. 59-75. In: Hornocker, M.G. & Sharon, N. (eds.). **Cougar: ecology and conservation**. The University of Chicago Press. 306p. 2010.
- RABELO, P.J.B. Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG. **Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais**. 1994.
- RAMOS, W. E. S. Contaminação por mercúrio e arsênio em Ribeirões do Quadrilátero Ferrífero – MG, em área de mineração e atividades garimpeiras. 2005. Tese (Doutorado) – **Programa de Pós-graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, 2005.
- RAMSAR. The Convention on Wetlands. Disponível em: <https://www.ramsar.org/>. Acesso em: 28 dez. 2020.
- RENOVA. Fundação Renova. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/>. Acesso em: 28 dez. 2020.
- RHODES, V. P. Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos da área afetada por garimpo ouro – rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG. 2010. Dissertação (Mestrado) – **Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais**, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Prato, 2010.
- ROCHA, L. C.; FERREIRA, A. C.; FIGUEIREDO, M. A. **A Rede Global de Geoparques e os desafios da integração dos Geoparques Brasileiros**. Caderno de Geografia, v.27, Número Especial 2, 2017. Disponível em <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27nesp2p271>. Acesso em 26/11/2019.
- RODRIGUES, A. S. L.; MALAFAIA, G.; COSTA, A. T.; NALINI JÚNIOR, H. A. Iron ore mining promotes iron enrichment in sediments of the Gualaxo do Norte River basin, Minas Gerais State, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, p. 4177–4186, 2014.
- ROSIÈRE, C.A. & F. CHEMALE. **Brazilian iron formations and their geological setting**. Revista Brasileira de Geociências 30: 274-278. 2000.
- SAINT-HILAIRE, Auguste. **Segunda Viagem ao interior do Brasil. Espírito Santo**. Trad. Carlos Madeira. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1936, Coleção Brasileira, v. 72.
- SALES, S. C. M. Avaliação ecotoxicológica de impactos da contaminação por metais e arsênio em áreas de mineração e beneficiamento de ouro em Minas Gerais. 2013. Tese (Doutorado) - **Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 158p.
- SARMIENTO, A. M.; DELVALLS, A.; NIETO, J. M.; SALAMANCA, M. J.; CARABALLO, M. A. Toxicity and potential risk assessment of a river polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 4763–4771, 2011.
- SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DE ARACRUZ (SEMAM). Disponível em: <http://www.pma.es.gov.br/meio-ambiente/27>. Acesso em: 28 dez. 2020.
- SEMA. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Rio Grande do Sul**: Mapeamentos do Potencial Ambiental. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento sustentável do Rio Grande do Sul, Programa Proredes – BIRD-RS, 2018.
- SILVA, I. F. L. Contribuições para o diagnóstico ambiental da parte média e inferior da bacia do Rio Piracicaba, MG. 2010. Dissertação (Mestrado) - **Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2010. 127p.
- SILVEIRA, V.M.M. Proposta de estrutura analítica de base sistêmica para suporte ao planejamento e gestão ambiental. Dissertação de Mestrado – **Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- SKEAFF, J. M., DURBEUIL, A. A., BRIGHAM, S. I. The concept of persistence as applied to metals for aquatic hazard identification. **Environmental Toxicology and Chemistry** 21, 2581–2590, 2002.
- SISINNO, C.L.S., OLIVEIRA-FILHO, E.C. Principios de Toxicologia Ambiental. **Interciência**, Rio de Janeiro – RJ, 216p, 2013.
- SOUZA, V. L. B.; LIMA, V.; HAZIN, C.A.; FONSECA, C. K. L.; SANTOS, S. O. Biodisponibilidade de metais-traço em

- sedimentos: uma revisão. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 1A, p. 1-13, 2015.
- SOUZA, W. R. Análise de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – HPAs – Em sedimentos do Ribeirão do Funil na região de Ouro Preto – MG. Dissertação (Mestrado) - **Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2007. 95p.
- SZIKSZAY, M. **Geoquímica das águas**. 2012. Disponível em: file:///C:/Users/I01283/Downloads/45351-Texto%20do%20artigo-54095-1-10-20121002.pdf; acessado em 30.jan.2020.
- TEEB. Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. In: KUMAR, P. (ed). **The Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations**. Londres e Washington: Earthscan, 2010. Disponível em: <http://teebweb.org/publications/teeb-for/research-and-academia/>. Acesso em: 22 set. 2020.
- TRUHAUT, R. Ecotoxicology: objectives, principles and perspectives. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 1, p. 151-173, 1977.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre, 1998. Editora da UFRGS/ABRH. 669 p.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES). **Boletim estatístico da pesca do Espírito Santo - Ano 2011: Programa de estatística pesqueira do Espírito Santo/Universidade Federal do Espírito Santo**; coordenadores: Mauricio Hostim Silva, Guilherme Scheidt de Souza Soares. N. 2, Vitória, ES: UFES, 2013.
- USGS. **Landsat-7**. 2020. Disponível em: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em: 01/12/2020.
- VALENCIO, N. Da área de risco ao abrigo temporário: uma análise dos conflitos subjacentes a uma territorialidade precária. In: VALENCIO, N. et al. (orgs.). **Sociologia dos desastres: construção, interfaces e perspectivas no Brasil**. São Carlos: RiMa Editora, 2009.
- VAN DER OOST, R.; BEYER, J.; VERMEULEN, N. P. E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 13, p. 57-149, 2003.
- VAREJÃO, E. V. V. Distribuição de mobilidade de arsênio e metais pesados em ribeirões do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 2008. Dissertação (Mestrado) – **Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, 2008.
- VIOLA, Z. G. G. Avaliação da qualidade das águas da bacia do rio Doce/MG: Caracterização da matéria orgânica e seus impactos ambientais. 2008. Tese (Doutorado) – **Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre do Instituto de Ciências Biológicas**, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- VON BODUNGEN, B.; TURNER, R. K. **Science and integrated coastal management**. Dahlem University Press, Berlin ISBN, v. 393, p. 4504-02, 2001.
- WATSON, E., A. LINDHE, H. NEWING AND O. SCHOLTZ. **High Conservation Value (HCV) Screening: Guidance for identifying and prioritising action for HCVs as part of jurisdictional and landscape approaches**. HCV Network Ltd. 2019.
- WOOD, C.M. **An Introduction to Metals in Fish Physiology and Toxicology: Basic Principles**. In: Wood, C.M; Farrell, A.P; Brauner, C.J (Eds.), **Homeostasis and Toxicology of Essential Metals**, Elsevier, 524p., 2012.
- ZAGATTO, P.A.; BERTOLETTI, E. **Ecotoxicologia aquática: Princípios e Aplicações**. 2.ed. São Carlos, Brasil: RiMa, 486p., 2014.

GLOSSÁRIO

Abióticos: Elementos e componentes não bióticos de um sistema (p.ex. rochas, atmosfera).

Abundância: Número de indivíduos da população de uma espécie em determinado habitat.

Adequabilidade Climática: Conjunto de condições climáticas que permite a ocupação de um ambiente pela biota.

Altitude Ortométrica (H): é a distância vertical de um ponto, situado sobre a superfície terrestre, em relação a um geoide de referência.

Altitude Elipsoidal (h): é a distância vertical de um ponto a um elipsoide de referência. As altitudes indicadas pelos receptores dos Sistemas de Posicionamento Global (GPS), por exemplo, são do tipo elipsoidal.

Ambiente Bentônico: domínio referente ao substrato de sistemas aquáticos.

Ambiente Pelágico: domínio referente às massas d'água.

Ambiente Recifal: Ambiente associado a recifes de coral.

Ambiente-Matriz: Ambiente ou hábitat dominante de uma paisagem.

Ambientes Fluviais: relacionam-se os rios, que são cursos naturais de água doce, na maioria das vezes com canais definidos e fluxos permanente ou sazonal, que migram em direção a um oceano, lago ou outro rio. Rios são caracterizados por correntes unidirecionais, com velocidades médias de fluxo variando entre 0,1 a 1,0 m/s. Geralmente, ocorre a mistura completa e contínua em rios, devido a correntes e à turbulência.

Ambientes Transicionais: ambiente de transição entre o ambiente continental e o ambiente marinho raso.

Análise de Componentes Principais (PCA): é indicada para conjuntos correlacionadas linearmente, o que permite reduzi-las a poucas variáveis sintéticas, denominadas componentes principais. Os eixos ou autovalores são extraídos de modo que o primeiro explique a maior parte da variância, o segundo explique a maior parte da variância residual, e assim, sucessivamente.

Análise de Coordenadas Principais (PCoA): é uma generalização da análise de componentes principais (PCA), na qual os eixos ou autovalores são extraídos de uma matriz de similaridade ou de distâncias. A principal vantagem é que esta técnica pode ser aplicada quando as relações entre as variáveis não são lineares.

Análise de Permutação Multivariada (PERMANOVA): A análise de variância multivariada por método de permutação (análise estatística não paramétrica) é utilizada para comparar vetores, baseada em qualquer medida de distância ou dissimilaridade.

Análise de Variância (ANOVA): trata-se de um método estatístico paramétrico, que permite realizar comparações simultâneas entre duas ou mais médias, ou seja, permite testar hipóteses sobre **médias** de distintas populações ou comunidades.

Análise de Variância Fatorial (ANOVA factorial): quando a comparação entre as médias (teste de variância) foi verificada pela influência de mais de um fator e pela interação entre eles

Análise de Variância Unifatorial (ANOVA one -way): quando a comparação entre as médias (teste de variância) foi verificada pela influência de um fator

Aninhamento: Padrão ecológico de distribuição de espécies em metacomunidades, representando o subconjunto de espécies de um local como parte do conjunto maior de espécies da região.

Anóxia: Indica a completa ausência de oxigênio em um ambiente.

Antrópico(a): que se originou da ação do homem.

Anuros: Ordem de animais da classe Amphibia; inclui sapos, rãs e pererecas (Anura).

Apendicular: Que reúne os ossos dos membros superiores, inferiores e elementos de apoio.

Arborícolas: Animais cujos hábitos de vida ocorrem principalmente nas árvores.

Arbovíroses: Doenças causadas por arbovírus, que incluem o vírus da dengue, zika vírus, febre chikungunya e febre amarela.

Área de Abrangência do Dano: abrangência geoespacial das repercussões ou efeitos do desastre que são causas de modificações nos vários componentes físicos, bióticos e antrópicos que caracterizam seu ambiente de referência.

Área de Estudo: delimitação de local ou região, objeto do levantamento de dados e análise ambiental, podendo variar a cada tema de estudo.

Área de Passagem e Deposição da Lama: área de passagem e/ou deposição do rejeito oriundo do rompimento da barragem de Fundão, desde o local do rompimento, no município de Mariana (MG), até a foz do rio Doce, em Regência (ES), além da região estuarina e marinha adjacente.

Arrasto de Plâncton: metodologia de amostragem, onde as redes de plâncton são arrastadas em trajetos diversos, como vertical, horizontal e oblíquo. A velocidade de arrasto pode ser variável.

Assembleias: Conjunto de diferentes espécies de um mesmo grupo de organismos, p.ex., assembleia de aves (grupamento das diferentes espécies de aves de uma região).

Assimetria Flutuante: Desvios aleatórios da simetria perfeita em estruturas bilateralmente pareadas.

Assintótica: Método de descrever o comportamento de limites matemáticos.

Assoreamento: Acúmulo de sedimentos.

Atingidos: refere-se às pessoas que sofreram algum dano advindo do desastre.

Autodepuração e Diluição: fenômenos através dos quais os cursos d'água se recuperam, por mecanismos naturais, após o lançamento de uma carga poluidora.

Avifauna: Conjunto das aves de uma região ou ambiente.

Bacia Hidrográfica: área principal de drenagem de um rio e seus afluentes.

Baixo Estuário: área de transição entre rio e mar que sofre grandes oscilações nos gradientes físico-químicos e influência direta da maré.

Banhado: Área de baixada em fundo de vales de regiões de morro onde há acúmulo de água de chuvas ou das cheias dos ribeirões e rios.

BEIDOU: é o sistema de navegação por satélite da China.

Bentônico: organismo associado ao fundo oceânico.

Bentos: (Do grego benthos: fundo do mar) são todas as espécies que vivem com íntima relação com o fundo, seja para fixar-se, escavar, caminhar ou nadar sob o fundo sem alojar-se nele;

Bilateralidade: Propriedade que descreve a divisão em duas partes de forma simétrica.

Bioacumulação: processo pelo qual contaminantes são absorvidos, através da exposição direta ou indireta, e armazenados (ao longo do tempo) por um organismo, em níveis superiores aos encontrados numa matriz ambiental externa. É o acúmulo de substâncias tóxicas nos tecidos dos organismos.

Biodisponibilidade: é a fração de um nutriente ou elemento potencialmente tóxico (como As, Pb, Cd, etc.) que está prontamente disponível para ser absorvido por um organismo alvo. No âmbito desse trabalho, refere-se especificamente à fração de maior labilidade desses elementos tóxicos para as plantas.

Biodiversidade: Conjunto de espécies, organismos e patrimônio genético, assim como ecossistemas, existentes em determinada região, incluindo suas interações e propriedades emergentes desses conjuntos.

Bioindicador: espécies, grupo de espécies ou comunidades biológicas cuja presença, abundância e condições são indicativos biológicos de uma determinada situação ambiental.

Biomagnificação: é o aumento da concentração (e consequentemente da toxicidade) de uma determinada substância na parte mais alta da cadeia trófica;

Biomarcadores: alterações mensuráveis, em diferentes níveis da organização biológica, que evidenciam a exposição, susceptibilidade e /ou efeitos tóxicos de poluentes (agentes estressores) presentes no ambiente.

Biomonitoramento: Utilização de seres vivos como ferramenta para mensurar a qualidade ambiental.

Biota: Conjunto de seres vivos, que habitam um determinado ambiente.

Bióticos: Elementos e componentes constituídos pelos seres vivos e suas interações.

Bioturbação - Bioturbadores: Retrabalho de solos e sedimentos por organismos vivos.

Box plot: É um tipo de gráfico que representa a mediana e os quartis de um conjunto de dados, onde é possível ter uma noção dos dados discrepantes, da posição, da dispersão e assimetria da distribuição.

Cabruca: Sistema agroflorestal de produção no qual ocorre o plantio no sub-bosque, principalmente de cacau, ao tempo em que se mantém a estrutura arbórea nativa da região.

Cadeia Alimentar ou Cadeia Trófica: relação trófica que ocorre entre os seres vivos que compõem um ecossistema, na qual a energia de um organismo se transfere ao outro, por uma relação de alimentação.

Cágados: grupo de quelônios de água doce dotados de recolher o pescoço e a cabeça lateralmente sob a carapaça.

Calcófilos: Elementos afins ao enxofre.

Caméfitos: São plantas sublenhosas e/ou herbáceas predominantemente de áreas campestres pantanosas com até um metro de altura, providas de gemas situadas acima do solo e protegidas por catáfilos ou por folhas verticiladas.

Cervical: Região da coluna vertebral de maior mobilidade, alocado na região do pescoço.

Cetáceos: Infraordem de animais marinhos, pertencentes à classe dos mamíferos (Cetacea).

Ciclagem: corresponde ao ciclo de renovação da matéria orgânica na natureza, realizada principalmente pelos decompositores, como fungos.

Cladóceros ou Cladocera: grupo de crustáceos aquáticos e microscópicos

Clorofila-a: Pigmento fotossintético presente em plantas e fitoplâncton, parte do processo de respiração celular destes organismos.

Complexo Lacustre do Médio Rio Doce: densa rede de lagoas, originadas pelo barramento natural dos tributários do rio Doce, distribuídas ao longo de toda a região do médio rio Doce, à montante e a jusante da confluência com o rio Piracicaba.

Comportamento Nerítico: organismo que habita a região que se estende da linha de maré até a quebra da plataforma continental.

Composição de Espécies: inclui o número de espécies que estão presente em uma comunidade, bem como a abundância das espécies (estrutura da comunidade).

Comunidades Biológicas: Comunidades vegetais ou animais que habitam uma região.

Conectividade Funcional: Interação entre características comportamentais e físicas dos organismos com estruturas da paisagem que definem o deslocamento da fauna nessa paisagem.

Contaminante: elementos ou substâncias, de origem natural ou antropogênica, cuja presença não evidencia a ocorrência de danos óbvios ou aparentes.

Copépodes ou Copepoda: grupo de crustáceos aquáticos e microscópios.

Copepodito: estágios jovens de copépodes.

Corpos d'água: Acumulação significativa de água.

Covo: tipo de armadilha aquática composta por uma armação cilíndrica envolta por rede e com duas entradas em forma de funil em suas extremidades. Também conhecido por Jequi.

Criptófitos: Plantas herbáceas com gemas protegidas abaixo do nível do solo.

Culicídeos: Família de insetos (Culicidae).

Curva de Acumulação de Espécies: Número cumulativo de espécies detectados em determinado ambiente em função do esforço cumulativo em amostras.

Curvas de Rarefação: Técnica estatística para avaliar a tendência de incremento de espécies em função do esforço amostral.

Dados Logaritmizados: quando algum dos requisitos para o emprego da estatística paramétrica (por ex., normalidade da distribuição dos erros, homogeneidade das variâncias) não puder ser preenchido pelos dados da amostra, é possível transformar os dados (por ex. transformação logarítmica, raiz quadrada, percentual), antes de optar pela aplicação da estatística não-paramétrica.

Dados Secundários: Informações advindas de bases de dados já disponíveis, como da literatura ou de acervos técnicos.

Dano Ambiental: alteração da condição do ambiente e/ou de seus componentes, causada pelo desastre, em relação à linha-base.

Datum Horizontal: referência para coordenadas planimétricas (x e y).

Datum Vertical: referência altitude ortométrica (0 metros), Imbituba – SC.

Datum: é um sistema de referência utilizado para o cômputo ou correlação dos resultados de um levantamento.

Demersal: peixes que passam a maior parte do tempo em contato com o fundo do mar.

Desastre: resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável.

Didelfídeos: Família à qual pertencem os gambás (Didelphidae).

Dilution of Precision (PDOP): degradação da precisão da posição tridimensional.

Dissimilaridade: Descreve a diferença, ou distinção, entre duas ou mais coisas. No âmbito da ecologia de comunidades, índices de dissimilaridade buscam computar a magnitude da diferença de composição entre assembleias sendo comparadas.

Distribuição Espacial: Distribuição de algo em relação ao ambiente geográfico em que se encontra.

Diversidade Alfa: Número total de espécies em um habitat.

Diversidade Beta: Descreve a complementação de espécies ao longo de um gradiente ambiental ou entre diferentes ambientes de uma região.

Diversidade Biológica: Conjunto de diferentes seres vivos em um ambiente.

Diversidade de Espécies: é o número de diferentes espécies que estão representadas numa dada comunidade. A diversidade de espécies consiste em dois componentes: riqueza específica e equitabilidade.

Diversidade Funcional: Forma de descrever uma assembleia de espécies em função de seus atributos morfológicos e comportamentais.

Dominância de Espécies: refere-se a dominância de uma ou mais espécies em uma determinada comunidade, habitat ou região.

Dossel: É a parte formada pelas copas das árvores que formam o estrato superior da floresta.

Doubletons: Espécies representadas, em uma amostra, por exatamente dois indivíduos.

Dulcícola: organismo ou ambiente associado a águas doces (continentais).

Ecossistema: sistemas naturais ou artificiais, limitados por um espaço físico onde interagem os componentes vivos e não vivos, caracterizando determinadas estruturas e funções.

Ecotoxicologia: é o estudo dos efeitos tóxicos, quali e quantitativos, de modo integrado, de agentes químicos, físicos e biológicos sobre organismos vivos (aquáticos ou terrestres), incluindo suas interações com o ambiente.

Ectoparasitos: Parasitas que se instalam fora do corpo do hospedeiro.

Ectotérmico: Animais cuja temperatura corporal varia de acordo com as condições ambientais de temperatura.

Edáfico: Relativo ao solo.

Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs): normalmente são metais sólidos (e.g., Pb e Cd) ou líquidos (e.g., Hg) à temperatura ambiente, mas podem ser também semi-metais (e.g., As e Sb). A principal característica comum dos EPTs é sua alta toxicidade aos animais e lenta degradabilidade ambiental, com crescente acúmulo na cadeia trófica. Alguns EPTs, em baixas concentrações, são essenciais aos organismos vivos, como Fe, Mn, Cu, Ni e Zn. Já a grande maioria dos EPTs, mesmo em baixas concentrações, causa efeitos deletérios à saúde animal. Ag- prata; Al - alumínio; As - arsênio; Ba - bário; Cd - cádmio; Cr - cromo; Cu - cobre; Hg - mercúrio; Fe - ferro; Mn - manganês; Mo - molibdênio; Ni - níquel; Pb - chumbo; Sb - antimônio; V - vanádio; Zn - zinco.

Elipsóide de Revolução: Sólido geométrico gerado pela rotação da elipse em torno do seu semieixo menor. É a superfície matemática adotada pelos geodestas para todos os cálculos geodésicos.

Endemismo: Propriedade que define a área geográfica na qual determinada espécie naturalmente ocorre, p.ex., endemismos da Mata Atlântica.

Entomofauna: Conjunto de insetos de uma região ou ambiente.

EOMAP: Empresa alemã provedora de informação derivada de sensoriamento remoto aquático.

Epipelágicos: peixes que habitam águas que vão até cerca de 200 metros de profundidade.

Euplânctônico: plâncton que habita os primeiros 200 metros da coluna de água.

Equitabilidade ou Uniformidade ou Equitatividade: distribuição da abundância das espécies em uma comunidade. Com efeito, reflete o grau de dominância da espécie.

Espécie endêmica: espécie que ocorre somente em uma determinada região geográfica, em lugares específicos.

Espécie Exótica: Espécie originária de meio diverso daquele em que vive. É essência natural de outros países ou regiões do país. Espécies que se encontram fora de sua distribuição natural.

Espécie Exótica Invasora: Espécie exótica cuja introdução ou dispersão ameaça ecossistema, habitat ou espécies e cause impactos negativos ambientais, econômicos, sociais ou culturais

Espécie Nativa: Espécie que naturalmente ocorre em determinada região.

Estado Trófico: estado nutricional do ambiente, que reflete a quantidade de matéria orgânica disponível no ambiente aquático.

Estolões: Tipo de caule que cresce paralelamente ao chão, produzindo gemas de espaço em espaço. Essas gemas podem formar raízes e folhas e originar novas plantas.

Etologia: Estudo científico do comportamento social e individual dos animais no seu ambiente natural.

European Space Agency (ESA): Agência espacial europeia.

Eutanásia: Ato intencional de proporcionar a morte indolor a um indivíduo.

Eutrofização: acúmulo de matéria orgânica em corpos d'água, podendo ser de origem natural ou antrópica, que acarreta no aumento da biomassa fitoplanctônica. Este grande aumento da biomassa de organismos fotossintetizantes causa a diminuição do oxigênio disponível e, consequentemente, o aumento da biomassa de bactérias anaeróbicas.

Exotróficos: Organismos que obtêm energia a partir de outros organismos.

Exsicata: É uma amostra de planta prensada e em seguida seca numa estufa (herborizada), fixada em uma cartolina de tamanho padrão acompanhadas de uma etiqueta ou rótulo contendo informações sobre o vegetal e o local de coleta, para fins de estudo botânico.

Extinção: Desaparecimento definitivo de um ser vivo.

Fatores Abióticos: característico de algo que não possui vida, como os componentes físicos e químicos.

Fatores Bióticos: o que é característica dos seres vivos ou está vinculado a estes.

Fauna: Termo coletivo para a vida animal de determinada região.

Fertilidade do Solo: envolve as propriedades químicas, físico-químicas e biológicas do solo que influenciam a dinâmica e a disponibilidade de nutrientes, elementos benéficos, tóxicos e outros às plantas.

Filogenética: Relação evolutiva entre grupos de organismos.

Filostomídeos: Família de morcegos encontrada em regiões tropicais e subtropicais (Phyllostomidae).

Flora: Vida vegetal.

Fluvial: Referente aos rios ou cursos d'água.

Fluxômetro: é um aparelho utilizado para quantificar o volume de água que passa através de uma rede de plâncton. Um rotor de três lâminas é acoplado diretamente a um contador de cinco dígitos o qual registra as revoluções do rotor.

Formação Ferrífera Bandada – BIF: Rocha sedimentar ou metassedimentar química ou vulcanoquímica finamente estratificada, apresentando camadas de óxidos, carbonatos ou silicatos de ferro rítmicamente alternadas com camadas diferenciadas destas (quartzosas, anfibólicas, quartzo cloríticas). Podem desenvolver depósitos de ferro economicamente exploráveis como ocorre no Brasil com as jazidas de itabiritos de Minas Gerais, por exemplo. A deposição destas camadas teve um apogeu do Neo-arqueano ao Paleo-proterozóico, provavelmente devido ao enriquecimento em O₂ da atmosfera neste período o que levou a oxidação de ferro em solução (Fe⁺²->Fe⁺³) e precipitação de colóides de hidróxidos ferruginosos em camadas alternadas com sílica coloidal no fundo dos mares daquelas épocas.

Forrageamento: Atividade comportamental que descreve a exploração e obtenção de recursos alimentares.

Fossoriais: Modo de vida que contempla o uso de ambientes do subsolo ou serapilheira, por meio de escavações e uso de galeria subterrâneas.

Frugívoros: Animais cuja dieta alimentar é composta principalmente de frutos.

GALILEO: é o sistema de navegação por satélite da União Europeia.

Generalistas: Espécies que apresentam ampla plasticidade na busca de hábitos alimentares e ocupação de habitat. Contempla espécies que conseguem se adaptar a diversas condições ambientais.

Geoprocessamento: Processamento de dados geográficos.

Glândula Uropigial: Glândulas das aves que sintetizam gordura, a qual é usada com o bico com a finalidade de impermeabilizar as penas.

Global Navigation System (GLONASS): é um sistema de navegação por satélite (GNSS) russo.

Global Positioning System (GPS): é um mecanismo de posicionamento por satélite que fornece a um aparelho receptor móvel a sua posição, assim como o horário, sob quaisquer condições atmosféricas, a qualquer momento e em qualquer lugar na Terra; desde que o receptor se encontre no campo de visão de três satélites GPS (quatro ou mais para precisão maior).

Granívoros: Animais cuja dieta alimentar é composta principalmente de sementes.

Greenstone Belt: Cinturão de rochas verdes representadas por xistos máficos e ultramáficos, intercalados com BIF, chert e rochas vulcanoquímicas diversas, de baixo grau metamórfico, entre

estruturas dômicas de granitóides muito comuns em áreas arqueanas, representando em grande parte restos de crosta oceânica constituída por magmatismo, muitas vezes komatiítico.

Guildas alimentares: Conjunto de espécies que compartilham um mesmo hábito alimentar, p.ex., guilda de aves frugívoras.

Habitat: Área ecológica ou ambiental que é habitada por determinados organismos.

Heatmap: mapas de calor, que empregam cores frias e quentes para representar, graficamente, comportamentos generalizados.

Heliotérmicos: Organismos que utilizam o calor proveniente dos raios solares para manter sua temperatura corporal.

Hemicriptófitos: Plantas herbáceas com gemas protegidas no nível do solo pelos céspedes que morrem na estação climática desfavorável, com predominância em áreas campestres.

Herbáceas: São plantas com caule não lenhoso ou semi-lenhoso.

Herpetofauna: Conjunto de anfíbios e répteis de uma região.

Hidromorfia: Referente aos solos inundados, encharcados e definidos pelo excesso de umidade.

Holoplâncton: organismos que permanecem todo o seu ciclo de vida no plâncton.

Ictiofauna: Conjunto de peixes de uma região.

Indicador hidrológico: espécie que reflete as condições hidrológicas do ambiente em que se encontra.

Indicadores Ambientais: parâmetros representativos de processos ambientais ou do estado do meio ambiente que, se monitorados e avaliados continuamente em um mesmo local, apresentam a tendência de evolução do ambiente ou parâmetro analisado (SÁNCHEZ, 2008).

Índice de Linearidade: Métrica de ecologia de paisagem que descreve o quanto um corredor de deslocamento de fauna se aproxima a uma linha reta.

Insetívoros: Animais que se alimentam de insetos e outros artrópodes.

Itabirito: rocha bandada, alternando níveis milimétricos a centimétricos de hematita (+-magnetita) com níveis silicáticos, geralmente de quartzo. É um BIF ou formação ferrífera bandada metamorfisada.

Jusante: é todo ponto em que o referencial é o fluxo normal do curso d'água, para onde se dirige a corrente, em direção à foz do rio. Parte mais baixa de um rio, próximo a desembocadura na região costeira.

Laguna: Refere-se a uma depressão formada por água salobra ou salgada, localizada na borda litorânea, comunicando-se com o mar através de canal.

Larva Véliger: larva planctônica que eclode com estruturas corporais como pé, concha e véu.

Lênticos: São ambientes aquáticos de água parada, como por exemplo, lagoas, lagos, pântano, etc.

Limícolas: São um grupo diverso de aves que ocupam ambientes aquáticos rasos.

Limite de Quantificação (LQ): a menor quantidade do analito em uma amostra que pode ser determinada com precisão e exatidão aceitáveis sob as condições experimentais estabelecidas.

Límnica: sinônimo de dulcícola.

Linha-base: estado do ambiente e/ou de seus vários componentes físicos, bióticos e antrópicos imediatamente anterior ao desastre, ou o estado em o que o ambiente e/ou seus componentes estariam caso não houvesse ocorrido o desastre.

Lipoperoxidação: a oxidação de lipídios, ou lipoperoxidação, consiste em uma cascata de reações resultantes da ação dos radicais livres (oxigênio molecular) sobre os lipídios (gorduras).

Lóticos: São ambientes aquáticos de água corrente, como por exemplo rios, nascentes, ribeiras e riachos. Têm como principal característica o fluxo hídrico, que influencia diretamente as variáveis físico-químicas da água e as comunidades biológicas presentes.

Macrófitas Aquáticas: Plantas aquáticas que vivem em ambientes inundados, flutuantes ou enraizadas.

Macroinvertebrados Bentônicos: invertebrados que habitam os substratos de fundo de ambientes aquáticos em pelo menos parte de seu ciclo de vida e que ficam retidos em redes com abertura de malha entre 200 e 500 μm .

Mananciais: Fontes de água, que podem ser utilizadas para o abastecimento urbano.

MAPGEO2015: é um sistema que fornece a ondulação geoidal (N) necessária à conversão de altitudes elipsoidais, obtidas com os Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS), em altitudes ortométricas.

Mastofauna: Conjunto de mamíferos de uma região.

Matriz de Distância: matriz (*array* bidimensional) contendo as distâncias, tomadas em pares, de um conjunto de dados.

Máximo ou Mínimo Histórico: para variáveis de qualidade de água, esses termos foram sempre utilizados em referência ao período de linha-base.

Mediana: em termos mais simples, mediana pode ser o valor do meio de um conjunto de dados. A vantagem da mediana em relação à média é que a mediana pode dar uma ideia melhor de um valor típico porque não é tão distorcida por valores extremamente altos ou baixos, como a média.

Mediolitoral: Faixa da zona entremarés coberta e descoberta diariamente pelas marés.

Meio Biótico: Conjunto de flora e fauna e demais organismos.

Meridiano Central: Longitude de origem de cada fuso no sistema de coordenadas da projeção UTM.

Meroplâncton: organismos que permanecem no plâncton apenas na fase inicial do seu ciclo de vida.

Mesopelágicos: peixes que habitam águas que vão até cerca de 1000 metros de profundidade.

Mesopredadores: Predadores de porte médio que se encontram no meio da cadeia trófica, tipicamente predando pequenos animais.

Microcrustáceos: crustáceos microscópicos que vivem no zooplâncton. São representados pelos cladóceros e copépodos e estão distribuídos nas regiões de margem e meio dos ambientes aquáticos.

Microhábitats: Descreve as características microambientais de determinado hábitat, constituída por atributos como sombreamento, temperatura, umidade, estrutura vegetal, entre outros.

Modular Inversion Processing System (MIP): Sistema desenvolvido pela empresa EOMAP para correção atmosférica e cálculo de parâmetros indicadores de qualidade da água.

Montante: é a direção de um ponto mais baixo para um ponto mais alto de um curso d'água, em direção à nascente do rio.

Morfodinâmicos: Conceito associado ao intemperismo atual. São processos mais restritos, tanto no tempo quanto no espaço, sujeitos a oscilações ou ritmos dos principais agentes naturais, como as chuvas, considerando as modificações impostas pelo ser humano no processo de apropriação do relevo.

Morfotipo: características morfológicas que distinguem organismos da mesma espécie.

Nanofanerófitos: Plantas anãs raquíticas, variando entre 0,25 e 5 m de altura, com predominância nas áreas campestres do Brasil.

National Aeronautics And Space Administration (NASA): Agência Espacial dos Estados Unidos.

Nativa: Espécie original daquela região que vive.

Náuplio: estágios larvais de copépodes

Nectônicos: animais aquáticos que se locomovem ativamente na coluna de água.

Neotropical: Região biogeográfica que compreende a América Central, incluindo a parte sul do México e da península da Baja California, o sul da Florida, todas as ilhas do Caribe e a América do Sul.

Nicho: papel ecológico de uma espécie em uma comunidade, ou gama total das condições sobre as quais o indivíduo ou a população vive e se reproduz.

Níveis Tróficos: relacionados à cadeia alimentar, iniciando em produtores, passando por consumidores intermediários, consumidores finais ou topo de cadeia e decompositores, formando um ciclo.

Oligo-Mesotrófico: ambiente de pouco a moderadamente, enriquecido por nutrientes.

Ondulação Geoidal (N): é a diferença entre a altitude elipsoidal e a altitude ortométrica.

Onívoras: Animais que se alimentam de recursos de origem vegetais e/ou animal.

Oportunística: condizente a um acontecimento ocasional, proporcionado por alguma atividade relacionada.

Osteichthyes: grupo dos peixes ósseos.

Paragênese Mineral: Conjunto de minerais em rochas ígneas ou em rochas metamórficas que, por evidências petrográficas e outras, mostram ter evoluído associadamente em equilíbrio geoquímico e termodinâmico.

Parâmetros: É um valor, oriundo de uma variável ou expressão mais complexa.

Patrimônio Cultural: Bens reconhecidos pela importância cultural de uma região.

Pedogenéticos: Transformação do solo, por meio de dois fatores climáticos e por microrganismos.

Perda Ambiental: lesões aos recursos ou serviços ambientais, causadas pelo desastre, que geram prejuízo significativo à sociedade.

Planctóforo: organismo que se alimenta de plâncton.

Planícies Aluviais ou Aluvionares: São formações geológicas que se caracterizam por serem planas ou muito pouco inclinadas. Formam-se pela deposição ao longo do tempo de sedimentos trazidos por um ou mais rios.

Planos de Manejo: Documentos de planejamento das unidades de conservação.

Plasticidade Ambiental: Descreve a capacidade dos organismos a se adaptarem a diferentes estímulos e condições ambientais. Quanto maior a plasticidade ambiental, mais tolerante é aquele organismo às variações em seu ambiente.

Plastrão: porção inferior da carapaça que recobre o corpo dos quelônios.

Plataforma Continental: leito marinho que começa na linha de costa e desce com um declive suave até o talude continental.

Playback: Processo de sonorização que utiliza uma gravação para emissão de vocalizações.

Polinização: Processo de transferência de pólen entre as flores, que pode ser regulado por agentes bióticos (p.ex. morcegos, insetos) ou abióticos (p.ex. vento).

Poluente: elementos ou substâncias, de origem natural ou antropogênica, cuja presença implica em danos evidentes ao ambiente e aos organismos vivos, incluindo riscos à seres humanos.

Pontos de Controle: são pontos fora da área afetada pelo rejeito de Fundão, com condições similares às áreas afetadas, utilizadas para comparação.

Posicionamento Relativo Estático Rápido: O posicionamento relativo estático-rápido é similar ao relativo estático, porém, a diferença básica é a duração da sessão de rastreio, que neste caso, em geral é inferior a 20 minutos.

Posicionamento Relativo Estático: No posicionamento relativo estático, tanto o(s) receptor(es) do(s) vértice(s) de referência quanto o(s) receptor(es) do(s) vértice(s) de interesse devem permanecer estacionados (estáticos) durante o levantamento. Neste método, a sessão de rastreio se estende por muitas horas, a depender da distância entre o receptor base e o rover.

Posicionamento Relativo: No posicionamento relativo, as coordenadas do vértice de interesse são determinadas a partir de um ou mais vértices de coordenadas conhecidas. Neste caso é necessário que dois ou mais receptores GNSS colem dados simultaneamente, onde ao menos um dos receptores ocupe um vértice de referência. No posicionamento relativo podem se usar as observáveis: fase da onda portadora, pseudodistância ou as duas em conjunto. Sendo que a fase da onda portadora proporciona melhor precisão e por isso ela é a única observável aceita na determinação de coordenadas de vértices de apoio e vértices situados em limites artificiais. O posicionamento relativo utilizando a observável pseudodistância só é permitido para a determinação de coordenadas de vértices situados em limites naturais.

Pressuposto de Homocedasticidade: é um pressuposto que verifica se as variâncias em cada grupo de dados são, aproximadamente, iguais. Caso seja atendido, a análise pode ser realizada.

Pressuposto de Normalidade: é um pressuposto que verifica se os dados possuem uma distribuição, aproximadamente, normal. Caso seja atendido, a análise pode ser realizada.

Processos Erosivos: Retirada ou transporte de sedimentos da superfície do solo.

Quelônios: grupo faunístico composto por répteis com o corpo revestido por carapaça óssea (Chelonia) que recobre o corpo.

Quiropterofauna: Conjunto de morcegos de uma região.

Real Time Kinematic (RTK) ou Posicionamento Cinemático em Tempo-Real: é uma técnica de posicionamento e navegação GNSS, baseia-se na transmissão instantânea de dados de correções dos sinais de satélites, do(s) receptor(es) instalado(s) no(s) vértice(s) de referência ao(s) receptor(es) que percorre(m) os vértices de interesse. Desta forma, proporciona o conhecimento em tempo real de coordenadas precisas dos vértices levantados. O posicionamento pelo RTK pode ser feito pelo método convencional ou em rede.

Receptor Base: receptor o qual fica estático (parado) em uma coordenada conhecida.

Receptor Rover: receptor o qual fica se deslocando ao longo do trabalho com o objetivo de obter coordenadas precisas dos pontos ou vértices onde ele será estacionado.

Recurso Alimentar: qualquer componente do ambiente que pode ser utilizado como alimento e potencialmente esgotado por organismo.

Recursos Naturais: Aquilo que é necessário ao homem e se encontra na natureza.

Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC): é um conjunto receptores GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), também chamados de estações de referência, que possuem alta capacidade para rastrear satélites de forma contínua. Tais receptores possuem alta precisão e alto desempenho, sendo que suas observações para a determinação de coordenadas são disponibilizadas em arquivos diários ou em tempo real. Desde 1996, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) junto com o seu departamento de Geodésia estabeleceu a RBMC, promovendo a aplicação em diferentes áreas em todo território brasileiro.

Rede de Plâncton: redes de filtração de água de água com poro reduzido (μm). É o aparato mais comum de obtenção de amostras de plâncton, e são produzidas em várias formas e tamanhos.

Redes Tróficas: Interligação natural de cadeias alimentares.

Região da Plataforma: áreas submersas pelo mar, com declive suave que se estende da linha de costa até 200 metros de profundidade em direção ao talude.

Região do Talude: declive acentuado do fundo do mar após a plataforma continental, partindo dos 200 metros até cerca de 3500 metros de profundidade, em direção a região oceânica.

Região Estuarina: área de transição entre rio e mar que sofre grandes oscilações nos gradientes físico-químicos e influência direta da maré.

Região Fitoecológica: Compreende um espaço definido por uma florística de gêneros típicos e de formas biológicas características que se repetem dentro de um mesmo clima, podendo ocorrer em terrenos de litologia variada, mas com relevo bem marcado.

Região Nerítica: região que se estende da linha de maré até a quebra da plataforma continental.

Região Oceânica: região que se estende após a quebra da plataforma continental.

Rêmiges: Penas de voo das asas das aves.

Réplicas Amostras: são amostras obtidas mais de uma vez de uma mesma comunidade no mesmo espaço e tempo.

Reprodução Partenogenética ou Reprodução por Partenogênese: tipo de reprodução assexuada (sem a presença de sexo) de animais em que o embrião se desenvolve de um óvulo sem ocorrência da fecundação.

Resiliência: capacidade de um sistema em retornar a algum estado de referência após uma perturbação.

Retrizes: Penas de voo da cauda das aves.

Riqueza de Espécies: número de espécies que ocorre em uma amostra de uma comunidade.

Rodolitos: tipo de alga calcária que não se fixa a um substrato.

Rotíferos ou **Rotifera:** Filo de animais aquáticos e microscópicos.

Sazonal: relativo à estação do ano.

Sedimento: todo material não consolidado, constituído por partículas de diferentes tamanhos, formas e composição química, transportadas por água, ar ou gelo, distribuído ao longo dos vales do sistema de drenagem e orientado a partir da interação constante dos processos de intemperismo e erosão (MOREIRA; BOAVENTURA, 2003 apud MARTINS, 2008).

Série Histórica: em relação a dados hidrológicos (quantitativos), contempla toda a série de dados independentemente de terem ocorrido antes ou após o rompimento da barragem de Fundão.

Serviços Ambientais: benefícios que as pessoas obtêm da natureza direta ou indiretamente, através dos ecossistemas, a fim de sustentar a vida no planeta.

Serviços Ecossistêmicos: contribuições dos ecossistemas à economia e bem estar.

Shapefile: Formato de arquivo contendo informações geográficas.

Short Wave Infrared (SWIR): Região do espectro eletromagnético que compreende os comprimentos de onda entre 1000 a 2500nm, normalmente utilizada nos sensores orbitais para medição da reflectância atmosférica.

Siderófilos: Elementos afins ao ferro em ambiente magmático.

Sinclinal: dobra com convexidade para baixo, quando conhecidas suas relações estratigráficas, ou seja, rochas mais novas encontram-se no seu núcleo. Com a atuação progressiva dos processos erosivos, as regiões de sinclinais (onde a mesma camada é mais baixa do que nas anticlinais associadas) tendem a formar relevos positivos, enquanto que às de anticlinais, frequentemente desventradas por erosão, formam as partes baixas do relevo.

Singletons: Espécies encontradas por somente um indivíduo em uma amostra.

Sistema Geodésico de Referência (SGR): é um sistema de coordenadas associado a algumas características terrestres.

Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS): sigla em inglês para *Global Navigation Satellite System* – além da navegação, é utilizado para determinar a posição de um objeto na terra (coordenadas). Para tanto, são necessários no mínimo 04 satélites para se determinar as seguintes variáveis: x, y, z e tempo. A precisão dessa coordenada é definida de acordo com a técnica de posicionamento utilizada durante a coleta de dados. O GNSS é visto como uma evolução natural do já popular sistema de posicionamento americano, o GPS. Atualmente fazem parte do GNSS além do GPS, o sistema russo GLONASS, o europeu GALILEO e o chinês BEIDOU. Com vários sistemas de satélites, melhora-se a geometria das constelações e disponibilidade de sinal, garantindo assim uma maior integridade e confiança aos usuários do sistema.

Sítios Ramsar: Áreas úmidas com prioridade para proteção e uso sustentável.

Solos de Várzeas: são solos hidromórficos que ocupam áreas planas, baixas, de formação sedimentar recente e originados à montante. Logo, são associados a solos e rochas existentes na bacia acima da região de deposição. Os sedimentos trazidos pelos rios (argila, silte, areia, frações orgânicas) são depositados seletivamente nesses solos em função do grau de energia. Verifica-se a oscilação ou estagnação do nível freático em seus horizontes em pelo menos uma estação do ano. É comum a evidência de mosqueados e/ou processos de gleização nesses solos. Dado a baixa cota em relação aos solos de terras altas, os solos de várzeas recebem adição contínua de nutrientes e mesmo de sedimentos.

Squamata: Ordem de répteis que inclui animais com escamas como as serpentes e os lagartos.

Sub-bacias: São áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal.

Sub-bosque: Conjunto de vegetação de baixa estatura que cresce abaixo do dossel florestal.

Sublitoral: Faixa da zona entremarés descoberta apenas nas marés mais baixas de sizígia.

Superfície de Resistência: Em ecologia de paisagens, é o atributo que se refere ao quanto um determinado uso de solo custa a ser transpassado pela fauna durante seus deslocamentos.

Supralitoral: Faixa da zona entremarés coberta apenas nas marés mais altas de sizígia.

Supressão de Vegetação: Retirada da vegetação para uso do solo.

Sustentabilidade: Conjunto de ideias e estratégias ecologicamente corretas. **Taxa:** plural de táxon em latim.

Táxon: Unidade taxonômica definido dentro do sistema lineano de classificação dos organismos. Exemplos incluem espécies (p.ex. *Tapirus terrestris*), gêneros (p.ex. *Leopardus*), famílias (p.ex. Culicidae) e classes (p.ex. Aves).

Taxonomia: ramo da biologia que classifica os organismos através de sua história evolutiva.

Tecnossolo: solos cujas propriedades e pedogênese são dominadas por sua origem técnica. Esses solos contém uma quantidade significativa (20% ou mais (m/m) nos primeiros 100 cm do perfil) de artefatos (materiais que são derivados de tecnologias humanas, incluindo materiais manufaturados e materiais naturais que foram escavados e transportados) ou ainda são solos que contém uma camada contínua cimentada. Os Tecnossolos incluem solos de resíduos (aterros, lodo, cinzas e resíduos de mineração), solos pavimentados por material inconsolidado, solos com geomembranas e solos construídos. De forma geral, se referem a solos urbanos ou solos de mina.

Teia Trófica: conjunto de cadeia alimentares interconectadas em um ecossistema.

Termorregulação: processo que algumas espécies da fauna, principalmente répteis, executam para obtenção de energia calorífica a partir da exposição ao Sol.

Terófitos: Plantas anuais, cujo ciclo vital é completado por sementes que sobrevivem à estação climática desfavorável, ocorrendo exclusivamente nas áreas campestres.

Turbidez: Medição da quantidade de luz que penetra o corpo d'água, indicando a quantidade de material em suspensão.

Turnover: Componente da diversidade beta que descreve a substituição de espécies entre diferentes regiões.

United States Geological Service (USGS): Serviço geológico dos Estados Unidos.

Universal Transversa De Mercator (UTM): utiliza um sistema de coordenadas cartesianas bidimensional para dar localizações na superfície da Terra. É uma representação de posição horizontal, isto é, é utilizada para identificar os locais na Terra independentemente da posição vertical, mas difere do método tradicional de latitude e longitude, em vários aspectos.

Valor de Referência de Qualidade: é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-

químicas de amostras de diversos tipos de solos. Os valores de referência de qualidade (VRQs) são definidos por órgãos ambientais estaduais ou federais, conforme a Resolução Conama nº 420/2009.

Variabilidade Genética: Alelos de um gene que variaram entre si na população.

Variáveis Bioclimáticas: Dados das condições climáticas de uma região que exercem influência no desenvolvimento dos seres vivos que ali habitam.

Vértice Geodésico: é um ponto fixado no solo, normalmente com uma chapa de ferro. Nela estão gravadas um código que remete a altitude, latitude e longitude daquele local.

Xeromórficas: Nome que se dá s plantas adaptadas a climas semiárido a desértico, ou então em regiões úmidas, mas salinas.

Zona de Amortecimento: Área estabelecida ao redor de uma unidade de conservação com o objetivo de filtrar os impactos negativos das atividades que ocorrem fora dela.

Zona de Transição: Onde são promovidas práticas sustentáveis de gestão de recursos.

Zona Núcleo: Zonas com dimensão adequada, dedicadas à conservação da natureza.

Zona Tampão: Região onde são realizáveis atividades de conservação da natureza.

Zoonoses: Doenças infecciosas de animais capazes de ser naturalmente transmitidas para o ser humano.

Zooplâncton: comunidade de animais microscópicos que flutuam livremente nos corpos de água, sem nenhum ou quase nenhum movimento próprio.

Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente

Acompanhamento de danos TOMO I – Contextualização Documentos Suplementares

Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Julho/2021





DOCUMENTOS SUPLEMENTARES

MODELAGEM UNIDIMENSIONAL: “SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DA CHEIA DE 2020 NO RIO DOCE E CENÁRIOS DE TEMPO DE RETORNO”

INTRODUÇÃO

Este documento suplementar apresenta o relato dos resultados finais da simulação do Rio Doce utilizando as séries de dados telemétricos de vazões disponíveis da Agência Nacional de Águas – ANA e disponíveis nas estações da Renova, referentes à cheia de janeiro de 2020, sendo estimado a **Área de Susceptibilidade ao Extravasamento de Rejeito (ASER)**, utilizando simulação hidrodinâmica 1D com o modelo HEC-RAS.

São apresentados nesse documento suplementar resultados da análise de estimativa de vazões máximas, vazões e manchas de inundação para diferentes tempos de retorno, e a simulação hidrodinâmica unidimensional para a cheia de 2020 ocorrida no Rio Doce, utilizando o modelo HEC-RAS. O modelo HEC-RAS utiliza equações que permitem descrever o transporte de água em terrenos considerando processos físicos como efeitos de remanso e interação com planícies de inundação.

Para este estudo foi utilizado um levantamento topográfico de alta definição obtido por laser aerotransportado (LIDAR, considerado a melhor tecnologia existente atualmente) de praticamente toda a área, disponibilizado pela Fundação Renova (2019), aliado a um levantamento batimétrico do rio Doce através de 160 seções batimétricas obtidas pela ANA (Agência nacional de águas), originando uma distância média de 6 km entre as seções.

MATERIAIS E MÉTODOS

Estimativa de vazões máximas em função do período de retorno

Foram adquiridos os dados vazões diárias das estações da ANA localizadas no Rio Doce, que são:

- 56425000 - Rio Dantas ($A=10.100 \text{ km}^2$),
- 56539000 - Cachoeira dos Óculos ($A=15.900 \text{ km}^2$),
- 56719998 - Belo Oriente ($A=24.200 \text{ km}^2$),
- 56850000 - Governador Valadares ($A=39.828 \text{ km}^2$),
- 56920000 – Tumiritinga ($A=55425 \text{ km}^2$) e,
- 56994500 – Colatina ($A= 75.800 \text{ km}^2$).

Da análise dos dados observou-se que a estação de 56994500 – Colatina é que tem a maior série de dados contínuos e ininterruptos, no total de 34 anos, iniciando em 1943 e terminando em 1976. Essa série foi utilizada para verificar, dentre as distribuições de probabilidades usualmente utilizadas em hidrologia, a que melhor representa os dados da região.

Foram avaliadas as seguintes distribuições: Normal, Gumbel, Exponencial, Gama, Pearson Tipo III e Log Pearson tipo III, usando o Teste de Kolmogorov- Smirnof e o erro padrão da estimativa como critério de classificação.

O teste de Kolmogorov-Smirnof (Chakravarti, Laha, and Roy, (1967)) compara a diferença máxima entre a frequência teórica da distribuição testada e a frequência observada, com a diferença máxima tabelada ao nível de significância tabelada:

$$D \text{ Max. } X = |FT(x) - FA(x)| \leq Dif. tab \quad (1)$$

Sendo:

$FT(x)$ = Frequência teórica;

$FA(x)$ = Frequência observada acumulada;

$D \text{ Max. } X$ = diferença máxima entre a frequência teórica da distribuição testada;

$Dif. tab.$ = Diferença tabelada ao nível de significância desejado.

Para uma distribuição ser aceitável, o nível de significância do teste não pode ser menor do que 5%. O erro padrão da estimativa é expresso por:

$$EPE(\%) = \sqrt{\frac{\sum [FT(x) - FA(x)]^2}{N - 2}} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

$EPE(\%)$ = Erro padrão da estimativa em porcentagem;

$\overline{FA(x)}$ = média das frequências acumuladas.

Foi definida como a melhor distribuição a que apresentou o menor valor da diferença máxima observada, bem como o menor erro padrão da estimativa. Definida a distribuição, ela foi aplicada para a obtenção das vazões máximas diárias para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, para serem utilizadas para a geração das manchas de inundação correspondentes. Para essa determinação foi usado o período de 1985 a 2019, por ser o período mais recente, com dados comuns a todas as estações. O processamento para obter os máximos anuais foi feito considerando o ano hidrológico de outubro de um ano a setembro do ano posterior, que é o ano hidrológico típico desta região brasileira.

Uma análise prévia mostrou que a distribuição que melhor descreveu os dados de vazões máximas diárias observadas no Rio Doce, foi a distribuição de Gumbel. Por isso, na próxima seção descreve-se a formulação da distribuição de Gumbel.

Método de Gumbel (1942, 1958)

O método de Gumbel (1942,1958) é utilizado para a análise de eventos extremos (máximos ou mínimos) e tem a sua aplicação restrita a séries anuais, de precipitação e vazão. Ele adota a distribuição de extremos tipo I ou de Fischer-Tippet em que a curva de distribuição é assimétrica, com coeficiente de assimetria igual a 1,139 para a distribuição de máximos e -1,139 para a distribuição de mínimos. A função de distribuição acumulada dessa distribuição é dada por:

$$P(X \geq x) = 1 - e^{-e^{-y}} = P \quad (3)$$

e

$$P(X \leq x) = e^{-e^{-y}} = P' \quad (4)$$

A equação (3) representa a probabilidade de ocorrência de um valor maior ou igual a um determinado valor de x da série anual. A equação (4) representa a probabilidade de ocorrência de um valor menor ou igual a x da série anual. Nas equações acima:

e : base dos logaritmos neperianos;

y : variável reduzida, dada por:

$$y = a \times (x_i - M_o) \quad (5)$$

onde:

x_i : valor de um dado evento qualquer da série anual a ser analisada;

a : coeficiente;

M_o : moda da série anual.

Os períodos de retorno (Tr) para os dois casos, Equação (3) e Equação (4), são:

$$Tr = \frac{1}{P} \quad e \quad Tr = \frac{1}{P'} \quad (6)$$

Para séries finitas:

$$M_o = \bar{x} - \frac{\sigma_x \times y_n}{\sigma_n} \quad (7)$$

Sendo:

$\bar{x}$: média da série finita;

σ_x : desvio padrão da série finita;

y_n : valor esperado para a média da variável reduzida (Tabela 82);

σ_n : valor esperado para o desvio padrão da variável reduzida (Tabela 83).

$$a = \frac{\sigma_n}{\sigma_x} \quad (8)$$

$$y = \frac{\sigma_n}{\sigma_x} \times \left(x_i - \bar{x} + \sigma_x \times \frac{y_n}{\sigma_n} \right) \quad (9)$$

$$x_i = \bar{x} + \frac{\sigma_x}{\sigma_n} \times (y - y_n) \quad (10)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

Combinando-se a Equação (3) e a Equação (6) obtém-se a equação que relaciona o período de retorno com a variável reduzida:

$$y = -\ln \times \left[-\ln \times \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \quad (12)$$

Tabela 82 – Valor esperado para a média reduzida (y_n) função do nº de dado (n).

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,4952	0,4996	0,5035	0,5070	0,5100	0,5128	0,5157	0,5181	0,5202	0,5220
20	0,5236	0,5252	0,5268	0,5283	0,5296	0,5309	0,5320	0,5332	0,5343	0,5353
30	0,5362	0,5371	0,5380	0,5388	0,5396	0,5402	0,5410	0,5418	0,5424	0,5430
40	0,5436	0,5442	0,5448	0,5453	0,5458	0,5463	0,5468	0,5473	0,5477	0,5481
50	0,5485	0,5489	0,5493	0,5497	0,5501	0,5504	0,5508	0,5511	0,5515	0,5518
60	0,5521	0,5524	0,5527	0,5530	0,5533	0,5535	0,5538	0,5540	0,5543	0,5545
70	0,5548	0,5550	0,5552	0,5555	0,5557	0,5559	0,5561	0,5563	0,5565	0,5567
80	0,5569	0,5570	0,5572	0,5574	0,5576	0,5578	0,5580	0,5581	0,5583	0,5585
90	0,5586	0,5587	0,5589	0,5591	0,5592	0,5593	0,5595	0,5596	0,5598	0,5599
100	0,5600									
150	0,5635									
200	0,5672									

Tabela 83 – Valor esperado para o desvio padrão reduzido σ_n função do nº de dados (n).

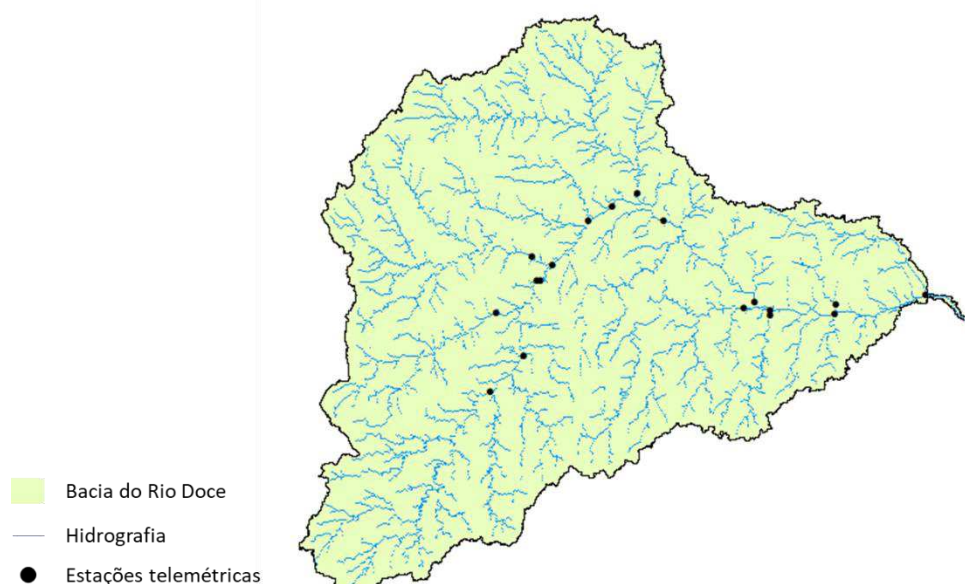
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,9496	0,9676	0,9833	0,9971	1,0095	1,0206	1,0316	1,0411	1,0493	1,0565
20	1,0628	1,0696	1,0754	1,0811	1,0864	1,0915	1,0961	1,1004	1,1047	1,1086
30	1,1124	1,1159	1,1193	1,1226	1,1255	1,1285	1,1313	1,1339	1,1363	1,1388
40	1,1413	1,1436	1,1458	1,1480	1,1499	1,1519	1,1538	1,1557	1,1574	1,1590
50	1,1607	1,1623	1,1638	1,1658	1,1667	1,1681	1,1696	1,1708	1,1721	1,1734
60	1,1747	1,1759	1,1770	1,1782	1,1793	1,1803	1,1814	1,1824	1,1834	1,1844
70	1,1854	1,1863	1,1873	1,1881	1,1890	1,1898	1,1906	1,1915	1,1923	1,1930
80	1,1938	1,1945	1,1953	1,1959	1,1967	1,1973	1,1980	1,1987	1,1994	1,2001
90	1,2007	1,2013	1,2020	1,2026	1,2032	1,2038	1,2044	1,2049	1,2055	1,2060
100	1,2065									
150	1,2300									
200	1,2360									

Coleta e tratamento de dados de estações telemétricas no evento de 2020

Observações de vazão de estações fluviométricas telemétricas foram obtidas para serem utilizadas como condições de contorno para os modelos hidrodinâmicos da cheia de 2020 do Rio Doce. Foi realizada a aquisição de dados de vazão de todas as estações fluviométricas telemétricas disponíveis na bacia do Rio Doce a partir da base de dados da Agência Nacional de Águas – ANA. Sendo assim, foram selecionadas as estações localizadas ao longo do Rio Doce e na foz de seus principais afluentes que possuíam dados de vazões disponíveis para o período de interesse (Jan/2020 até Fev/2020).

O período de 01 de janeiro de 2020 à 10 de fevereiro de 2020 foi escolhido por enquadrar o pico da maior cheia registrada em 2020, até o momento, e por ser suficiente para aquecimento do modelo hidrodinâmico antes da simulação do evento máximo. Desta seleção resultaram 17 estações ao longo do Rio Doce e afluentes, apresentadas em preto na Figura 154.

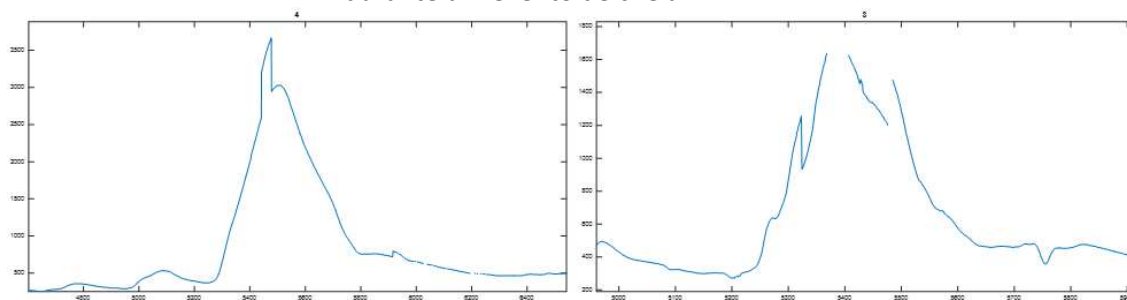
Figura 154 – Estações telemétricas pré-selecionadas a partir de disponibilidade de dados no período entre janeiro e fevereiro de 2020.



Fonte: Lactec (2020).

Entretanto, em algumas destas estações observam-se inconsistências na continuidade da série temporal de vazão como quebras e estimativas deslocadas durante um certo período ao longo do hidrograma da cheia de maior pico de vazão, conforme ilustrado na Figura 155. Estes problemas foram solucionados a partir da inspeção e identificação visual dos períodos onde ocorria o deslocamento e posterior ajuste das vazões. O ajuste foi realizado através do desconto ou acréscimo da diferença entre o primeiro ponto identificado como deslocado e o ponto imediatamente anterior. Desta forma, mantém-se a variação entre os dados deslocados, sendo alterada apenas a magnitude.

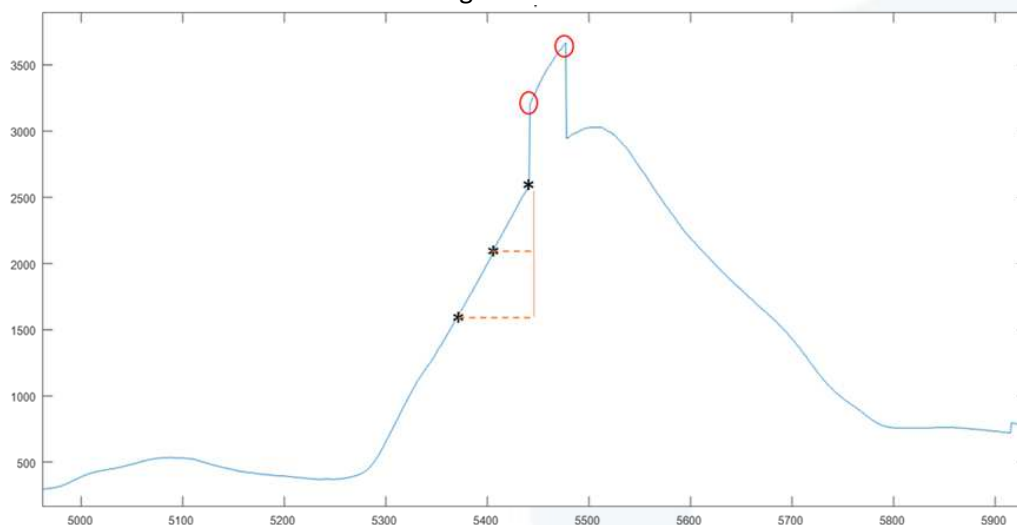
Figura 155 – Ilustração de problema de deslocamento de medições das estações telemétricas durante um evento de cheia.



Fonte: Lactec (2020).

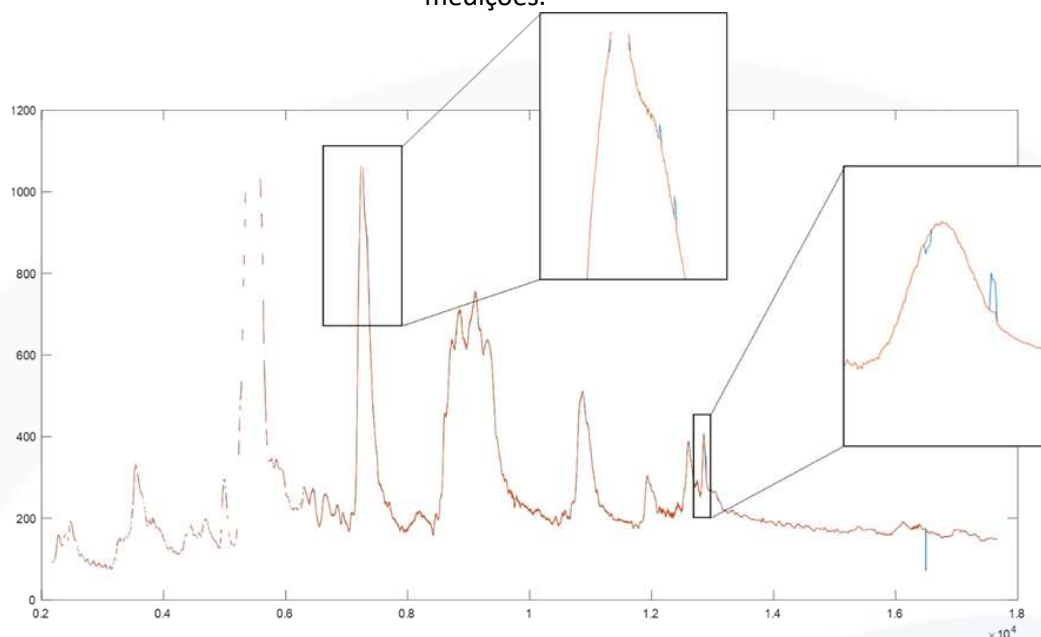
Para o preenchimento de lacunas e deslocamentos na ascensão (ou recessão) dos hidrogramas, foi utilizado um ajuste utilizando a taxa de variação média estimada pela média das três medições anteriores (ou posteriores) ao período com problemas, conforme exemplo na Figura 156. Um exemplo de hidrograma ajustado por esta metodologia é apresentado na Figura 157.

Figura 156 – Pontos de interesse para metodologia de ajuste de medições deslocadas ao longo do hidrograma.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 157 – Exemplo de hidrograma ajustado com metodologia para correção de deslocamento de medições.



Fonte: Lactec (2020).

Esta metodologia foi aplicada para todas as estações em que foram identificados problemas de descontinuidade na série temporal. Contudo, além deste problema, algumas das estações apresentavam grande quantidade de falhas, em especial no pico do evento desejado, ou outras incoerências como erros de volume (volume de jusante inferior ao volume na estação de montante) e vazões de pico inconsistentes com os observados nas estações a montante e jusante.

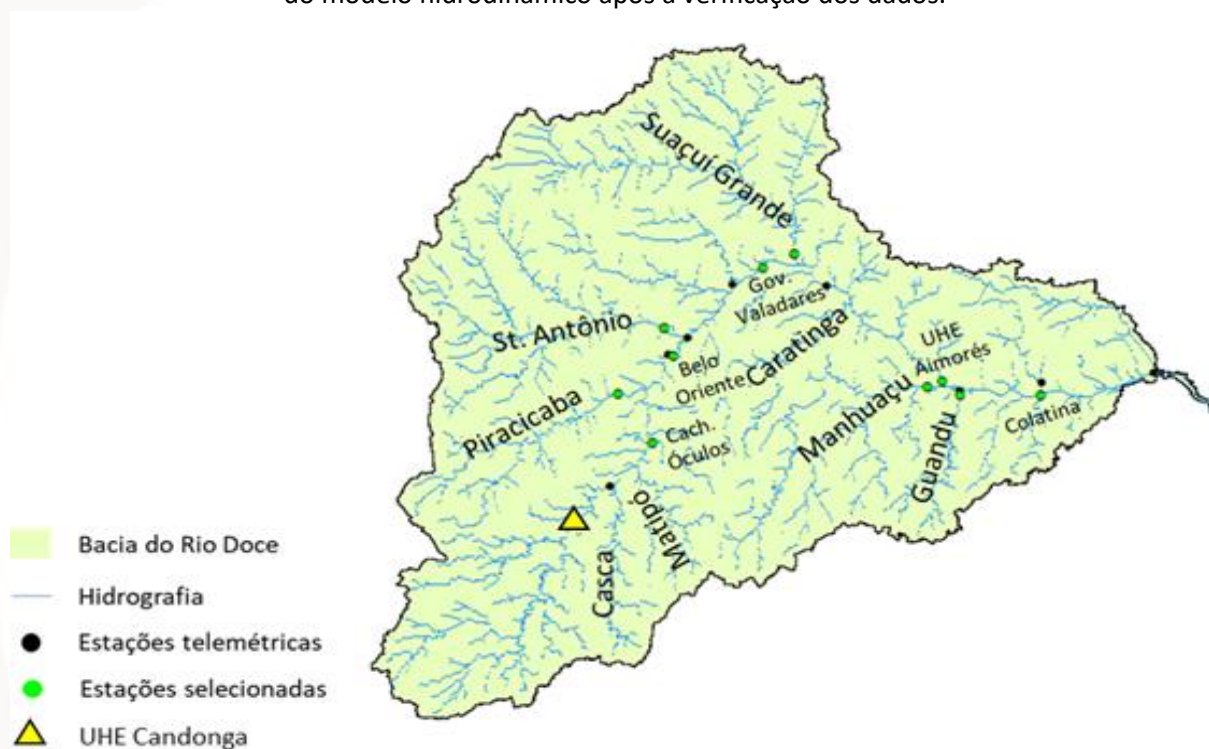
Assim, uma filtragem adicional foi realizada de forma a excluir i) as estações que apresentassem ausência de mais de 15% dos dados no período de interesse; ii) as estações que apresentassem um volume no hidrograma inferior ao volume observado na estação à montante e; iii) as estações em que a vazão de pico fosse visualmente incoerente com os valores observados nas estações imediatamente a montante e a jusante.

Com este processo restaram dez estações, apresentadas em verde na Figura 158 e listadas na Tabela 84. Para estas estações foram calculadas as séries de vazões médias diárias e, quando necessário, as falhas nesta série de vazões diárias foram preenchidas com base na estimativa da vazão na estação imediatamente a jusante, a partir de uma ponderação por áreas de drenagem. Estas dez estações foram então utilizadas para estimativa das condições de contorno do modelo hidrodinâmico, conforme item a seguir.

Tabela 84 – Estações telemétricas utilizadas para estimativas das condições de contorno.

Código	Nome da Estação	Longitude	Latitude
56539000	CACHOEIRA DOS ÓCULOS MONTANTE	-42,4764	-19,7769
56696000	MARIO DE CARVALHO	-42,6408	-19,5247
56719998	BELO ORIENTE	-42,3761	-19,3297
56825000	NAQUE VELHO	-42,4228	-19,1881
56850000	GOVERNADOR VALADARES	-41,9508	-18,8831
56895000	UHE AIMORÉS RIO SUAÇUI GRANDE	-41,7969	-18,8092
56990005	UHE AIMORÉS RIO MANHUAÇU	-41,1614	-19,4917
56990850	UHE AIMORÉS BARRAMENTO	-41,0956	-19,4564
56992380	UHE MASCARENHAS MONTANTE 1	-41,0089	-19,5328
56994510	COLATINA CORPO DE BOMBEIROS	-40,6236	-19,5303

Figura 158 – Estações telemétricas utilizadas (em verde) para a estimativa das condições de contorno do modelo hidrodinâmico após a verificação dos dados.



Fonte: Lactec (2020).

Estimativa das condições de contorno do modelo hec-ras 1d

Em muitos casos adotou-se a seguinte equação para estimar vazões em um Local de interesse não monitorado, a partir de uma relação de áreas de drenagem e vazão de um Local monitorado:

$$Q_{Local\ interesse} = \frac{A_{Local\ interesse}}{A_{Local\ monitorado}} \times Q_{Local\ monitorado} \quad (13)$$

Os seguintes critérios foram adotados para estimar as condições de contorno do modelo HEC-RAS 1D:

- Condição de contorno de Montante (UHE Candonga): para cada dia, utilizou-se uma relação das áreas de drenagem (A) em Candonga e na estação Cachoeira dos Óculos com a vazão diária observada nessa última, conforme apresentado na Equação 13, onde:

$$A_{Candonga} = 9.576 \text{ km}^2$$

$$A_{Cach. \text{ Óculos}} = 15.963 \text{ km}^2$$

Sabe-se que a onda de cheia se propaga com uma velocidade maior do que a velocidade média normal do escoamento, chamada celeridade da onda de cheia. Durante a propagação da onda de cheia os valores tendem a sofrer uma atenuação. Por isso, para representarmos de forma adequada o pico que se desloca desde Candonga até Cachoeira dos Óculos, foi necessário fazer um ajuste da vazão de pico do hidrograma encontrado para recuperar a vazão de pico em Candonga que seria capaz de sofrer um amortecimento tal que em Cachoeira dos Óculos a vazão estivesse bem representada. O valor do pico estimado pela Equação 13 foi de $1.180 \text{ m}^3/\text{s}$ e aquele encontrado após o ajuste foi de $1.608 \text{ m}^3/\text{s}$. Cujos valores são compatíveis com o valor máximo de vazão estimada em Candonga de forma independente disponível no sistema SAR da ANA (<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>), que foi de $1673 \text{ m}^3/\text{s}$ (menos de 5% de diferença).

- Condição de contorno lateral do rio Casca e do rio Matipó: as áreas de drenagem dos rios Casca e Matipó são, respectivamente, de 2.507 km^2 e 2.587 km^2 . Ao somar as duas, temos uma área de drenagem de 5.094 km^2 , sendo representados em 49% pelo rio Casca e 51% pelo rio Matipó. A área de drenagem incremental entre a estação Cachoeira dos Óculos e Candonga é de 6.387 km^2 . Para representar esse trecho, realizou-se uma adição proporcional às áreas dos rios Casca e Matipó, de tal forma que eles representassem também as demais áreas incrementais. Assim, multiplicou-se os fatores de 0,49 e 0,51 por 6.387 km^2 para estimar as áreas dos rios Casca e Matipó, resultando nos valores, respectivamente, de 3.130 km^2 e 3.257 km^2 . A partir disso, utilizou-se a Equação 13 para estimar as séries de vazões desses afluentes. Esta metodologia trouxe, a princípio, uma superestimativa da vazão de cheia em Cachoeira dos Óculos, isto porque a bacia incremental não contribui da mesma forma, nas vazões extremas, que os afluentes. Desta maneira, através de calibrações, a vazão no rio Casca foi corrigida para uma boa estimativa de vazões em Cachoeira dos Óculos. Assim, realizou-se apenas uma correção do valor de pico no rio Casca, que passou a ser de $352 \text{ m}^3/\text{s}$ ao invés de $386 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Condição de contorno lateral do rio Piracicaba: inicialmente, optou-se por utilizar a mesma abordagem descrita para os rios Casca e Matipó para estimar as vazões afluentes ao trecho entre a estação Cachoeira dos Óculos e Belo Oriente. Contudo, percebeu-se que os resultados sempre geravam superestimativas, pois a contribuição de vazão da área incremental, naturalmente, é bem inferior àquela desse afluente. Dessa forma, para esse afluente, optou-se por realizar apenas a correção do valor do pico, como explicado previamente, o que resultou

em melhores resultados da simulação quando comparado com os valores observados da estação Belo Oriente. Com isso, o valor do pico do rio Piracicaba passou a ser de 1.690 m³/s ao invés de 1.891 m³/s.

- Condição de contorno lateral do rio Santo Antônio e das áreas incrementais entre Belo Oriente e Governador Valadares: como nesse trecho haviam duas estações com dados a montante (rio principal e afluente) e a estação de jusante, realizou-se primeiramente uma simulação sem nenhuma correção de vazão nessas estações. Após a simulação, foi realizada uma comparação do hidrograma simulado com o hidrograma observado, o que mostrou que o hidrograma simulado subestimava os valores observados. Assim, calculou-se a diferença entre os dois hidrogramas e adotou-se o hidrograma resultante como sendo aquele que deveria entrar como condição de contorno lateral ao trecho. Quando o hidrograma resultante apresentou valores menores que zero, adotou-se o valor de zero como referência.
- Condição de contorno lateral do rio Suaçuí Grande e das áreas incrementais entre Governador Valadares e o reservatório da UHE Aimorés: foi utilizada a mesma abordagem para o trecho entre Belo Oriente e Governador Valadares. Não houve modificação no valor do pico do hidrograma da estação do rio Suaçuí Grande e o valor do hidrograma resultante foi considerado como chegando ao rio Doce na localização da foz do rio Caratinga, o maior afluente do trecho.
- Condição de contorno dos rios Manhuaçu e Guandu: foram utilizados os dados dos hidrogramas observados sem qualquer modificação no valor do pico dos hidrogramas.
- Condição de contorno para o trecho entre a UHE Aimorés e Colatina: também se utilizou a mesma abordagem descrita para o trecho em Belo Oriente e Governador Valadares. O hidrograma resultante foi inserido na localização correspondente a foz do rio Santa Joana.
- Condição de contorno de jusante: foram utilizados os dados da série de maré, calculados a partir das constantes harmônicas da estação maregráfica de Terminal Barra do Riacho, semelhante aos estudos anteriores.

Simulação hidrodinâmica

O modelo HEC-RAS (USACE, 2019) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Além de simulações 1D, esse modelo permite realizar simulações hidrodinâmicas bidimensionais horizontais (2DH) em regime não permanente (utilizando as equações completas de Saint-Venant).

Cenários de período de retorno

Para os cenários de diferentes períodos de retorno de vazão, utilizou-se os valores estimados nos postos fluviométricos e transferência por relação de áreas de drenagem para estimar os aportes em bacias incrementais. Como existe uma variabilidade dos volumes precipitados (maiores na porção oeste e menores na porção leste da bacia), buscou-se sempre utilizar como base duas estações do rio principal. Isso foi realizado para cada uma das 23 áreas incrementais consideradas desde a UHE Candonga até a foz. A Equação 14 foi utilizada para estimar a vazão da condição de contorno de montante (UHE Candonga). A Equação 15 foi utilizada para estimar as demais condições de contorno laterais, sendo possível existir mais de uma área incremental entre duas estações localizadas no rio Doce com dados observados. Destaca-se que como a última estação no rio Doce é a de Colatina, utilizou-se as estações de Tumiritinga e Colatina também para encontrar as vazões correspondentes as regiões incrementais a jusante de Colatina.

$$Q_{CC\ mont.} = A_{CC\ mont.} \times \frac{Q_{Rio\ Dantas}^{Tr}}{A_{Rio\ Dantas}} \quad (14)$$

$$Q_{incremental} = A_{incremental} \times \frac{(Q_{est.\ jus.}^{Tr} - Q_{est.\ mont.}^{Tr})}{(A_{est.\ jus.} - A_{est.\ mont.})} \quad (15)$$

em que $Q_{CC\ mont.}$ e $A_{CC\ mont.}$ são a vazão (m^3/s) e área de drenagem (km^2) na condição de contorno de montante; $Q_{Rio\ Dantas}^{Tr}$ e $A_{Rio\ Dantas}$ são a vazão (m^3/s) estimada para o período de retorno Tr e a área de drenagem (km^2) da estação Rio Dantas; $Q_{incremental}$ e $A_{incremental}$ são a vazão (m^3/s) e área de drenagem (km^2) para as regiões incrementais aos trechos do rio Doce; $Q_{est.\ jus.}^{Tr}$ e $Q_{est.\ mont.}^{Tr}$ correspondem as vazões (m^3/s) estimadas para o período de retorno TR para as estações a montante (est. mont.) e a jusante (est. Jus.) de determinado trecho; $A_{est.\ jus.}$ e $A_{est.\ mont.}$ correspondem as áreas de drenagem (km^2) das estações a montante (est. mont.) e a jusante (est. Jus.) de determinado trecho.

As vazões foram estimadas para 5 períodos de retorno (5, 10, 25, 50 e 100 anos), utilizadas na simulação hidrodinâmica e estimativa de manchas de inundação correspondente a cada Tr .

Cheia de janeiro de 2020

A simulação hidrodinâmica foi realizada para o período entre 01/01/2020 e 10/02/2020, utilizando vazões constantes de 24/12/2019 a 31/12/2019 para aquecimento do modelo. Utilizando os dados da operação do reservatório disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e a ferramenta *pump station* para representar o turbinamento da UHE Aimorés e seu lançamento a jusante da cidade de Aimorés, conseguiu-se representar adequadamente o trecho do rio Doce entre a barragem e a casa de força desta usina.

A validação dos resultados da simulação hidrodinâmica foi realizada comparando os resultados simulados com as estações Cachoeira dos Óculos, Belo Oriente, Governador Valadares, UHE Aimorés e Colatina, localizadas ao longo do rio Doce (Figura 158). Para as vazões foram calculados os coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), de correlação (r) e o erro de volume (BIAS). Para os níveis, utilizou-se além do NSE e do r , a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o erro no valor do pico da série. Também foram utilizados dados levantados em campo a partir das marcas da cheia de janeiro de 2020 no rio Doce, que indicavam as cotas

máximas atingidas pela cheia em diversos locais. Essas informações de cota máxima foram comparadas com os níveis máximos e a mancha de inundação máxima simulada. Além disso, foram comparadas as manchas de inundação estimadas com o modelo com imagens de satélite e imagens apresentadas em notícias da internet.

Para as estações de Governador Valadares e Colatina foram realizadas duas comparações. Os dados coletados a partir da rede telemétrica possuíam dados a cada 15 minutos. Para comparar com o valor diário fornecido pelo HEC-RAS foi utilizado uma média do nível diário, em conformidade com as informações utilizadas como condição de contorno para o modelo. Essas séries também possuíam informações com discretizações com intervalos de minutos e as métricas foram calculadas considerando a média diária.

RESULTADOS

Estimativas de vazões máximas

Verificação da qualidade do ajuste das distribuições de frequência aos dados

A Tabela 85 apresenta os resultados da verificação da qualidade do ajuste das distribuições testadas, na estação de Colatina.

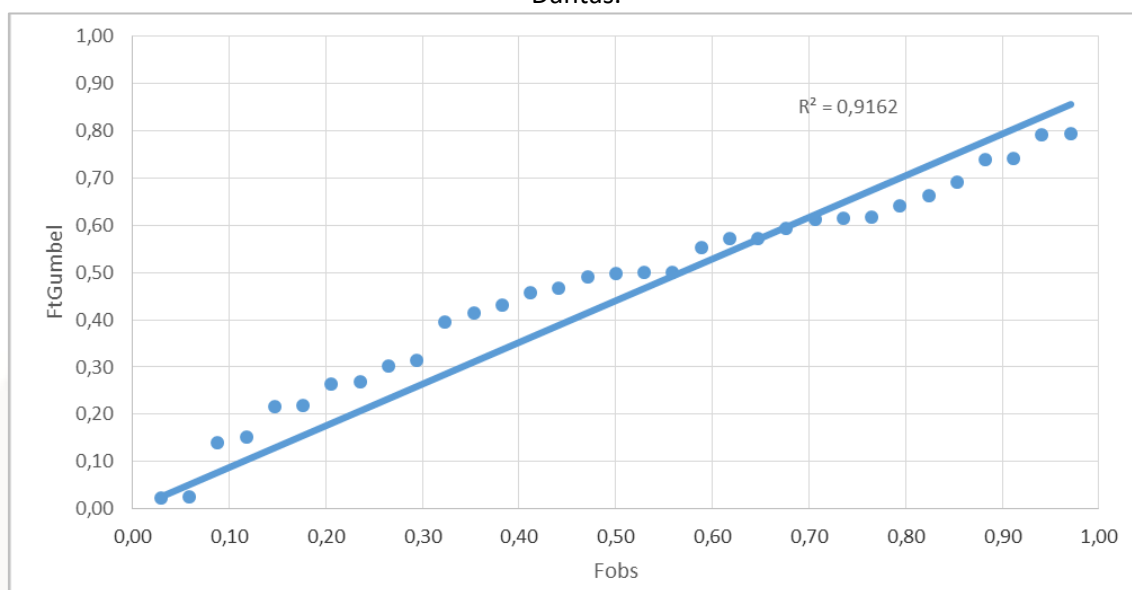
Tabela 85 – Resultados do teste de Kolmogorof – Smirnof nas distribuições de frequências testadas, apresentando se a distribuição foi aprovada (V) ou reprovada (X).

Distribuição		F _{normal}	F _{gumbel}	F _{gama}	F _{exp}	F _{pearson}
Dif (max)		0,107	0,079	0,146	0,221	0,254
Dtab (5%)	0,2596	V	V	V	V	V
Dtab (20%)	0,2099	V	V	V	X	X
EPE (%)		9,859	7,187	20,493	40,849	32,000

Esses resultados mostram que a distribuição de Gumbel, aprovada ao nível de significância de 20%, com diferença máxima tabelada de 0,079 e erro padrão da estimativa de 7,187%, é a que melhor descreve os dados de vazões máximas diárias na estação de Colatina no período de 1943 a 1976 e, portanto, foi usada para estimar as vazões máximas no rio Doce em função do período de retorno para todas as estações no período de 1986 a 2019.

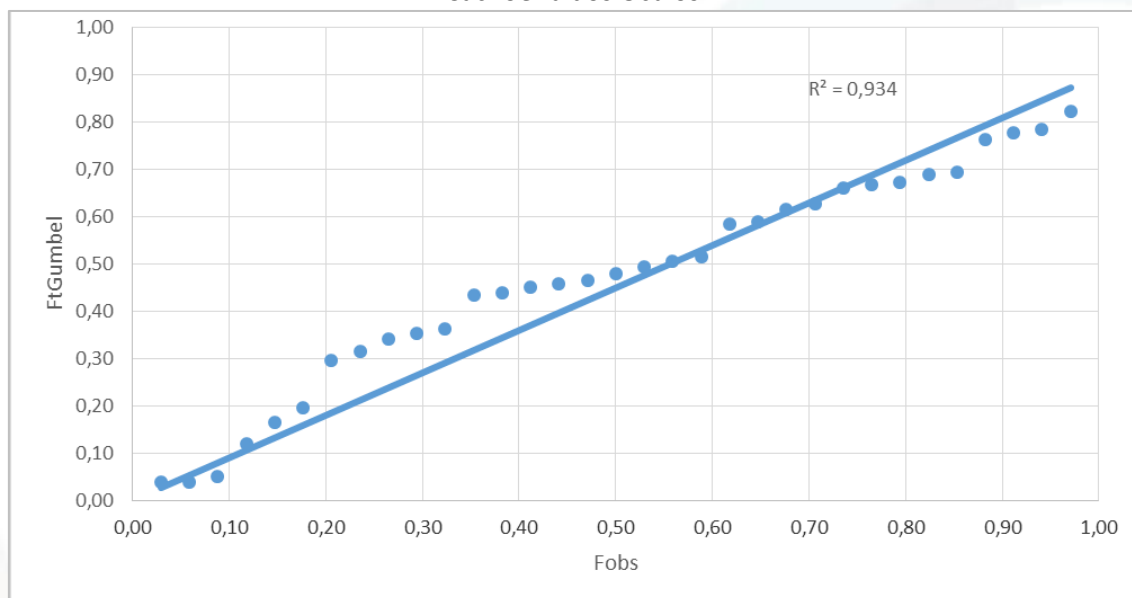
Para visualizar o ajuste, apresenta-se da Figura 159 a Figura 164 relação entre a frequência observada e a frequência teórica da distribuição de Gumbel para cada estação. Em todas as estações o ajuste foi considerado satisfatório, com coeficiente de determinação R^2 variando de 0,85 a 0,98.

Figura 159 – Relação entre a frequência teórica e a frequência observada na estação 56425000 – Rio Dantas.



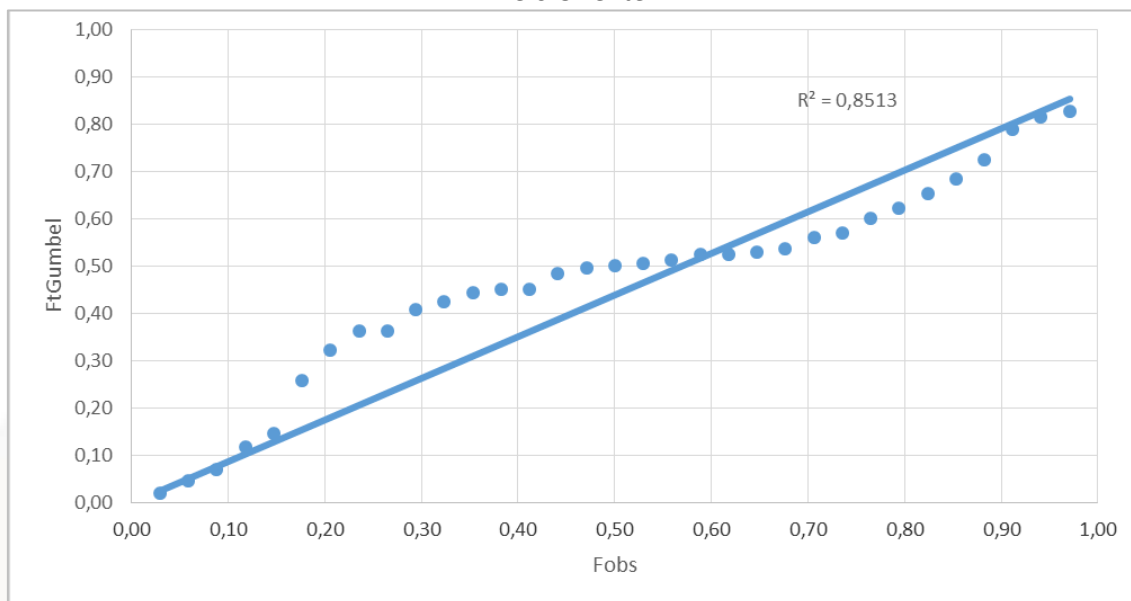
Fonte: Lactec (2020).

Figura 160 – Relação entre a frequência teórica e a frequência observada na estação 56539000 – Cachoeira dos Óculos.



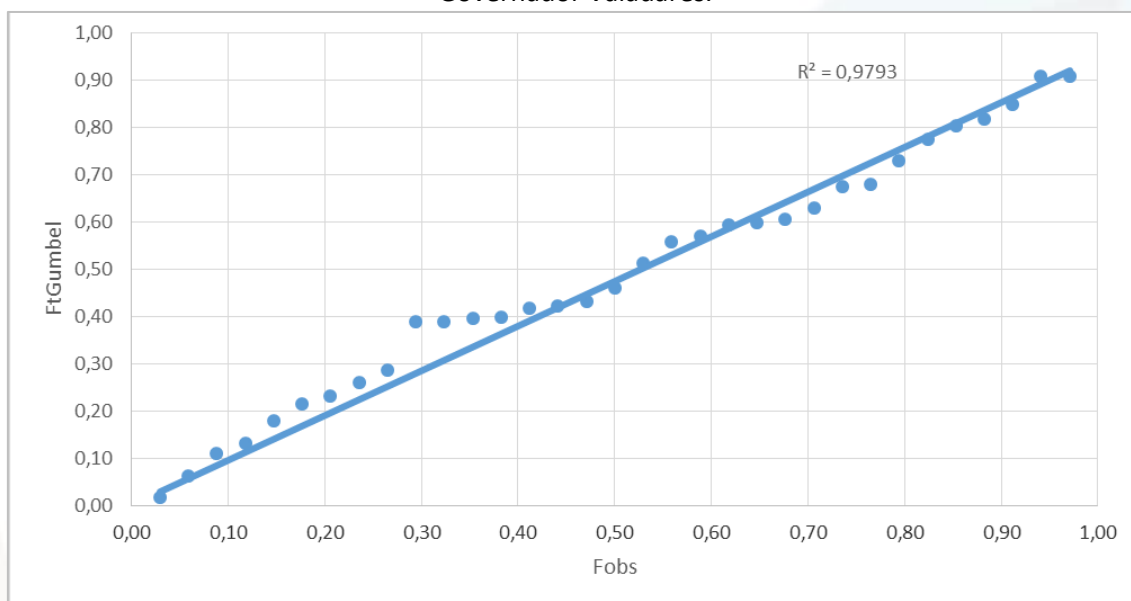
Fonte: Lactec (2020).

Figura 161 – Relação entre a frequência teórica e a frequência observada na estação 56719998 – Belo Oriente.



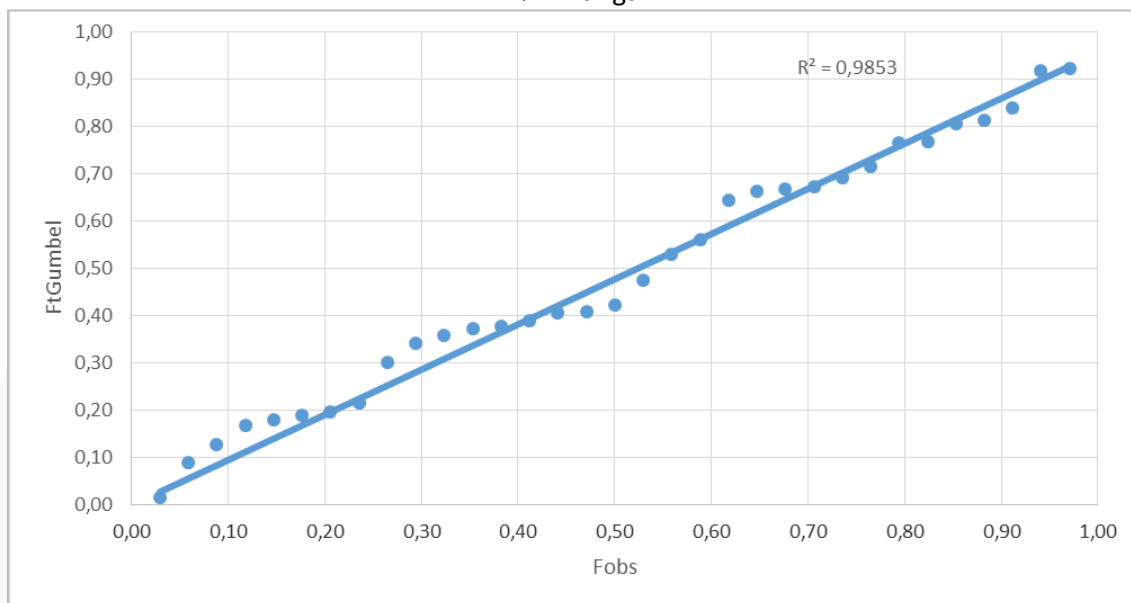
Fonte: Lactec (2020).

Figura 162 – Relação entre a frequência teórica e a frequência observada na estação 56850000 – Governador Valadares.



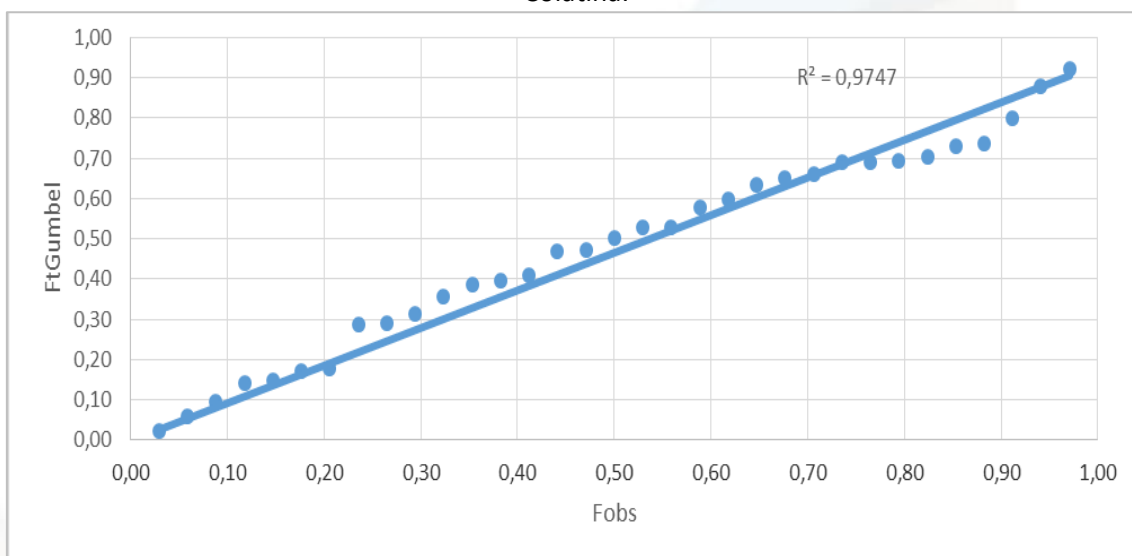
Fonte: Lactec (2020).

Figura 163 – Relação entre a frequência teórica e a frequência observada na estação 56920000 – Tumiritinga.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 164 – Relação entre a frequência teórica e a frequência observada na estação 56994500 – Colatina.



Fonte: Lactec (2020).

Estimativa das vazões máximas em função do período de retorno

A Tabela 86 apresenta as vazões máximas, em m^3/s , observadas nas estações localizadas no leito do Rio Doce, a partir da barragem da UHE Candonga para jusante.

Tabela 86 – Vazões máximas observadas nas estações 56425000 – Rio Dantas, 56539000 – Cachoeira dos Óculos, 56719998 – Belo Oriente, 56850000 – Governador Valares (GV), 56920000 – Tumiritinga e 56994500 – Colatina, no período de 1986 a 2019.

Ano Hidrológico	Rio Dantas	Cachoeira dos Óculos	Belo Oriente	GV	Tumiritinga	Colatina
1986 1987	497	613	1028	1451	1698	1888
1987 1988	677	876	1276	2036	2511	2878
1988 1989	343	461	658	1071	1207	1319
1989 1990	736	897	1443	2517	3110	3496
1990 1991	1025	1019	1756	2625	3159	4349
1991 1992	1019	1056	1951	3285	4271	5174
1992 1993	641	826	1651	2434	3032	3852
1993 1994	521	632	1134	1811	2163	2783
1994 1995	449	637	1335	1949	2088	2292
1995 1996	567	694	1543	2661	3042	5155
1996 1997	1855	1953	3907	6071	7207	8757
1997 1998	528	680	1285	2113	2794	3850
1998 1999	400	532	885	1539	1838	2741
1999 2000	651	860	1290	2014	2146	3096
2000 2001	586	802	1193	1675	1845	2480
2001 2002	643	844	1447	2565	3178	4403
2002 2003	939	1348	2419	3582	3942	6745
2003 2004	864	988	1502	2280	2610	4955
2004 2005	1166	1483	2578	4119	4622	6414
2005 2006	688	813	1462	2661	3308	4242
2006 2007	880	1002	1325	2553	3238	4621
2007 2008	716	726	1093	1829	2014	2337
2008 2009	1862	1838	3298	3918	4171	6352
2009 2010	641	868	1373	2049	2183	3205
2010 2011	932	1273	1655	3379	4116	6837
2011 2012	1200	1953	2982	4700	5059	7752
2012 2013	546	644	967	1409	1672	2557
2013 2014	478	609	1263	3037	4061	10716
2014 2015	339	516	691	1063	1171	936
2015 2016	525	721	1216	3154	3488	3668
2016 2017	567	892	1349	2150	2243	2549
2017 2018	758	1088	1313	2637	2985	3492
2018 2019	398	508	751	1303	1566	2562

A Tabela 87 apresenta as vazões máximas, em m^3/s , em função do período de retorno (TR), nas estações localizadas no leito do Rio Doce, a partir da barragem de Candonga. O detalhamento dos cálculos é apresentado no Anexo, da Tabela B1 a B6.

Tabela 87 – Vazões máximas prováveis em função do período de retorno (T_r) para as estações localizadas no leito do Rio Doce.

T_r	FT_{gumbel}	Rio Dantas	Cachoeira dos Óculos	Belo Oriente	Gover. Valadares	Tumiritinga	Colatina
5	0,200	1057,9	1140,8	2172,0	3457,6	4041,6	6071,2
10	0,100	1301,0	1405,8	2660,6	4178,4	4884,7	7535,7
25	0,040	1608,2	1740,6	3278,1	5089,1	5949,9	9386,2
50	0,020	1836,0	1988,9	3736,2	5764,7	6740,2	10758,9
100	0,010	2062,2	2235,5	4190,8	6435,3	7524,6	12121,6

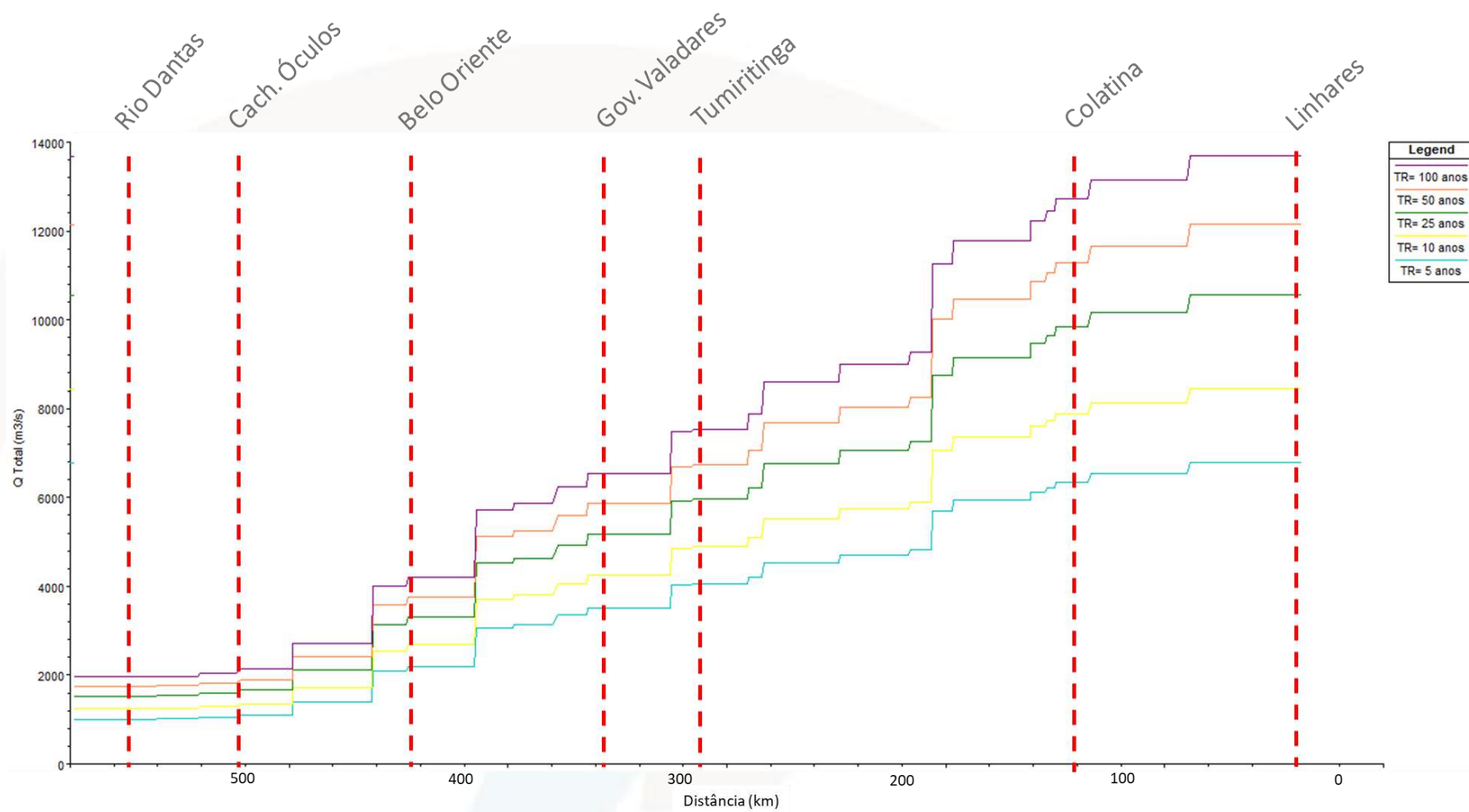
Simulação hidrodinâmica 1D

Cenários de período de retorno

A Figura 165 apresenta um perfil longitudinal do rio Doce com as diferentes vazões máximas simuladas (períodos de retorno iguais a 5, 10, 25, 50 e 100 anos). Como esperado, as vazões aumentam de montante para jusante e à medida que os TRs também aumentam.

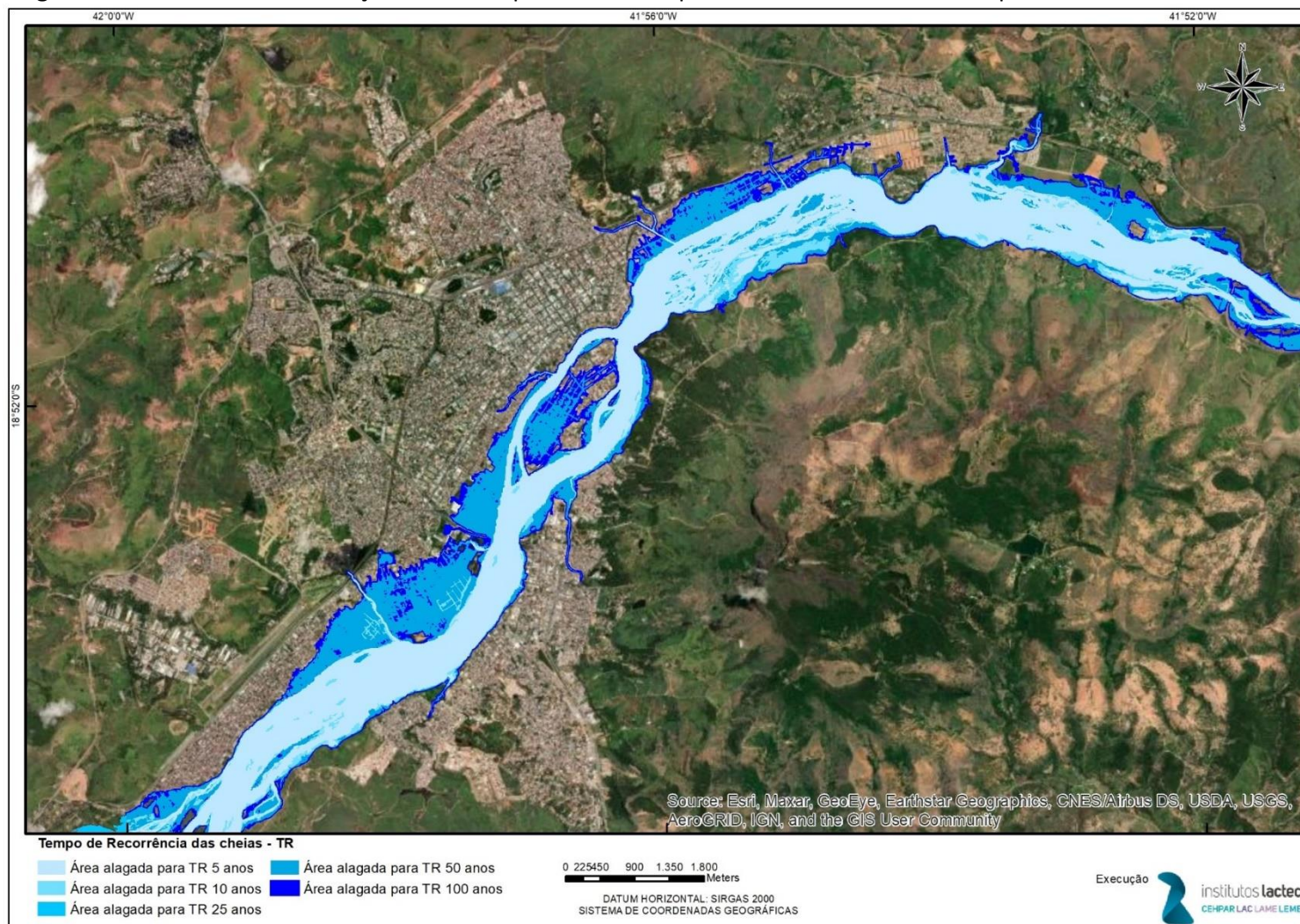
A Figura 166 e a Figura 167 apresentam, respectivamente, as manchas de inundação e os níveis d'água simulados em Governados Valadares, para diferentes períodos de retorno. A Figura 168 e a Figura 169 apresentam, respectivamente, a mancha de inundação e os níveis d'água simulados entre a UHE Aimorés e Colatina, também para os diferentes períodos de retorno. Os trechos apresentados são trechos de baixas declividades. Percebe-se que mesmo nessas regiões as variações das regiões inundadas são pequenas e são mais significativas para os períodos de retorno de 10 e 50 anos. Como se sabe, a bacia do rio Doce possui poucas planícies de inundações, o que faz com que mesmo para a mancha correspondente a uma cheia com período de retorno de 100 anos não existam tantas áreas inundadas fora da calha principal. As manchas de inundação foram comparadas visualmente com manchas disponíveis por mapeamento da CPRM (Serviço Geológico do Brasil) no sistema SACE (https://www.cprm.gov.br/sace/index_manchas_inundacao.php), havendo concordância visual entre os resultados.

Figura 165 – Vazões simuladas para diferentes períodos de retorno ao longo do rio Doce.



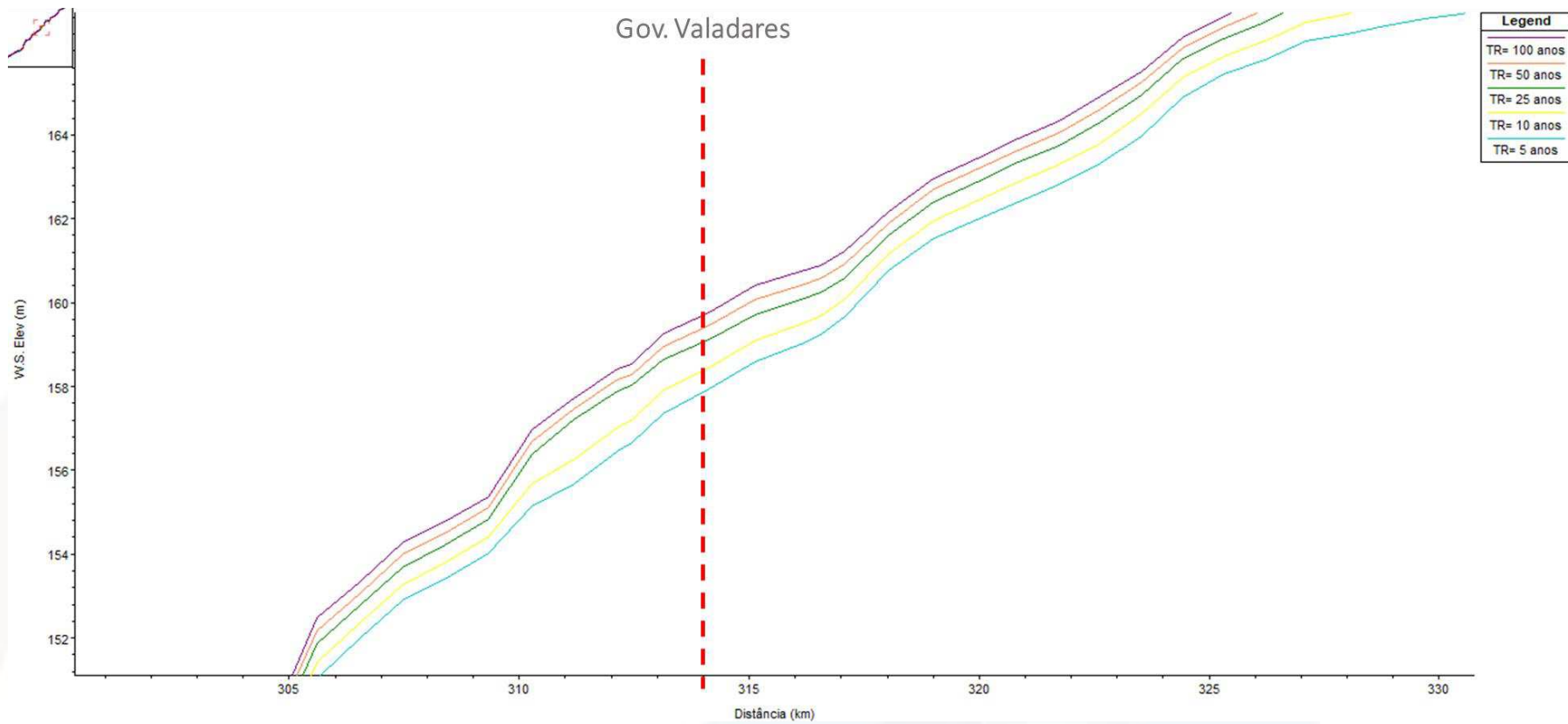
Fonte: Lactec (2020).

Figura 166 – Manchas de inundação simuladas para diferentes períodos de retorno no município de Governador Valadares.



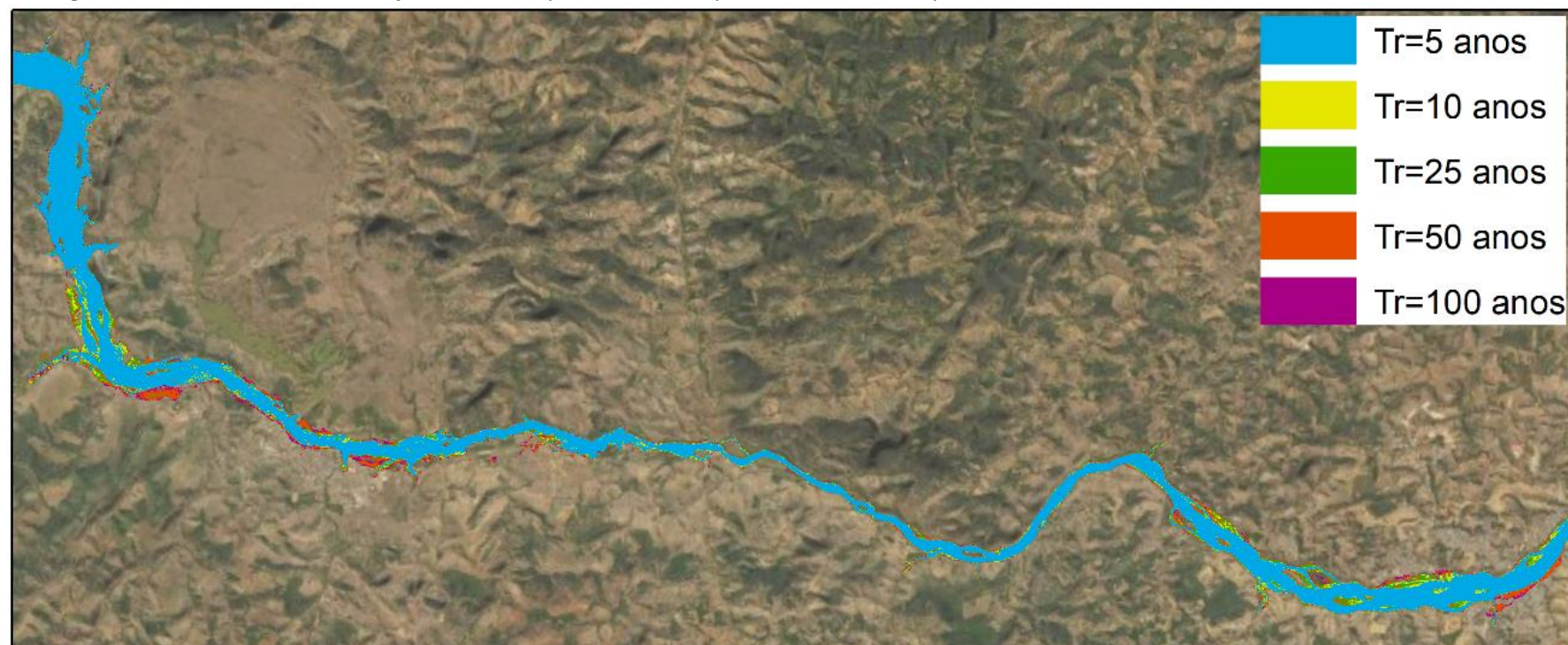
Fonte: Lactec (2020).

Figura 167 – Níveis d'água simulados para diferentes períodos de retorno no município de Governador Valadares.



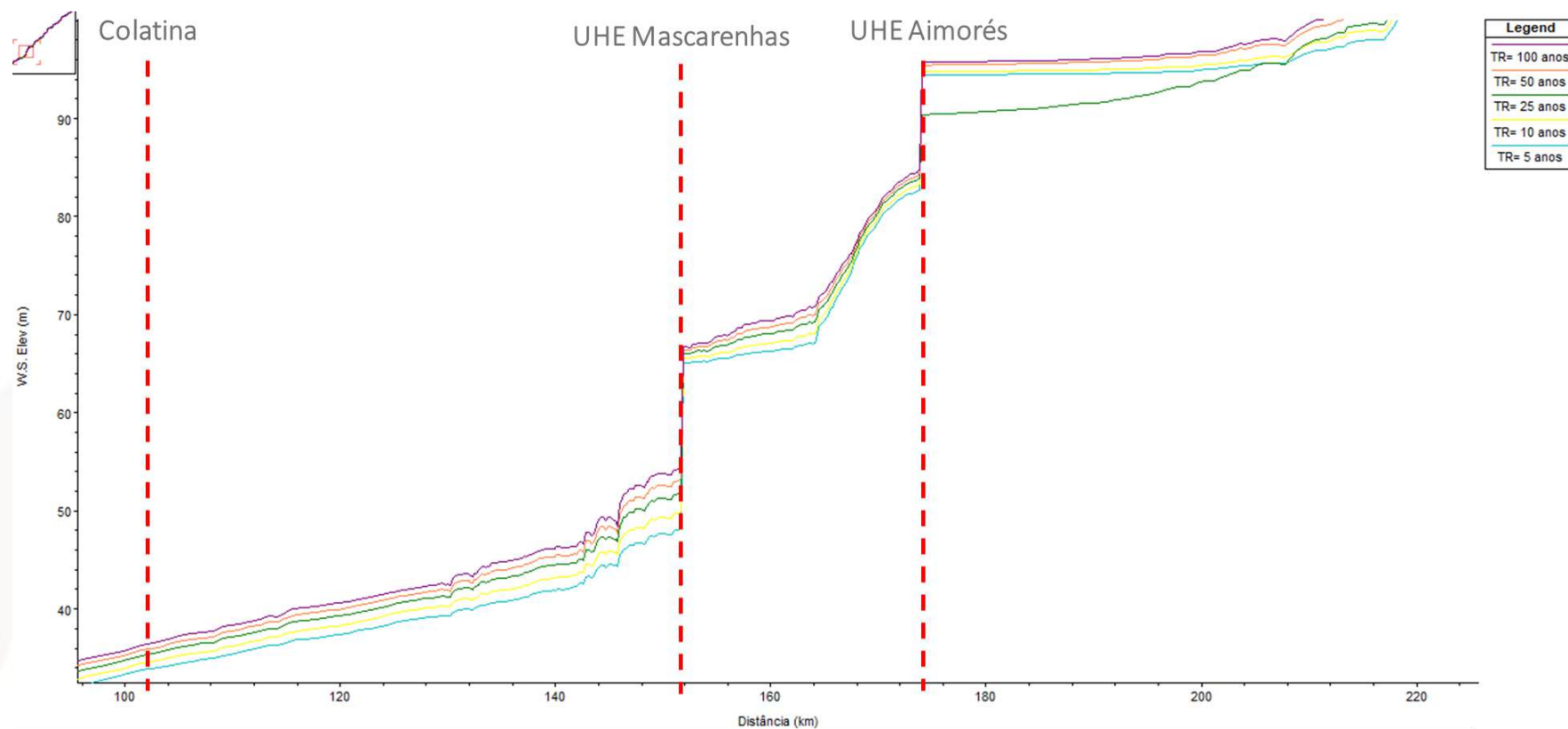
Fonte: Lactec (2020).

Figura 168 – Manchas de inundação simuladas para diferentes períodos de retorno para o trecho localizado entre a UHE Aimorés e Colatina.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 169 – Níveis d'água simulados para diferentes períodos de retorno para o trecho localizado entre a UHE Aimorés e Colatina.

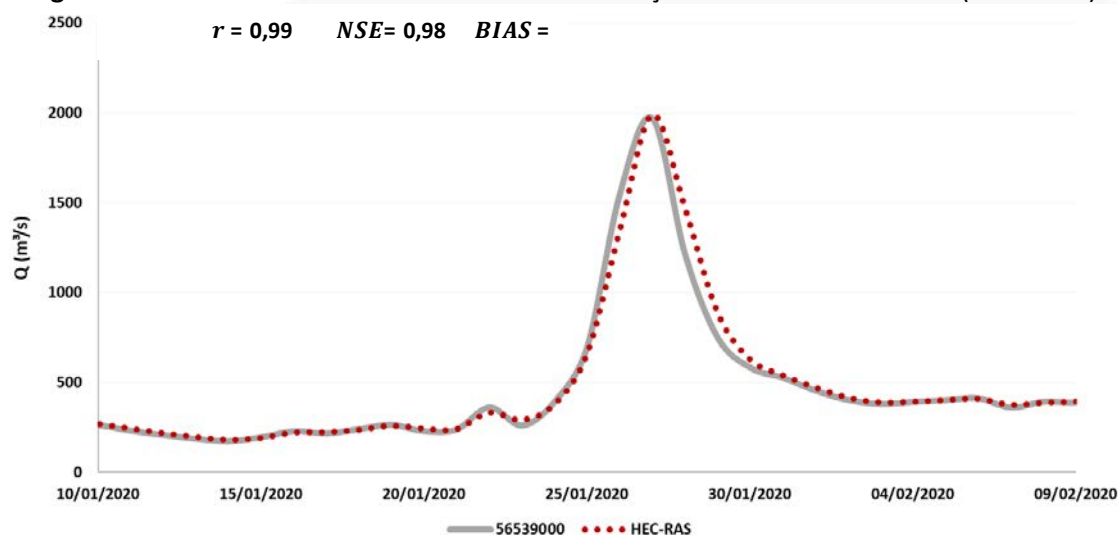


Fonte: Lactec (2020).

Cheia de 2020: Hidrogramas

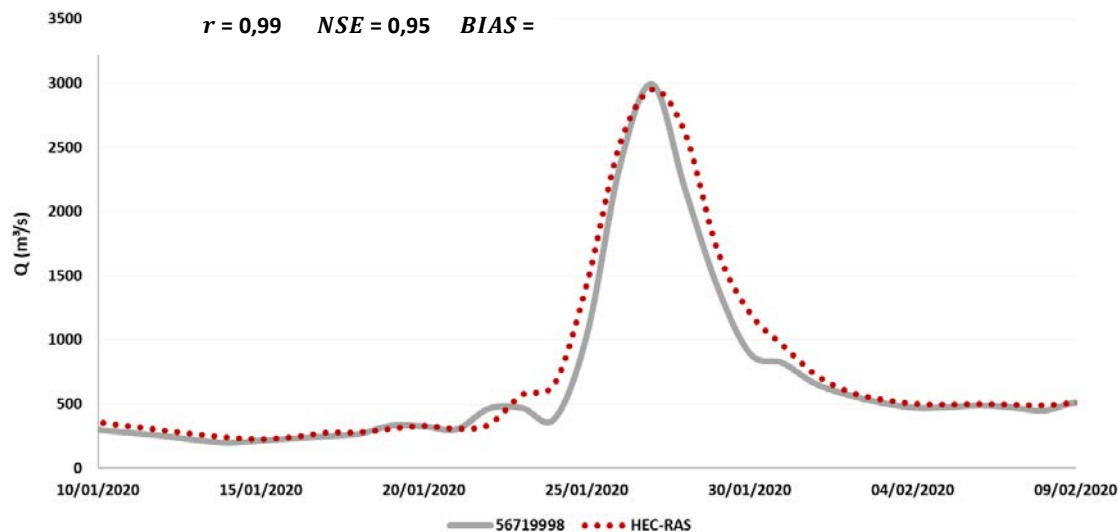
As figuras a seguir apresentam a comparação das vazões observadas e simuladas em diversas estações ao longo do rio Doce, com as métricas de desempenho de cada uma delas.

Figura 170 – Vazões observadas e simuladas na estação Cachoeira dos Óculos (56359000).



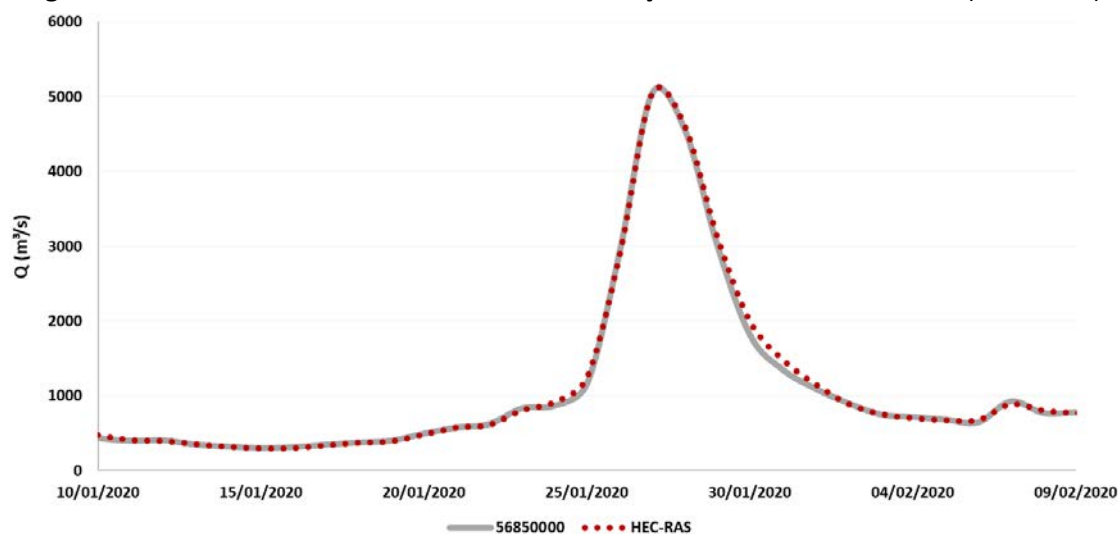
Fonte: Lactec (2020).

Figura 171 – Vazões observadas e simuladas na estação Belo Oriente (56719998).



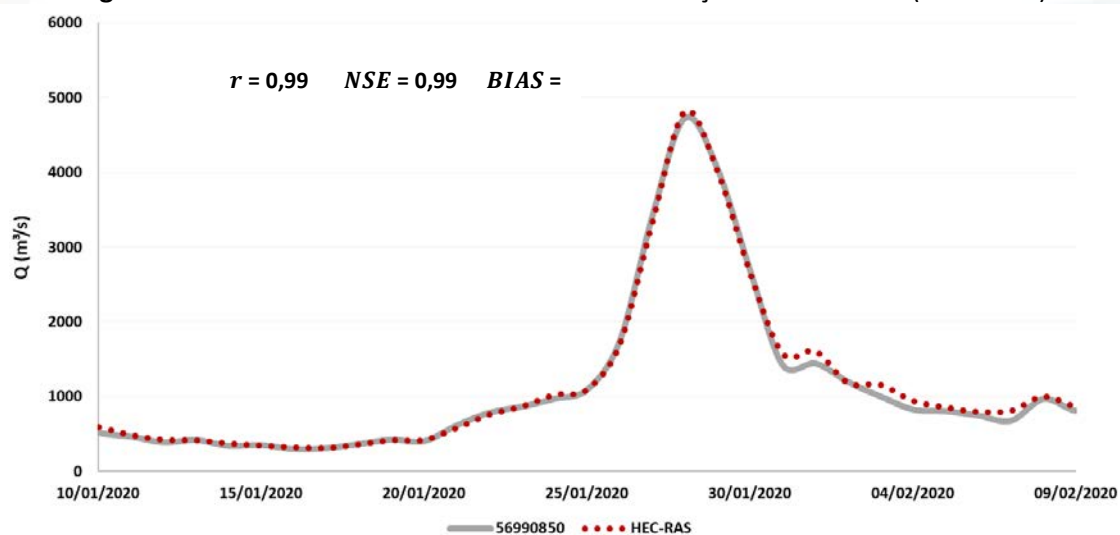
Fonte: Lactec (2020).

Figura 172 – Vazões observadas e simuladas na estação Governador Valadares (56850000).

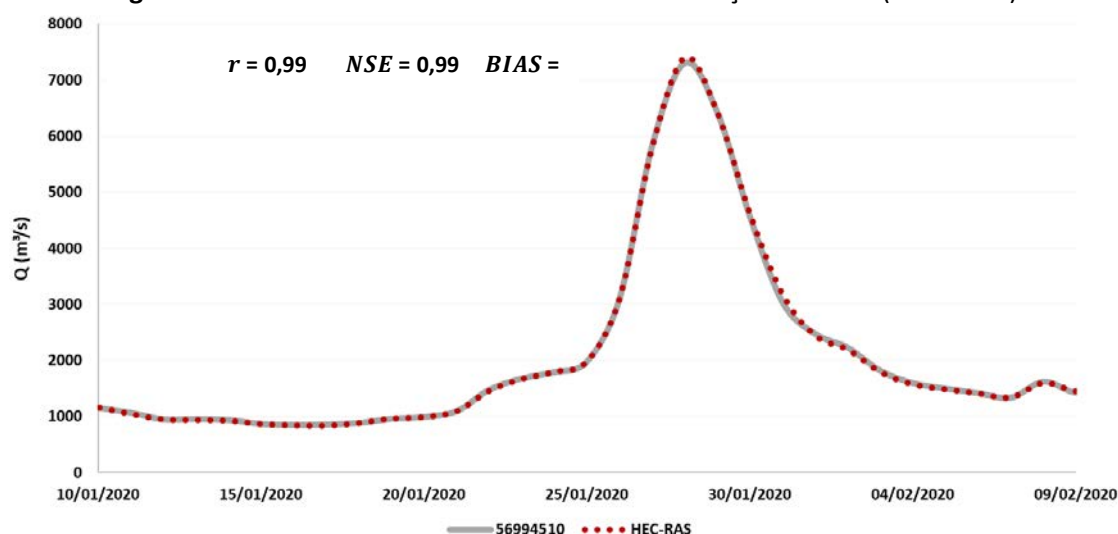


Fonte: Lactec (2020).

Figura 173 – Vazões observadas e simuladas na estação UHE Aimorés (56990850).



Fonte: Lactec (2020).

Figura 174 – Vazões observadas e simuladas na estação Colatina (56994510).

Fonte: Lactec (2020).

Os resultados mostram que houve uma elevada concordância entre as vazões observadas e simuladas com valores de r e NSE próximos da unidade e valores de $BIAS$ inferiores a 3%. Os piores resultados foram encontrados para a estação Belo Oriente, com NSE de 0,95 e $BIAS$ de 11,23%, mas ainda assim são valores que demonstram elevada concordância entre os dados observados e simulados.

Percebe-se que a metodologia adotada para estimar as condições de contorno foi adequada, possibilitando representar bem os picos de vazão nas diversas estações. Isso também evidencia um comportamento das áreas incrementais adjacentes ao rio Doce, que demonstram baixa contribuição para as vazões que chegam no rio principal nas grandes cheias. Também são regiões planas, em alguns locais com lagoas, como na região do Parque Estadual do Rio Doce, o que possivelmente se tornam importantes áreas de armazenamento e fontes de água nos períodos de baixas vazões.

Cheia de 2020: Cotagramas

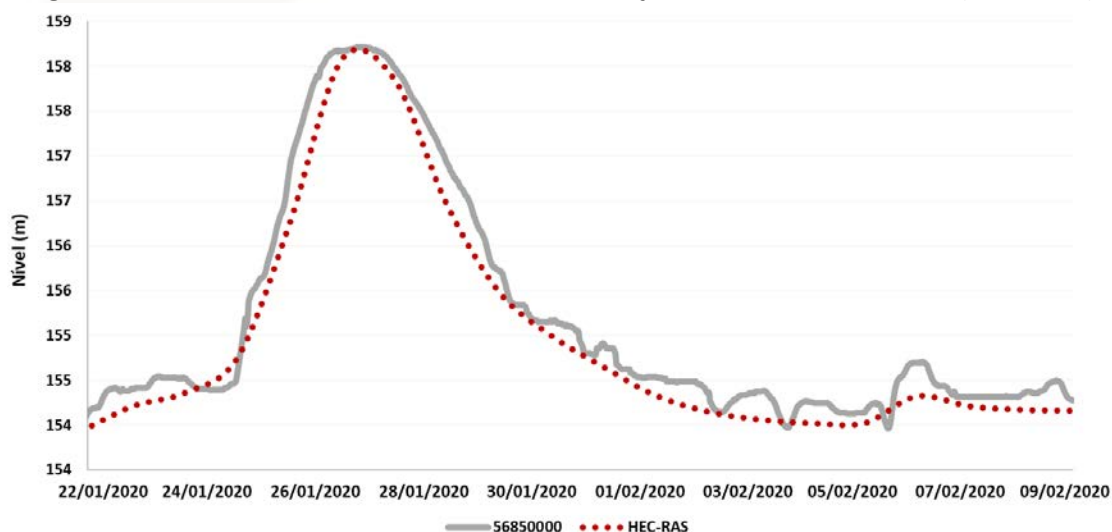
As figuras a seguir apresentam a comparação dos níveis observados e simulados nas estações Governador Valadares e Colatina. As estações de Cachoeira dos Óculos e da UHE Aimorés não tinham dados observados de nível e a estação Belo Oriente apresentou dados incompatíveis com o zero da régua apresentado em estudos anteriores.

Os valores de NSE para as estações Governador Valadares e Colatina foram, respectivamente, de 0,97 e 0,95. Quanto ao erro no pico, esse valor foi -0,06m e 0,27m, para Governador Valadares e Colatina, respectivamente. O RMSE de toda a série foi de 0,24m e 0,38m, respectivamente.

No geral, a aderência dos dados simulados aos dados observados é elevada, especialmente para os níveis mais elevados. É importante destacar que devido às incertezas das informações observadas (por exemplo, marcas de enchente) do Modelo Digital do Terreno/MDT (que apesar de ter das incertezas serem muito

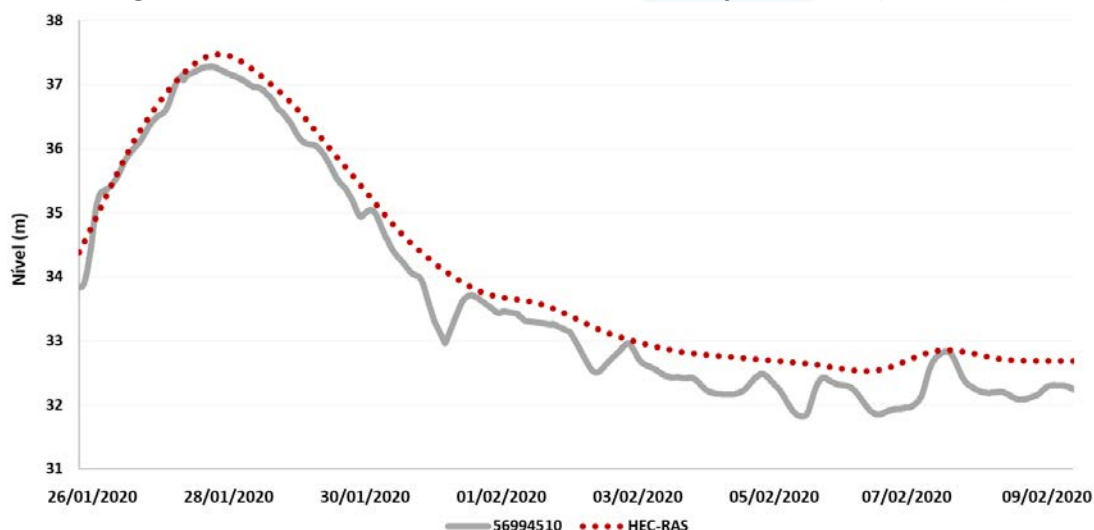
pequenas ainda existem), de simplificações necessárias no processo de modelagem e principalmente de limitações na estimativa da batimetria de leito do trecho simulado (pequena quantidade de seções batimétricas levantadas em campo) e das incertezas nas extrapolações das curvas chaves é difícil de se obter estimativas extremamente acuradas tanto para a vazão como para os níveis. No presente relatório foi aplicado as melhores técnicas para contornar estas incertezas e melhor representar a natureza. Desta maneira obtivemos os ajustes elevados para ambas as variáveis, mas que são ainda melhores para as vazões, que foram as informações de referência para a entrada no modelo (condições de contorno).

Figura 175 – Níveis observados e simulados na estação Governador Valadares (56850000).



Fonte: Lactec (2020).

Figura 176 – Níveis observados e simulados na estação Colatina (56994510).



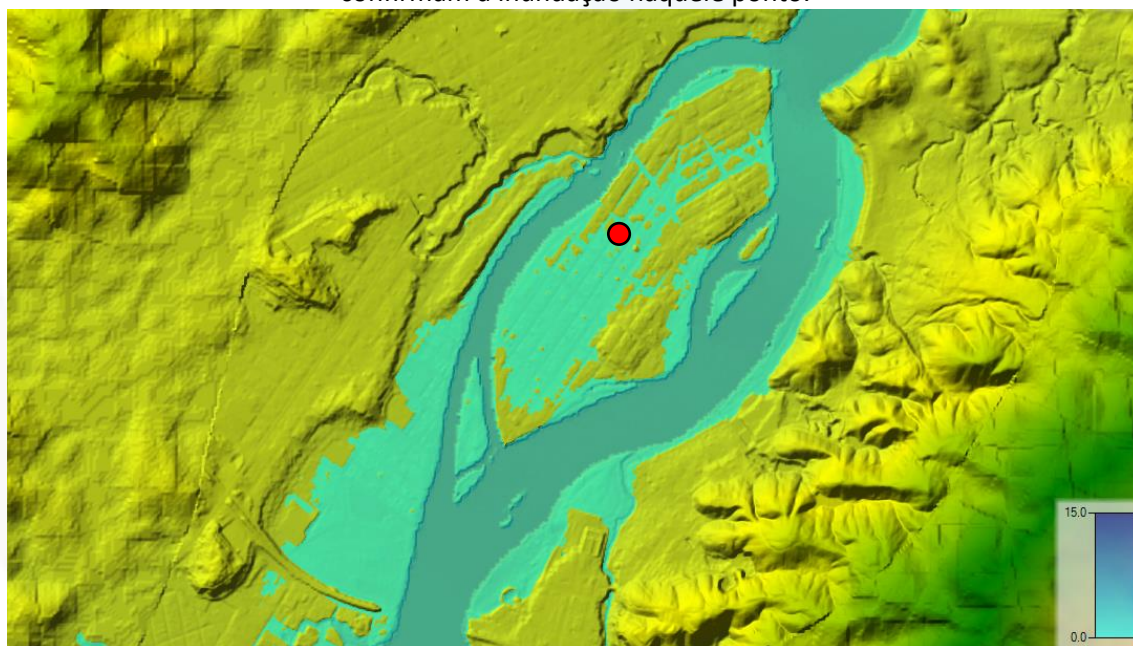
Fonte: Lactec (2020).

Manchas de inundação

Na Figura 177, Figura 178 e Figura 179 são apresentadas as manchas de inundação máxima simuladas com o modelo HEC-RAS 1D para os municípios de Governador Valadares, Aimorés e Colatina. Percebe-se que o município de Governador Valadares foi o que teve mais regiões urbanas inundadas com a cheia, o que também pode ser visto a partir de registros realizados e disponibilizados em canais de comunicação na internet (ver vídeo de sobrevoó em <https://www.otempo.com.br/cidades/video-mostra-diversos-bairros-de-governador-valadares-alagados-1.2289802> e registro na Ilha no ponto destacado na Figura 177 em https://www.youtube.com/watch?v=ImL9_W9BMuw). Registros em Aimorés um dia antes do pico da cheia também foram realizados e disponibilizados em mídias digitais (ver <https://www.youtube.com/watch?v=uxtsTtuRTjk>). Em Colatina, a inundação foi menos intensa do que em Governador Valadares e registros no dia 28 de janeiro de 2020, em que ocorreu o pico da cheia no município, podem ser vistos em <https://www.agazeta.com.br/es/norte/chuva-no-es-drone-registra-em-video-a-inundacao-em-colatina-0120>. Os registros mencionados indicam que o modelo foi capaz de simular de forma adequada as áreas inundadas pela cheia do rio Doce em 2020.

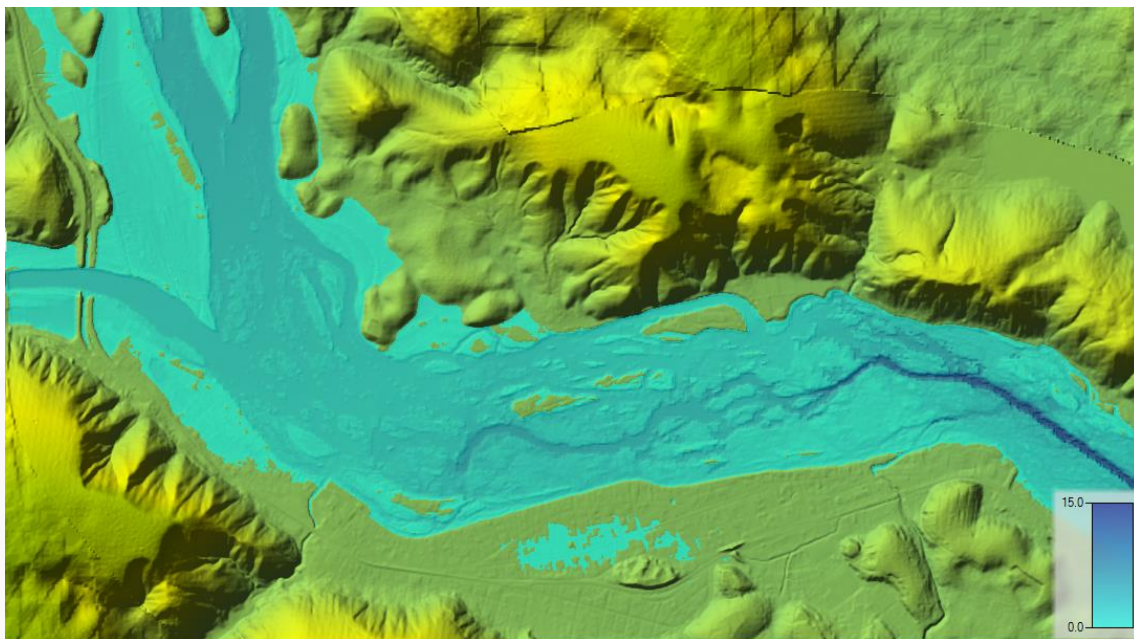
Análises comparativas também foram realizadas utilizando imagens da empresa Planet (planet.com) para os dias 29 de janeiro de 2020 em Aimorés (um dia após o pico da cheia) e 28 de janeiro de 2020 em Colatina (coincidente com o pico da cheia). Os resultados das comparações são apresentados na Figura 180 e Figura 181. Apesar de muitas nuvens, é possível identificar diversas regiões em que tanto a imagem como a mancha simulada indicam a ocorrência da inundação.

Figura 177 – Mancha de inundação máxima simulada com o modelo HEC-RAS 1D para o município de Governador Valadares. O ponto vermelho indica a localização de registros realizados in-situ que confirmam a inundação naquele ponto.



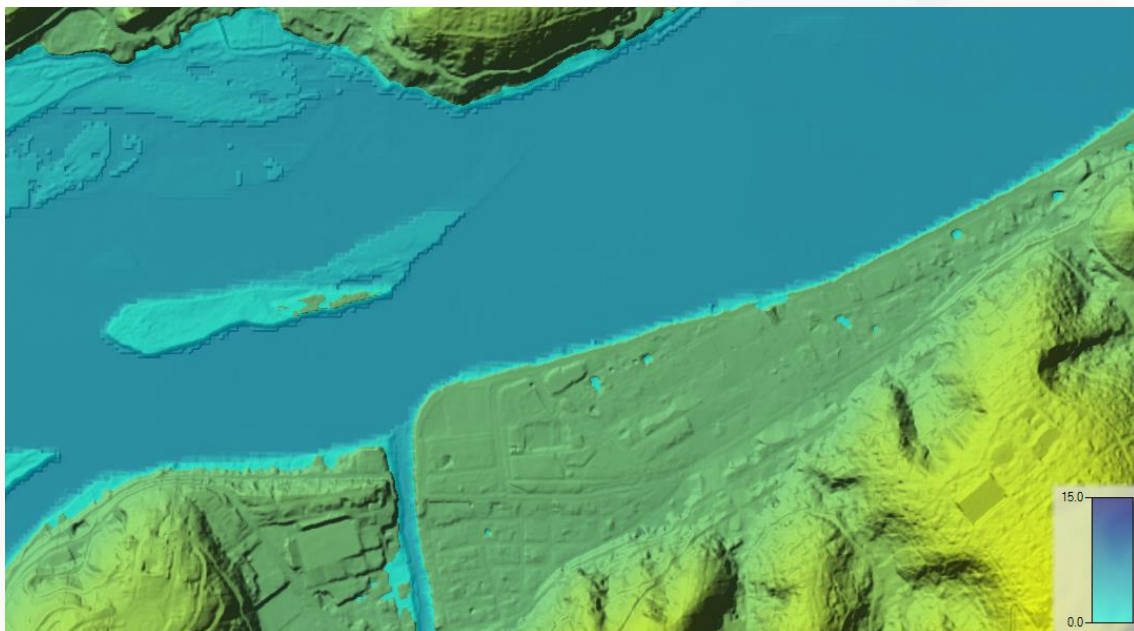
Fonte: Lactec (2020).

Figura 178 – Mancha de inundação máxima simulada com o modelo HEC-RAS 1D para o município de Aimorés.



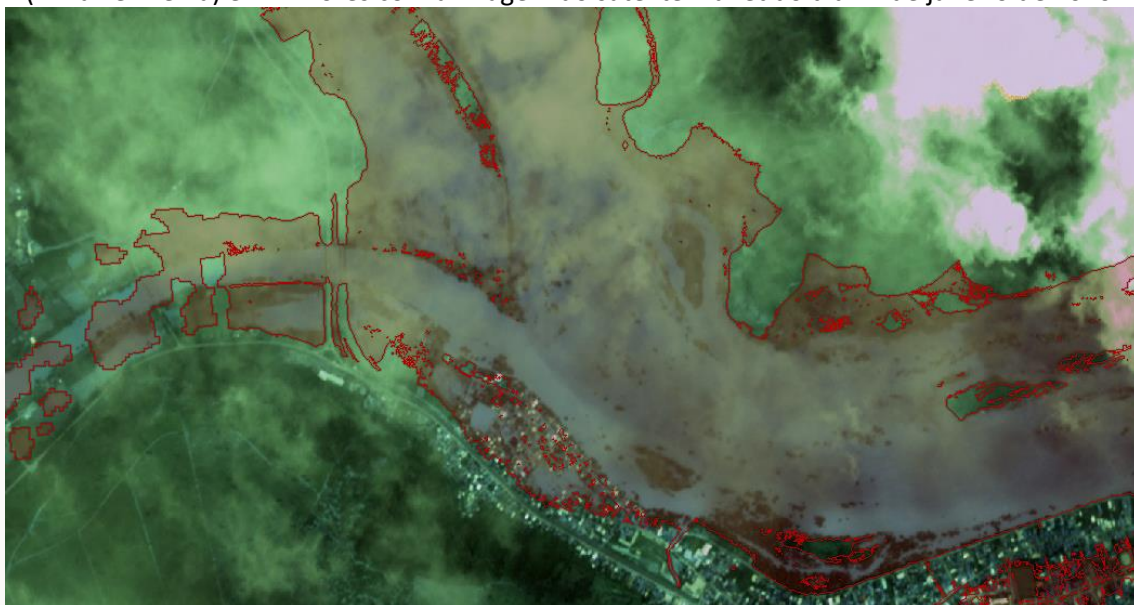
Fonte: Lactec (2020).

Figura 179 – Mancha de inundação máxima simulada com o modelo HEC-RAS 1D para o município de Colatina.



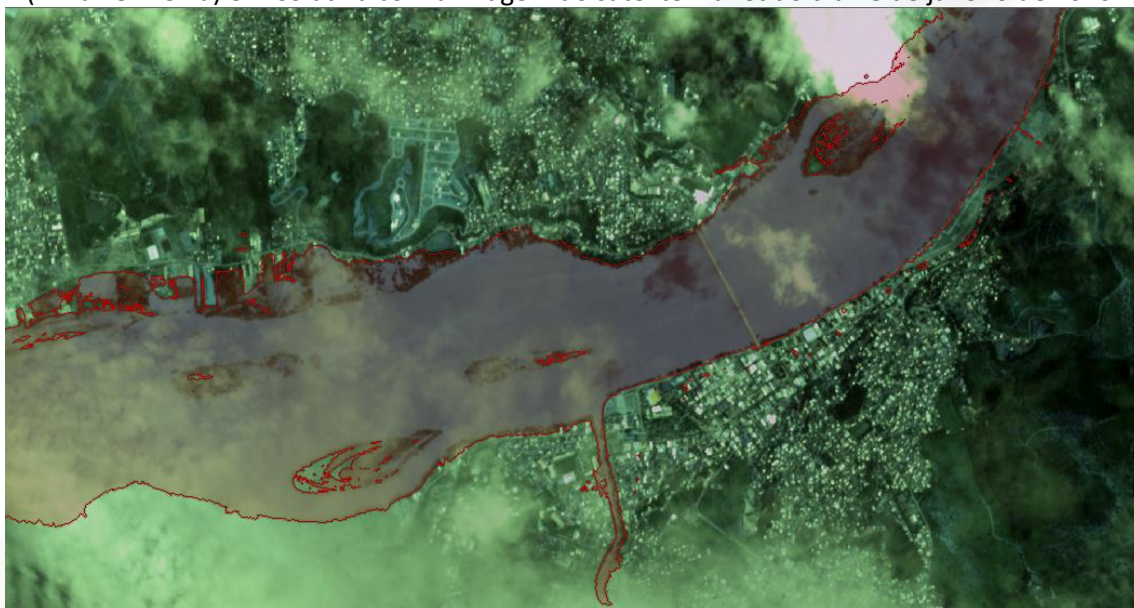
Fonte: Lactec (2020).

Figura 180 – Comparação da mancha de inundação máxima simulada com o modelo HEC-RAS 1D (linha vermelha) em Aimorés com a imagem do satélite Planet do dia 27 de janeiro de 2020.



Fonte: planet.com.

Figura 181 – Comparação da mancha de inundação máxima simulada com o modelo HEC-RAS 1D (linha vermelha) em Colatina com a imagem do satélite Planet do dia 28 de janeiro de 2020.



Fonte: planet.com.

Validação com marcas de cheia de levantamento de campo

Os resultados dos modelos hidrodinâmicos foram comparados com medições em campo de marcas da cheia de 2020 ao longo do rio Doce. Apresenta os valores dos níveis simulados e observados, do erro absoluto (simulado – observado) e se o local coincide de estar inundado pela mancha de inundação simulada. Em 46, dos 57 pontos analisados, houve concordâncias de ser um local em que houve inundação tanto pelo modelo como pelos dados levantados em campo. Assim, em apenas 11 pontos o modelo subestimou os valores observados indicando que não houve inundação pela mancha de inundação simulada. O RMSE calculado entre os dados observados e simulados para os 46 pontos foi de 0,64m.

A análise do box plot apresentado na Figura 182 mostra que o percentil 25 foi de -0,74m, a mediana foi de -0,50m e o percentil 75 de 0,38, isto mostra que os resultados de maneira geral estão subtimados na cota. As incertezas podem estar associadas aos métodos de levantamento dos pontos em campo; do Modelo Digital de Terreno de alta resolução; da incerteza na extrapolação das curvas chaves e principalmente pela falta de seções topobatemétricas levantadas em campo em regiões com características particulares, necessárias para melhor representação dos fluxos de água. Além disso, muitos pontos foram levantados na região de Governador Valadares, que conforme já demonstrados, apresentaram tendência de subestimativas dos valores observados.

A localização dos pontos analisados e os erros calculados apresentados são ilustrados da Figura 183 a Figura 186.

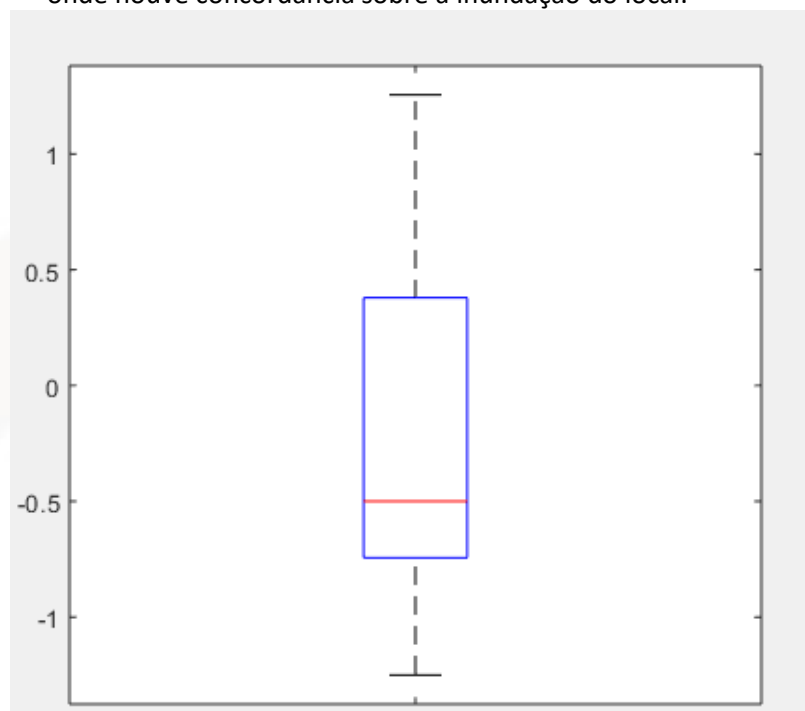
Tabela 88 – Comparação dos níveis observados levantados em campo com as simulações hidrodinâmicas 1D e 2D. O erro corresponde aos valores simulados – observados. Os valores nas células em cinza correspondem àqueles estimados com o modelo 2D e os demais correspondem ao modelo 1D. O ponto observado foi considerado inundado quando este se encontrava dentro da mancha de inundação simulada.

Lat.	Long	Nível Observado	Nível Simulado	Erro (m)	Inundado?	Distância (m) até a mancha simulada
-20.208	-42.851	283.403	283.000	-0.403	Sim	-
-20.108	-42.755	270.501	271.680	1.179	Sim	-
-20.014	-42.745	262.715	262.910	0.195	Sim	-
-19.902	-42.586	252.972	252.310	-0.662	Sim	-
-19.749	-42.478	235.035	234.900	-0.135	Sim	-
-19.477	-42.476	213.037	214.293	1.256	Sim	-
-19.321	-42.365	198.915	198.440	-0.475	Sim	-
-19.232	-42.328	195.121	193.870	-1.251	Sim	-
-19.096	-42.155	188.439	189.003	0.564	Sim	-
-19.095	-42.155	187.938	189.015	1.077	Sim	-
-18.915	-41.996	162.526	161.604	-0.922	Sim	-
-18.914	-41.996	162.488	161.646	-0.842	Sim	-
-18.914	-41.996	162.457	161.590	-0.867	Não	4.80
-18.913	-41.996	162.420	161.886	-0.534	Sim	-
-18.913	-41.996	162.388	161.562	-0.826	Sim	-
-18.913	-41.996	162.378	161.731	-0.647	Sim	-

Lat.	Long	Nível Observado	Nível Simulado	Erro (m)	Inundado?	Distância (m) até a mancha simulada
-18.912	-41.996	162.338	161.813	-0.525	Sim	-
-18.913	-41.994	162.295	161.524	-0.771	Sim	-
-18.913	-41.994	162.238	161.526	-0.712	Sim	-
-18.913	-41.994	160.400	161.816	1.416	Sim	-
-18.895	-41.970	159.800	159.678	-0.122	Sim	-
-18.892	-41.972	159.685	159.682	-0.003	Sim	-
-18.893	-41.972	159.658	159.676	0.018	Sim	-
-18.892	-41.972	159.657	159.637	-0.020	Sim	-
-18.895	-41.970	159.375	159.692	0.317	Sim	-
-18.883	-41.951	157.885	158.098	0.213	Sim	-
-18.883	-41.951	157.194	158.089	0.895	Sim	-
-18.864	-41.940	156.267	155.311	-0.956	Não	85.94
-18.863	-41.941	156.259	155.311	-0.948	Não	83.13
-18.862	-41.940	156.257	155.648	-0.609	Sim	-
-18.862	-41.940	156.041	155.440	-0.601	Não	2.25
-18.860	-41.939	155.675	155.016	-0.659	Sim	-
-18.860	-41.939	155.587	154.960	-0.627	Sim	-
-18.851	-41.935	154.867	154.010	-0.857	Não	0.36
-18.850	-41.934	154.855	154.031	-0.824	Sim	-
-18.848	-41.935	154.573	153.935	-0.638	Sim	-
-18.847	-41.931	154.015	153.773	-0.242	Sim	-
-18.843	-41.928	153.616	153.642	0.026	Sim	-
-18.843	-41.929	153.549	153.472	-0.077	Sim	-
-18.864	-41.807	142.954	142.951	-0.003	Sim	-
-18.975	-41.642	137.520	133.370	-4.150	Não	2.05
-18.975	-41.642	135.772	133.390	-2.382	Não	1.15
-18.975	-41.642	135.727	133.320	-2.407	Não	2.88
-19.064	-41.529	123.663	124.400	0.737	Sim	-
-19.163	-41.469	119.860	116.080	-3.780	Não	39.73
-19.163	-41.469	119.362	116.090	-3.272	Não	3.88
-19.163	-41.470	119.357	116.095	-3.262	Não	53.75
-19.328	-41.253	92.039	93.170	1.131	Sim	-
-19.484	-41.096	80.677	80.800	0.123	Sim	-
-19.505	-41.013	64.515	65.042	0.527	Sim	-
-19.505	-41.013	64.474	65.030	0.556	Sim	-
-19.535	-40.636	37.720	37.634	-0.086	Sim	-
-19.535	-40.635	37.612	37.636	0.024	Sim	-
-19.473	-40.224	23.984	23.840*	-0.144	Sim	-
-19.406	-40.067	18.094	18.080*	-0.014	Sim	-
-19.481	-39.926	11.344	11.200*	-0.144	Sim	-
-19.563	-39.852	7.010	6.570*	-0.440	Sim	-

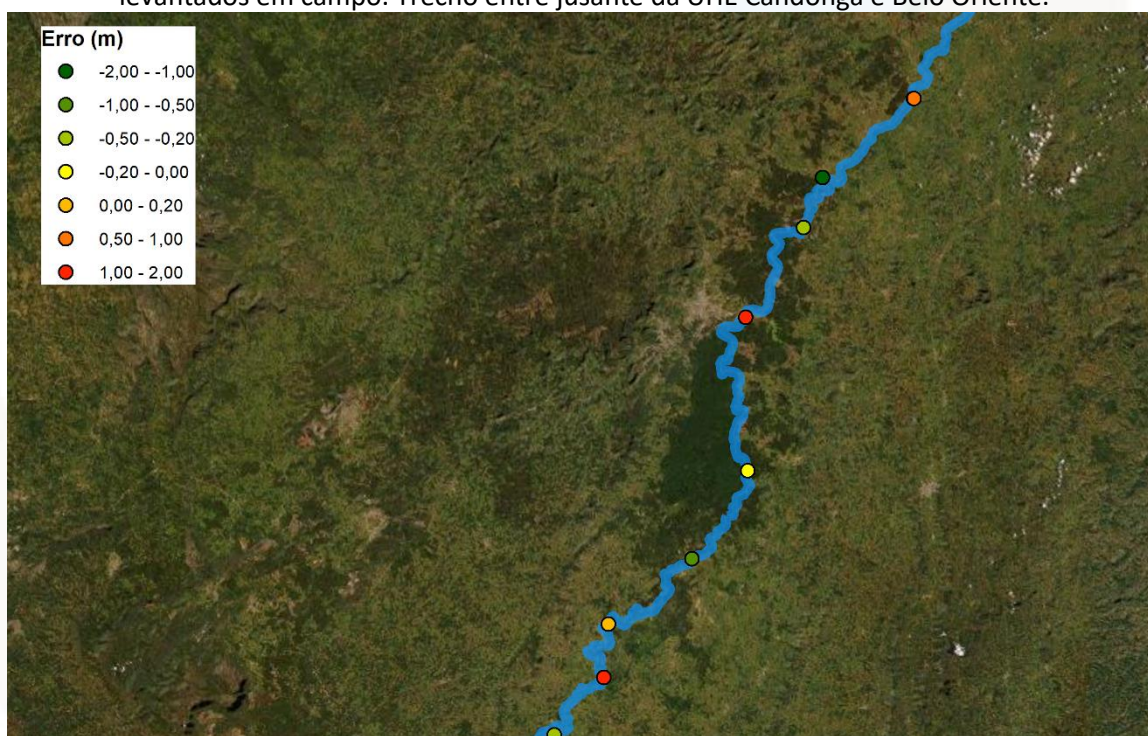
* Pontos com valores obtidos com modelo hidrodinâmico 2D (ver APÊNDICE B)

Figura 182 – Análise de box plot do erro (simulado – observado) entre os níveis para os 46 pontos onde houve concordância sobre a inundação do local.



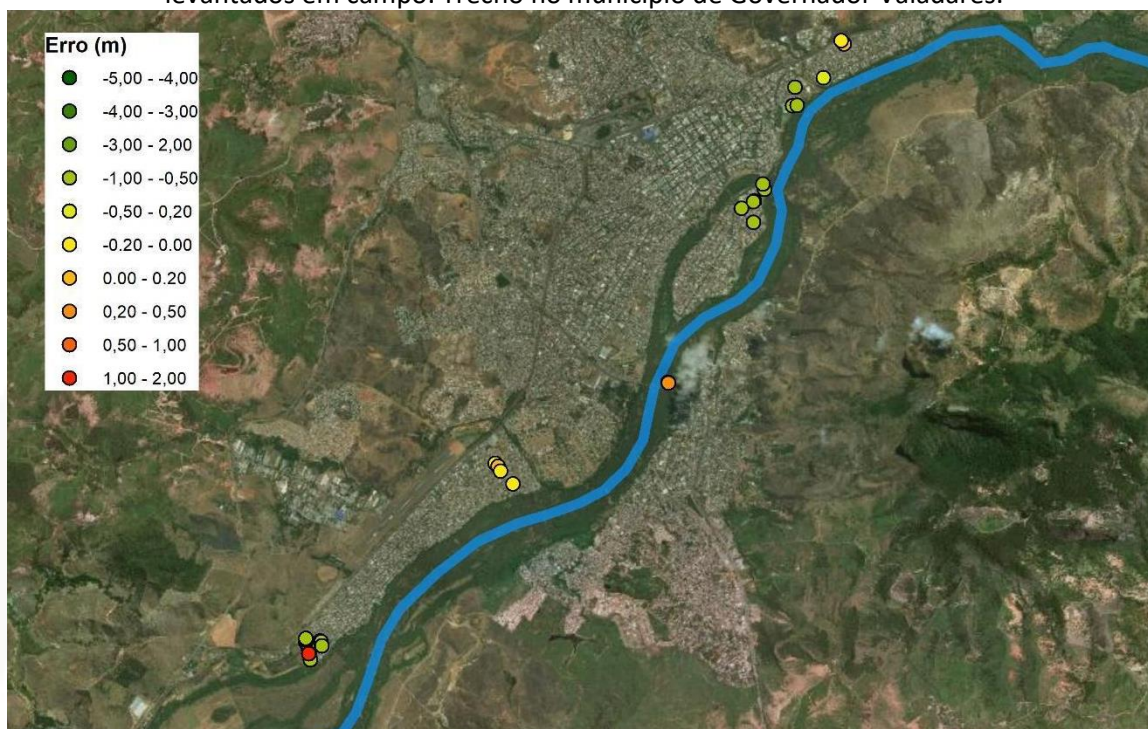
Fonte: Lactec (2020).

Figura 183 – Localização dos pontos e erro da comparação entre os níveis simulados e valores levantados em campo. Trecho entre jusante da UHE Candonga e Belo Oriente.



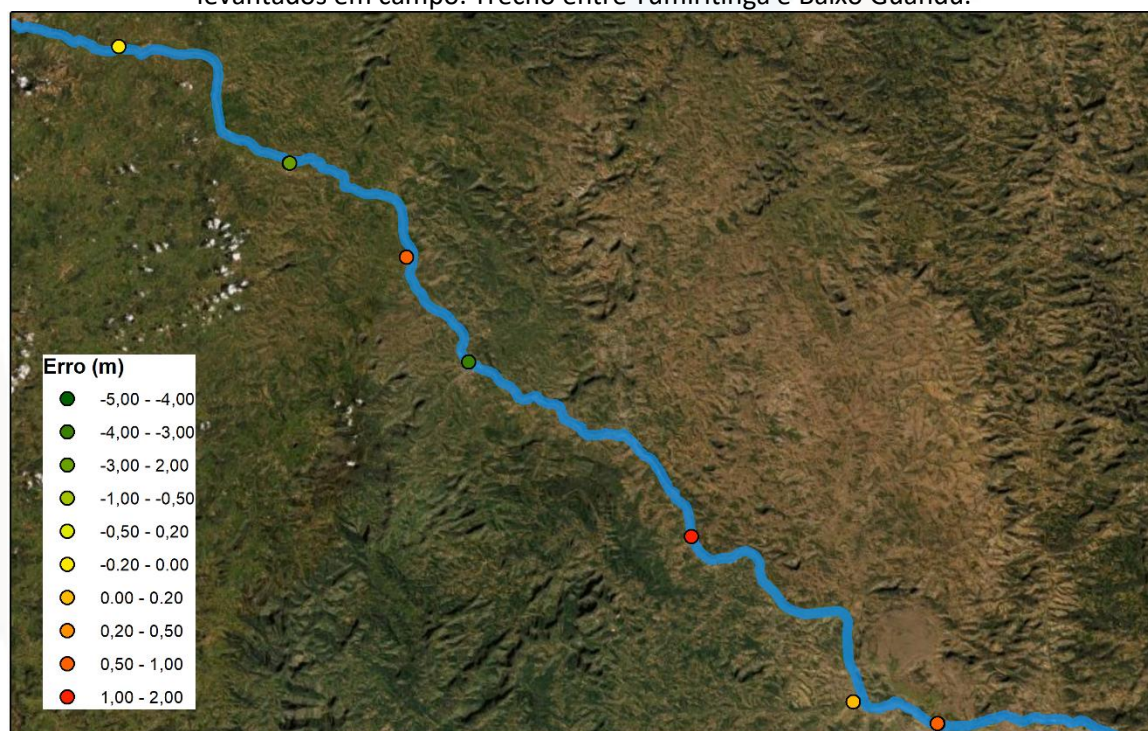
Fonte: Lactec (2020).

Figura 184 – Localização dos pontos e erro da comparação entre os níveis simulados e valores levantados em campo. Trecho no município de Governador Valadares.



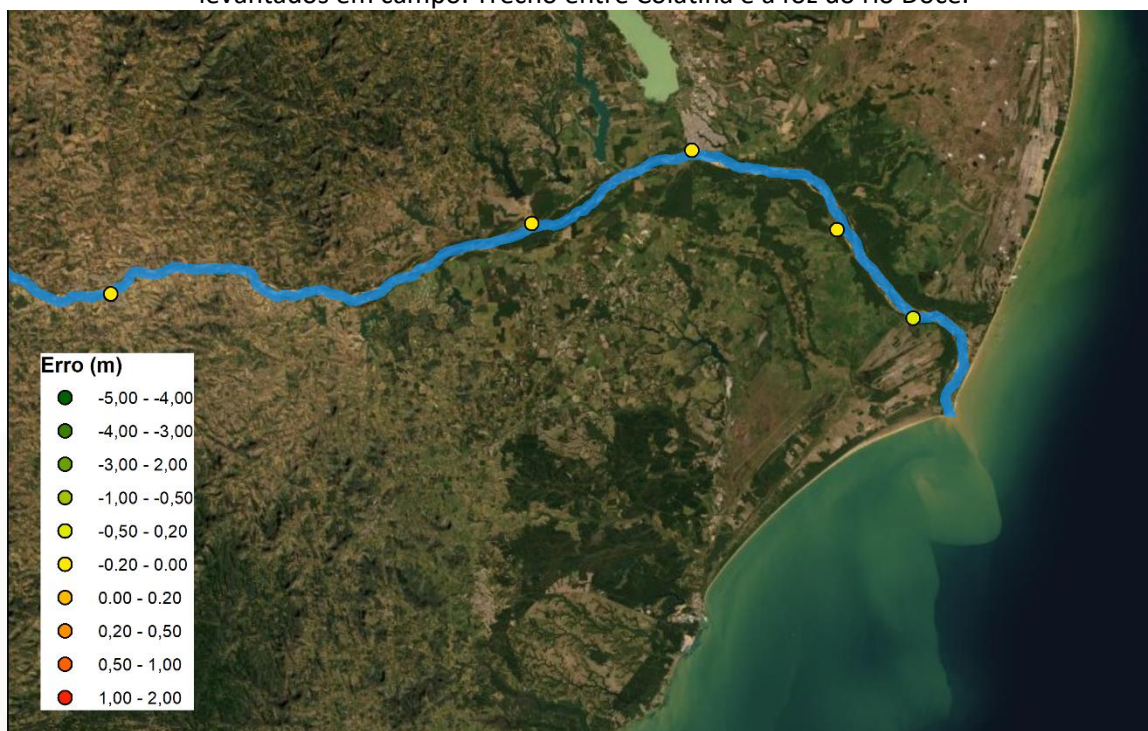
Fonte: Lactec (2020).

Figura 185 – Localização dos pontos e erro da comparação entre os níveis simulados e valores levantados em campo. Trecho entre Tumiritinga e Baixo Guandu.



Fonte: Lactec (2020).

Figura 186 – Localização dos pontos e erro da comparação entre os níveis simulados e valores levantados em campo. Trecho entre Colatina e a foz do rio Doce.



Fonte: Lactec (2020).

CONCLUSÕES

A análise das frequências das vazões extremas mostrou que a distribuição de Gumbel é a que melhor descreve as frequências das vazões máximas diárias observadas nas estações localizadas na calha do Rio Doce e pode ser usada para estimar as vazões máximas prováveis de ocorrer em função do período de retorno.

A simulação com o modelo na versão 1D com a inclusão de estruturas inline permitiu representar de forma mais adequada os espelhos d'água dos reservatórios. Já as simulações com diferentes períodos de retorno permitiram observar que cidades com histórico de inundações em grandes cheias como Governador Valadares, Aimorés e Colatina são mais afetadas para cheias com períodos de retorno acima de 50 anos.

As vazões máximas estimadas para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, variaram de 1.057,9 m³/s a 2.062,2 m³/s na estação de Rio Dantas; de 1.140,8 m³/s a 2.235,5 m³/s na estação de Cachoeira dos Óculos; de 2.172,0 m³/s a 4.190,8 m³/s na estação de Belo Oriente; de 3.457,6 m³/s a 6.435,3 m³/s na estação de Governador Valadares; de 4.041,6 m³/s a 7.524,6 m³/s na estação de Tumiritinga e de 6.071,2 m³/s a 12.121,6 m³/s na estação de Colatina, para os períodos de retorno de 5 anos e 100 anos respectivamente.

As estimativas via simulação hidrodinâmica foram representativas das vazões, níveis e manchas de inundação da cheia ocorrida no rio Doce em 2020, dadas as incertezas existentes nos dados de entrada (principalmente devido a pequena quantidade de seções batimétricas) e no processo de modelagem (normais em uma modelagem).

O modelo hidrodinâmico representou as vazões de pico, com NSE variando entre 0,95 e 0,99 e BIAS variando entre 0,23 e 11,23.

Assim, como registros e imagens de satélite, o modelo mostrou que a inundação foi mais significativa em Governador Valadares do que em Colatina. Os erros dos níveis no dia da máxima inundação foi de -0,06 m e 0,27 m em Governador Valadares e Colatina, respectivamente, a partir das séries.

O RMSE dos níveis d'água, calculado entre os dados levantados em campo a partir de marcas da cheia de 2020 e aqueles simulados com os modelos 1D (e 2D, trecho de Linhares) foi de 0,64m e houve tendência de subestimativas dos valores simulados em relação aos observados.

REFERÊNCIAS

- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO). **Dados de operação dos reservatórios SIN**. 2020. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- CHAKRAVARTI, I. M.; LAHA, R. G.; ROY, J. **Handbook of Methods of Applied Statistics**. vol. I. New York: John Wiley and Sons, 1967.
- CPRM (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL). **SACE (Sistema de Alerta de Eventos Críticos)**. 2020. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/sace/index_manchas_inundacao.php>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- FUNDAÇÃO RENOVA. Modelo digital de terreno obtida de dados oriundos de perfilamento aéreo a laser executado no período entre 30/11/2018 e 19/06/2019 pela empresa Fototerra. 2019
- GOLIVER, L. **Chuva no ES: drone registra em vídeo a inundação em Colatina**. 2020. Disponível em: <<https://www.agazeta.com.br/es/norte/chuva-no-es-drone-registra-em-video-a-inundacao-em-colatina-0120>>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- GUMBEL, E. J. On the frequency distribution of extremes values in meteorological data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 23, n. 3, p. 95-105, 1942.
- GUMBEL, E. J. **Statistics of extremes**. New York: Columbia University Press, 1958.
- Instituto Estadual de Meio ambiente e recursos hídricos do estado do Espírito Santo (IEMA). Dados topográficos de um levantamento realizado por "Hiparc Geotecnologia", entre os anos de 2012 a 2015. Disponível em: <http://geobases.static.es.gov.br/MAP_ES_2012_2015/MAP_ES_2012_2015_MDT_URL_LIST.txt>.
- MACHADO, J. **Cheia do Rio Doce em Aimores MG**. 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=uxtsTtuRTjk>>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- O TEMPO. **Vídeo mostra diversos bairros de Governador Valadares alagados**. 2020. Disponível em: <<https://www.otempo.com.br/cidades/video-mostra-diversos-bairros-de-governador-valadares-alagados-1.2289802>>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- PARAPENTE FLORIPA. **Enchente em Governador Valadares MG, janeiro 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=lmL9_W9BMuw>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- PLANET. **Planet**. 2020. Disponível em: <<https://www.planet.com/>>. Acesso em: 11 dez. 2020.
- USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS). **HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System)**. 2019. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>>. Acesso em: 11 dez. 2020.

ANEXO DO DOCUMENTO SUPLEMENTAR
ESTIMATIVA DE VAZÕES MÁXIMAS

Tabela 1 - Detalhamento da estimativa das vazões máximas prováveis, pela distribuição de Gumbel na estação: 54245000 – Rio Dantas.

Qmax	ordem	Fobs	Tr	YN	VR=Y	FtGum	Dif	Dif^2
1862	1	0,0294	34	3,5115	3,9831	0,0185	0,0110	0,0001
1855	2	0,0588	17	2,8031	3,9604	0,0189	0,0399	0,0016
1200	3	0,0882	11	2,3819	1,9374	0,1342	0,0459	0,0021
1166	4	0,1176	9	2,0781	1,8325	0,1479	0,0302	0,0009
1025	5	0,1471	7	1,8384	1,3977	0,2190	0,0719	0,0052
1019	6	0,1765	6	1,6391	1,3796	0,2225	0,0460	0,0021
939	7	0,2059	5	1,4674	1,1316	0,2757	0,0698	0,0049
932	8	0,2353	4	1,3158	1,1103	0,2807	0,0454	0,0021
880	9	0,2647	4	1,1793	0,9507	0,3205	0,0558	0,0031
864	10	0,2941	3	1,0547	0,8999	0,3341	0,0400	0,0016
758	11	0,3235	3	0,9394	0,5751	0,4303	0,1068	0,0114
736	12	0,3529	3	0,8317	0,5057	0,4529	0,0999	0,0100
716	13	0,3824	3	0,7301	0,4436	0,4736	0,0913	0,0083
688	14	0,4118	2	0,6337	0,3579	0,5030	0,0912	0,0083
677	15	0,4412	2	0,5414	0,3253	0,5144	0,0732	0,0054
651	16	0,4706	2	0,4526	0,2432	0,5435	0,0729	0,0053
643	17	0,5000	2	0,3665	0,2205	0,5516	0,0516	0,0027
641	18	0,5294	2	0,2827	0,2130	0,5543	0,0249	0,0006
641	19	0,5588	2	0,2005	0,2130	0,5543	0,0045	0,0000
586	20	0,5882	2	0,1196	0,0429	0,6163	0,0281	0,0008
567	21	0,6176	2	0,0394	-0,0149	0,6376	0,0199	0,0004
567	22	0,6471	2	-0,0406	-0,0158	0,6379	0,0091	0,0001
546	23	0,6765	1	-0,1209	-0,0818	0,6622	0,0143	0,0002
528	24	0,7059	1	-0,2019	-0,1364	0,6821	0,0237	0,0006
525	25	0,7353	1	-0,2845	-0,1445	0,6851	0,0502	0,0025
521	26	0,7647	1	-0,3694	-0,1561	0,6893	0,0754	0,0057
497	27	0,7941	1	-0,4577	-0,2305	0,7161	0,0780	0,0061
478	28	0,8235	1	-0,5508	-0,2900	0,7372	0,0863	0,0074
449	29	0,8529	1	-0,6507	-0,3789	0,7679	0,0850	0,0072
400	30	0,8824	1	-0,7608	-0,5319	0,8177	0,0646	0,0042
398	31	0,9118	1	-0,8870	-0,5379	0,8196	0,0922	0,0085
343	32	0,9412	1	-1,0414	-0,7061	0,8681	0,0730	0,0053
339	33	0,9706	1	-1,2603	-0,7178	0,8712	0,0993	0,0099
NÚMERO	33			DifMax	0,10679	Soma	Dif^2	0,1346
Media	747			Dtab(5%)	0,2596	Média	Fobs	0,50
DP(n-1)	364			Dtab(20%)	0,2099		EPE	0,13
DPYn	1,1225			TesteK	OK			
Myn	0,5388							
Estimativa das vazões máximas prováveis								
TR	Freq		Y		Qmáx (m³/s)			
5	0,2		1,500		1057,9			
10	0,1		2,250		1301,0			
25	0,04		3,199		1608,2			
50	0,02		3,902		1836,0			
100	0,01		4,600		2062,2			

Tabela 2 - Detalhamento da estimativa das vazões máximas prováveis, pela distribuição de Gumbel na estação 56539000 - Cachoeira dos Óculos.

Qmax	ordem	Fobs	Tr	YN	VR=Y	FtGum	Dif	Dif^2
1.952,85	1	0,029	34,00	3,5115	3,7997	0,0221	0,0073	0,0001
1.952,85	2	0,059	17,00	2,8031	3,7997	0,0221	0,0367	0,0013
1.837,86	3	0,088	11,33	2,3819	3,4741	0,0305	0,0577	0,0033
1.483,05	4	0,118	8,50	2,0781	2,4692	0,0812	0,0365	0,0013
1.348,17	5	0,147	6,80	1,8384	2,0872	0,1166	0,0304	0,0009
1.273,34	6	0,176	5,67	1,6391	1,8753	0,1421	0,0343	0,0012
1.087,74	7	0,206	4,86	1,4674	1,3497	0,2284	0,0225	0,0005
1.055,99	8	0,235	4,25	1,3158	1,2597	0,2470	0,0117	0,0001
1.018,94	9	0,265	3,78	1,1793	1,1548	0,2703	0,0056	0,0000
1.002,01	10	0,294	3,40	1,0547	1,1069	0,2815	0,0126	0,0002
987,99	11	0,324	3,09	0,9394	1,0672	0,2911	0,0325	0,0011
897,36	12	0,353	2,83	0,8317	0,8105	0,3589	0,0060	0,0000
891,98	13	0,382	2,62	0,7301	0,7953	0,3633	0,0190	0,0004
875,89	14	0,412	2,43	0,6337	0,7497	0,3766	0,0352	0,0012
867,90	15	0,441	2,27	0,5414	0,7271	0,3833	0,0579	0,0034
859,93	16	0,471	2,13	0,4526	0,7045	0,3900	0,0805	0,0065
844,08	17	0,500	2,00	0,3665	0,6596	0,4037	0,0963	0,0093
825,72	18	0,529	1,89	0,2827	0,6076	0,4200	0,1095	0,0120
812,71	19	0,559	1,79	0,2005	0,5708	0,4317	0,1271	0,0162
802,36	20	0,588	1,70	0,1196	0,5414	0,4412	0,1471	0,0216
726,35	21	0,618	1,62	0,0394	0,3262	0,5141	0,1036	0,0107
721,39	22	0,647	1,55	(0,0406)	0,3121	0,5190	0,1281	0,0164
694,33	23	0,676	1,48	(0,1209)	0,2355	0,5462	0,1302	0,0170
679,73	24	0,706	1,42	(0,2019)	0,1942	0,5611	0,1448	0,0210
643,77	25	0,735	1,36	(0,2845)	0,0923	0,5982	0,1371	0,0188
636,67	26	0,765	1,31	(0,3694)	0,0722	0,6056	0,1591	0,0253
631,95	27	0,794	1,26	(0,4577)	0,0588	0,6105	0,1836	0,0337
613,22	28	0,824	1,21	(0,5508)	0,0058	0,6300	0,1935	0,0375
608,57	29	0,853	1,17	(0,6507)	(0,0074)	0,6348	0,2181	0,0476
531,63	30	0,882	1,13	(0,7608)	(0,2253)	0,7143	0,1681	0,0283
516,29	31	0,912	1,10	(0,8870)	(0,2687)	0,7297	0,1820	0,0331
507,60	32	0,941	1,06	(1,0414)	(0,2933)	0,7384	0,2028	0,0411
460,84	33	0,971	1,03	(1,2603)	(0,4258)	0,7836	0,1870	0,0350
NÚMERO	33			DifMax	0,21811	Soma	Dif^2	0,44596
Media	928,82			Dtab(5%)	0,2596	Média	Fobs	0,50000
DP(n-1)	396,35			Dtab(20%)	0,2099		EPE	0,23988
DPYn	1,12			TesteK	OK			
Myn	0,90							
Estimativa das vazões máximas prováveis								
TR	Freq	Y		Qmáx (m3/s)				
5	0,2	1,4999		1.140,80				
10	0,1	2,2504		1.405,77				
25	0,04	3,1985		1.740,57				
50	0,02	3,9019		1.988,94				
100	0,01	4,6001		2.235,48				

Tabela 3 - Detalhamento da estimativa das vazões máximas prováveis, pela distribuição de Gumbel na estação 56719998 - Belo Oriente.

Qmax	ordem	Fobs	Tr	YN	VR=Y	FtGum	Dif	Dif^2
3.906,83	1	0,0294	34,00	3,5115	4,1640	0,0154	0,0140	0,0002
3.298,00	2	0,0588	17,00	2,8031	3,2291	0,0388	0,0200	0,0004
2.982,49	3	0,0882	11,33	2,3819	2,7446	0,0623	0,0260	0,0007
2.577,59	4	0,1176	8,50	2,0781	2,1228	0,1128	0,0048	0,0000
2.419,48	5	0,1471	6,80	1,8384	1,8800	0,1415	0,0055	0,0000
1.951,36	6	0,1765	5,67	1,6391	1,1612	0,2688	0,0924	0,0085
1.756,49	7	0,2059	4,86	1,4674	0,8619	0,3445	0,1386	0,0192
1.655,41	8	0,2353	4,25	1,3158	0,7067	0,3894	0,1541	0,0237
1.651,10	9	0,2647	3,78	1,1793	0,7001	0,3914	0,1267	0,0160
1.543,21	10	0,2941	3,40	1,0547	0,5344	0,4435	0,1493	0,0223
1.501,77	11	0,3235	3,09	0,9394	0,4708	0,4645	0,1409	0,0199
1.461,74	12	0,3529	2,83	0,8317	0,4093	0,4853	0,1323	0,0175
1.446,84	13	0,3824	2,62	0,7301	0,3865	0,4931	0,1108	0,0123
1.442,69	14	0,4118	2,43	0,6337	0,3801	0,4953	0,0835	0,0070
1.373,18	15	0,4412	2,27	0,5414	0,2733	0,5327	0,0915	0,0084
1.348,95	16	0,4706	2,13	0,4526	0,2361	0,5460	0,0754	0,0057
1.335,40	17	0,5000	2,00	0,3665	0,2153	0,5535	0,0535	0,0029
1.324,88	18	0,5294	1,89	0,2827	0,1992	0,5593	0,0299	0,0009
1.312,91	19	0,5588	1,79	0,2005	0,1808	0,5660	0,0071	0,0001
1.289,69	20	0,5882	1,70	0,1196	0,1451	0,5789	0,0093	0,0001
1.285,15	21	0,6176	1,62	0,0394	0,1382	0,5815	0,0362	0,0013
1.276,08	22	0,6471	1,55	(0,0406)	0,1242	0,5865	0,0605	0,0037
1.262,53	23	0,6765	1,48	(0,1209)	0,1034	0,5941	0,0823	0,0068
1.216,26	24	0,7059	1,42	(0,2019)	0,0324	0,6202	0,0857	0,0073
1.193,11	25	0,7353	1,36	(0,2845)	(0,0032)	0,6333	0,1020	0,0104
1.134,23	26	0,7647	1,31	(0,3694)	(0,0936)	0,6665	0,0982	0,0096
1.093,24	27	0,7941	1,26	(0,4577)	(0,1565)	0,6895	0,1047	0,0110
1.027,62	28	0,8235	1,21	(0,5508)	(0,2573)	0,7257	0,0979	0,0096
966,64	29	0,8529	1,17	(0,6507)	(0,3509)	0,7584	0,0946	0,0089
884,82	30	0,8824	1,13	(0,7608)	(0,4766)	0,8002	0,0821	0,0067
751,03	31	0,9118	1,10	(0,8870)	(0,6820)	0,8616	0,0501	0,0025
690,82	32	0,9412	1,06	(1,0414)	(0,7745)	0,8858	0,0554	0,0031
658,39	33	0,9706	1,03	(1,2603)	(0,8243)	0,8977	0,0728	0,0053
NÚMERO	33			DifMax	0,15407	Soma	Dif^2	0,25197
Media	1546,06			Dtab(5%)	0,2596	Média	Fobs	0,50
DP(n-1)	730,98			Dtab(20%)	0,2099		EPE(5)	18,03
DPYn	1,12			TesteK	OK			
Myn	0,54							
Estimativa das vazões máximas prováveis								
TR	Freq		Y		XQmáx (m3/s)			
5	0,200		1,500		2172,0			
10	0,100		2,250		2660,6			
25	0,040		3,199		3278,1			
50	0,020		3,902		3736,2			
100	0,010		4,600		4190,8			

Tabela 4 - Detalhamento da estimativa das vazões máximas prováveis, pela distribuição de Gumbel na estação 56850000-Governador Valadares.

Qmax	ordem	Fobs	Tr	YN	VR=Y	FtGum	Dif	Dif^2
6.070,57	1	0,029	34,00	3,5115	4,2204	0,0146	0,0148	0,0002
4.700,01	2	0,059	17,00	2,8031	2,7934	0,0594	0,0006	0,0000
4.118,70	3	0,088	11,33	2,3819	2,1882	0,1061	0,0178	0,0003
3.918,14	4	0,118	8,50	2,0781	1,9794	0,1290	0,0114	0,0001
3.582,12	5	0,147	6,80	1,8384	1,6296	0,1780	0,0309	0,0010
3.378,60	6	0,176	5,67	1,6391	1,4177	0,2152	0,0387	0,0015
3.285,25	7	0,206	4,86	1,4674	1,3205	0,2343	0,0285	0,0008
3.153,77	8	0,235	4,25	1,3158	1,1836	0,2637	0,0285	0,0008
3.037,17	9	0,265	3,78	1,1793	1,0622	0,2923	0,0276	0,0008
2.661,46	10	0,294	3,40	1,0547	0,6710	0,4002	0,1061	0,0113
2.661,46	11	0,324	3,09	0,9394	0,6710	0,4002	0,0767	0,0059
2.637,16	12	0,353	2,83	0,8317	0,6457	0,4080	0,0551	0,0030
2.624,98	13	0,382	2,62	0,7301	0,6330	0,4120	0,0296	0,0009
2.564,63	14	0,412	2,43	0,6337	0,5702	0,4319	0,0201	0,0004
2.552,63	15	0,441	2,27	0,5414	0,5577	0,4359	0,0053	0,0000
2.516,75	16	0,471	2,13	0,4526	0,5204	0,4481	0,0225	0,0005
2.433,84	17	0,500	2,00	0,3665	0,4340	0,4769	0,0231	0,0005
2.279,54	18	0,529	1,89	0,2827	0,2734	0,5327	0,0033	0,0000
2.150,18	19	0,559	1,79	0,2005	0,1387	0,5813	0,0224	0,0005
2.113,36	20	0,588	1,70	0,1196	0,1004	0,5953	0,0070	0,0000
2.048,93	21	0,618	1,62	0,0394	0,0333	0,6199	0,0022	0,0000
2.036,08	22	0,647	1,55	(0,0406)	0,0199	0,6248	0,0223	0,0005
2.014,22	23	0,676	1,48	(0,1209)	(0,0029)	0,6332	0,0433	0,0019
1.949,18	24	0,706	1,42	(0,2019)	(0,0706)	0,6581	0,0478	0,0023
1.828,55	25	0,735	1,36	(0,2845)	(0,1962)	0,7038	0,0315	0,0010
1.811,19	26	0,765	1,31	(0,3694)	(0,2142)	0,7103	0,0544	0,0030
1.674,51	27	0,794	1,26	(0,4577)	(0,3565)	0,7603	0,0338	0,0011
1.538,57	28	0,824	1,21	(0,5508)	(0,4981)	0,8071	0,0164	0,0003
1.450,52	29	0,853	1,17	(0,6507)	(0,5897)	0,8353	0,0177	0,0003
1.408,54	30	0,882	1,13	(0,7608)	(0,6335)	0,8480	0,0343	0,0012
1.302,86	31	0,912	1,10	(0,8870)	(0,7435)	0,8779	0,0338	0,0011
1.071,14	32	0,941	1,06	(1,0414)	(0,9847)	0,9312	0,0099	0,0001
1.063,25	33	0,971	1,03	(1,2603)	(0,9929)	0,9327	0,0378	0,0014
NÚMERO	33			DifMax	0,10610	Soma	Dif^2	0,04
Media	2.534,48			Dtab(5%)	0,2596	Média	Fobs	0,50
DP(n-1)	1.078,14			Dtab(20%)	0,2099		EPE	7,43
DPYn	1,12			TesteK	OK			
Myn	0,54							
Estimativa das vazões máximas prováveis								
TR			Freq		Y		Qmáx (m3/s)	
5			0,2		1,500		3457,6	
10			0,1		2,250		4178,4	
25			0,04		3,199		5089,1	
50			0,02		3,902		5764,7	
100			0,01		4,600		6435,3	

Tabela 5 - Detalhamento da estimativa das vazões máximas prováveis, pela distribuição de Gumbel na estação 56920000-Tumiritinga.

Qmax	ordem	Fobs	Tr	YN	VR=Y	FtGum	Dif	Dif^2
7.207,1	1	0,029	34,000	3,511	4,317	0,013	0,016	0,0003
5.058,6	2	0,059	17,000	2,803	2,405	0,086	0,027	0,0008
4.621,7	3	0,088	11,333	2,382	2,016	0,125	0,036	0,0013
4.270,8	4	0,118	8,500	2,078	1,704	0,166	0,049	0,0024
4.171,1	5	0,147	6,800	1,838	1,615	0,180	0,033	0,0011
4.116,2	6	0,176	5,667	1,639	1,566	0,188	0,012	0,0001
4.061,3	7	0,206	4,857	1,467	1,518	0,197	0,009	0,0001
3.942,1	8	0,235	4,250	1,316	1,411	0,216	0,019	0,0004
3.488,3	9	0,265	3,778	1,179	1,008	0,306	0,041	0,0017
3.307,7	10	0,294	3,400	1,055	0,847	0,349	0,055	0,0030
3.237,8	11	0,324	3,091	0,939	0,785	0,366	0,043	0,0018
3.178,4	12	0,353	2,833	0,832	0,732	0,382	0,029	0,0008
3.158,8	13	0,382	2,615	0,730	0,714	0,387	0,005	0,0000
3.109,7	14	0,412	2,429	0,634	0,671	0,400	0,011	0,0001
3.041,6	15	0,441	2,267	0,541	0,610	0,419	0,022	0,0005
3.032,0	16	0,471	2,125	0,453	0,601	0,422	0,049	0,0024
2.985,4	17	0,500	2,000	0,367	0,560	0,435	0,065	0,0042
2.794,2	18	0,529	1,889	0,283	0,390	0,492	0,037	0,0014
2.609,8	19	0,559	1,789	0,201	0,225	0,550	0,009	0,0001
2.510,6	20	0,588	1,700	0,120	0,137	0,582	0,006	0,0000
2.243,0	21	0,618	1,619	0,039	(0,101)	0,669	0,052	0,0027
2.183,4	22	0,647	1,545	(0,041)	(0,154)	0,689	0,041	0,0017
2.163,3	23	0,676	1,478	(0,121)	(0,172)	0,695	0,019	0,0003
2.146,4	24	0,706	1,417	(0,202)	(0,187)	0,700	0,005	0,0000
2.088,1	25	0,735	1,360	(0,285)	(0,239)	0,719	0,016	0,0003
2.014,0	26	0,765	1,308	(0,369)	(0,305)	0,742	0,022	0,0005
1.845,4	27	0,794	1,259	(0,458)	(0,455)	0,793	0,001	0,0000
1.837,5	28	0,824	1,214	(0,551)	(0,462)	0,795	0,028	0,0008
1.698,1	29	0,853	1,172	(0,651)	(0,586)	0,834	0,019	0,0004
1.671,8	30	0,882	1,133	(0,761)	(0,609)	0,841	0,041	0,0017
1.566,4	31	0,912	1,097	(0,887)	(0,703)	0,867	0,044	0,0020
1.206,7	32	0,941	1,063	(1,041)	(1,023)	0,938	0,003	0,0000
1.171,4	33	0,971	1,030	(1,260)	(1,055)	0,943	0,027	0,0007
NÚMERO	33			DifMax	0,065	Soma	Dif^2	0,034
Media	2.961,77			Dtab(5%)	0,260	Média	Fobs	0,500
DP(n-1)	1.261,10			Dtab(20%)	0,2099		EPE	6,580
DPYn	1,12			TesteK	OK			
Myn	0,54							
Estimativa das vazões máximas prováveis								
TR	Freq	Y		Qmáx (m3/s)				
5	0,2	1,500		4041,6				
10	0,1	2,250		4884,7				
25	0,04	3,199		5949,9				
50	0,02	3,902		6740,2				
100	0,01	4,600		7524,6				

Tabela 6 - Detalhamento da estimativa das vazões máximas prováveis, pela distribuição de Gumbel na estação 56994500-Colatina.

Qmax	ordem	Fobs	Tr	YN	VR=Y	FtGum	Dif	Dif^2
10715,9	1	0,0294	34,00	3,5115	3,8799	0,0204	0,0090	0,0001
8757,1	2	0,0588	17,00	2,8031	2,8762	0,0548	0,0040	0,0000
7751,7	3	0,0882	11,33	2,3819	2,3610	0,0900	0,0018	0,0000
6837,2	4	0,1176	8,50	2,0781	1,8924	0,1399	0,0222	0,0005
6745,0	5	0,1471	6,80	1,8384	1,8452	0,1461	0,0009	0,0000
6413,9	6	0,1765	5,67	1,6391	1,6755	0,1707	0,0057	0,0000
6351,6	7	0,2059	4,86	1,4674	1,6436	0,1758	0,0301	0,0009
5174,0	8	0,2353	4,25	1,3158	1,0402	0,2977	0,0624	0,0039
5154,9	9	0,2647	3,78	1,1793	1,0304	0,3001	0,0354	0,0013
4955,5	10	0,2941	3,40	1,0547	0,9282	0,3265	0,0324	0,0010
4620,7	11	0,3235	3,09	0,9394	0,7567	0,3745	0,0510	0,0026
4402,6	12	0,3529	2,83	0,8317	0,6449	0,4083	0,0553	0,0031
4348,8	13	0,3824	2,62	0,7301	0,6174	0,4169	0,0345	0,0012
4241,6	14	0,4118	2,43	0,6337	0,5625	0,4344	0,0226	0,0005
3852,2	15	0,4412	2,27	0,5414	0,3629	0,5012	0,0601	0,0036
3849,5	16	0,4706	2,13	0,4526	0,3615	0,5017	0,0311	0,0010
3667,7	17	0,5000	2,00	0,3665	0,2684	0,5345	0,0345	0,0012
3495,8	18	0,5294	1,89	0,2827	0,1803	0,5661	0,0367	0,0013
3492,0	19	0,5588	1,79	0,2005	0,1783	0,5668	0,0080	0,0001
3205,1	20	0,5882	1,70	0,1196	0,0313	0,6206	0,0324	0,0010
3095,7	21	0,6176	1,62	0,0394	-0,0247	0,6412	0,0236	0,0006
2877,6	22	0,6471	1,55	-0,0406	-0,1365	0,6822	0,0351	0,0012
2783,2	23	0,6765	1,48	-0,1209	-0,1848	0,6997	0,0232	0,0005
2740,6	24	0,7059	1,42	-0,2019	-0,2067	0,7076	0,0017	0,0000
2562,2	25	0,7353	1,36	-0,2845	-0,2981	0,7400	0,0048	0,0000
2557,4	26	0,7647	1,31	-0,3694	-0,3005	0,7409	0,0238	0,0006
2549,5	27	0,7941	1,26	-0,4577	-0,3046	0,7423	0,0518	0,0027
2479,7	28	0,8235	1,21	-0,5508	-0,3403	0,7547	0,0688	0,0047
2336,8	29	0,8529	1,17	-0,6507	-0,4136	0,7796	0,0734	0,0054
2292,5	30	0,8824	1,13	-0,7608	-0,4363	0,7871	0,0952	0,0091
1887,7	31	0,9118	1,10	-0,8870	-0,6437	0,8510	0,0608	0,0037
1319,3	32	0,9412	1,06	-1,0414	-0,9349	0,9217	0,0195	0,0004
936,0	33	0,9706	1,03	-1,2603	-1,1314	0,9549	0,0156	0,0002
NÚMERO	33			DifMax	0,0624	Soma	Dif^2	0,0524
Media	4195,5			Dtab(5%)	0,2596	Média	Fobs	0,50
DP(n-1)	2.190,65			Dtab(20%)	0,2099		EPE(%)	8,23
DPYn	1,12			TesteK	OK			
Myn	0,54							
Estimativa das vazões máximas prováveis								
TR		Freq		Y		Qmáx (m3/s)		
5		0,200		1,500		6071,2		
10		0,100		2,250		7535,7		
25		0,040		3,199		9386,2		
50		0,020		3,902		10758,9		
100		0,010		4,600		12121,6		

MODELAGEM BIDIMENSIONAL “SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DA CHEIA DE 2020 NO RIO DOCE E CENÁRIOS DE TEMPO DE RETORNO”

INTRODUÇÃO

Este documento suplementar apresenta o relato dos resultados finais dos serviços de atualização da área de susceptibilidade ao extravasamento de rejeito (ASER) no rio Doce, utilizando simulação hidrodinâmica 2D com o modelo HEC-RAS.

São apresentados nesse documento suplementar resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional para a cheia de 2020 ocorrida no Rio Doce, bem como de cenários para vazões de diferentes tempos de retorno utilizando o modelo HEC-RAS 2D. O modelo HEC-RAS utiliza equações que permitem descrever o transporte de água em terrenos considerando processos físicos como efeitos de remanso e interação com planícies de inundação, representando os fluxos longitudinais e laterais, tendo como base um Modelo Digital de Terreno (MDT).

Para este estudo de modelagem 2D foi utilizado um levantamento topográfico de alta definição obtido por laser aerotransportado (LIDAR, considerado a melhor tecnologia existente atualmente) na região ribeirinha do Doce, disponibilizado pela Fundação Renova (2019), aliado a um levantamento batimétrico do rio Doce obtidas pela ANA (Agência Nacional de Águas).

Nas áreas mais afastadas do rio Doce na região litorânea do Espírito Santo, não abrangidas pelo levantamento com LIDAR, foram utilizados os dados topográficos obtidos de um levantamento realizado por “Hiparc Geotecnologia”, entre os anos de 2012 a 2015, para o IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo), que originou curvas de nível de 5 em 5 metros, e complementado pelo BHO ANA 5K (Base Hidrográfica Ottocodificada - Agência Nacional de Águas) para obtenção da rede de drenagem.

O trecho simulado com a abordagem 2D se inicia em Colatina/ES e vai até a foz do rio Doce, compreendendo cerca de 70 km ao longo do rio Doce e uma área de planície de inundação da ordem de 2000-3000 km² ao longo de cerca de 100 km de costa. Foram realizadas cinco simulações para as vazões máximas com tempo de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, além da simulação para cheia de 2020.

MATERIAIS E MÉTODOS

Pré-processamento de MDTS – representação das lagoas

Para uma representação mais adequada do terreno, o MDT de alta resolução e o MDT da zona costeira (delta do rio Doce), baseado em curvas de níveis, foram escavados nas localidades das diversas lagoas da área de estudo com objetivo de representar as profundidades destas.

Foram utilizadas as informações de profundidades de seis lagoas (Juparanã, Nova, Lagoa do Limão, Areal, Areão e Monsarás) obtida pelo Lactec durante as campanhas de qualidade da água. Nestas lagoas foram utilizadas as medições com data mais próxima do levantamento do MDT de alta resolução.

As demais lagoas foram identificadas pelo shape de máscaras d'água da ANA e a profundidade a ser

rebaixada foi estimada interpretando o MDT e comparando com o perfil de elevação do Google Earth, conforme exemplo da Figura 187. Para isso, realizou-se uma verificação do desnível entre o nível na lagoa e nas margens. Com esta abordagem é possível que ocorra subestimativa das profundidades das lagoas, mas diante da falta de informações essas estimativas permitem uma primeira aproximação sobre o processo de vertimento de água para as lagoas.

A Tabela 89 e a Tabela 90 contém um resumo das lagoas onde o terreno foi rebaixado e a profundidade adotada para cada uma delas.

Figura 187 - Exemplo de perfil de elevação extraído do Google Earth para auxílio na estimativa das profundidades das lagoas.



Fonte: Google Earth (2020).

Tabela 89 - Resumo das profundidades escavadas em cada lagoa.

Nome da Lagoa	Profundidade escavada (m)	Método
Lagoa Nova	9.84	Medidas em campo
Lagoa Juparanã	4.06	Medidas em campo
Lagoa Areão (Pandolfi)	3.35	Medidas em campo
Lagoa Areal	3.30	Medidas em campo
Lagoa Monsarás	3.47	Medidas em campo
Lagoa do Limão	7.00	Medidas em campo
Lagoa das Palminhas	11.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Pau-Grosso	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Martins	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa das Cacimbas	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Nossa Senhora das Graças	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Zacarias	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Monte Verde	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Terra Altinha	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa das Palmas	11.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Doutor	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Piaba	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Vista	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa da Piaba	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Salgada	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Pau Gigante	5.00	Interpretação de mapas topográficos

Tabela 90 - Resumo das profundidades escavadas em cada lagoa (continuação).

Nome da Lagoa	Profundidade escavada (m)	Método
Lagoa Zacarias	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa da Cobra Verde	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa dos Brás	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Urubu	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Lagoinha	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Aviso	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Delfino	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Vista	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Durão	5.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Santo Antônio	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Terra Alta	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Piabanha	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Morte	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Boa Vista	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Sabiá	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Óleo	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa dos Campos	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Amarelo	4.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa de Dentro	5.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Meio	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa da Testa	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa das Cacimbas	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Ramos	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Baixa	5.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Parda	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Aguiar	2.00	Interpretação de mapas topográficos

Nome da Lagoa	Profundidade escavada (m)	Método
Lagoa Nova	1.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Esgoto do Patrão-Mor	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa do Camargo	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Nova	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Arural	2.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa Piabanha	3.00	Interpretação de mapas topográficos
Lagoa São João	2.00	Interpretação de mapas topográficos

Simulação hidrodinâmica 2DH

O modelo HEC-RAS permite que informações detalhadas a respeito do relevo e da geometria da calha do rio sejam consideradas. Para tanto, na versão 2DH, o modelo utiliza um pré-processamento que extrai as informações detalhadas do modelo digital de terreno utilizado, com um esquema de *subgrid* que permite uma solução robusta no tratamento de processos de secagem e inundação da malha computacional. Nos subitens a seguir são apresentados os detalhes da aplicação do modelo HEC-RAS na porção do rio Doce compreendida entre Colatina e a foz do rio Doce. Para todas as simulações, foi utilizado o modelo do tipo difusão, o qual é adequado para simulação de ondas de cheia de rios e planície de inundação, onde forças de gravidade e atrito governam o fenômeno. O intervalo de tempo de simulação foi configurado para realização adaptativa durante a execução no HEC-RAS ($0.45 < \text{Courant} < 3$), resultando em passos de tempo mínimo e máximo de 5 a 1200 segundos (na prática, as simulações demonstraram trabalhar na faixa entre 28 e 120 segundos), de forma a atender os critérios de estabilidade. O modelo utilizado foi também previamente aplicado com resultados satisfatórios para as cheias de 2013, 2015 e 2016.

Definição do domínio computacional e da malha

O domínio global para modelagem hidráulica 2DH foi considerado como sendo o trecho no rio Doce, de Colatina até o Oceano Atlântico. Considerou-se os limites dos modelos de terreno disponíveis: MDT a laser, a batimetria e o modelo digital de terreno ALOS (12,5 m de resolução, disponível em <https://search.asf.alaska.edu/#/>). Para o contorno de montante, foi considerado trecho adicional entre Baixo Guandu e Colatina, distante em cerca de 20 km de Colatina.

A definição do domínio computacional foi realizada buscando identificar as áreas potencialmente inundáveis, mas também considerando a diferença entre as altitudes da seção transversal nas proximidades de Colatina e o nível do mar, sendo que o trecho simulado passa de um vale encaixado para um terreno de baixo declividade. Por fim, busca-se simular o escoamento de maneira adequada. Foram considerados também aspectos relacionados a capacidade de executar o pré-processamento, execução das simulações e pós-processamento, em tempo hábil. Neste sentido, considera-se a eficiência computacional, bem como a flexibilidade para atualização contínua do modelo. Para execução das atividades, foi utilizado um computador de alto desempenho Intel® Core i7-9750H @2.60Ghz- 4.5Ghz Turbo (6 processadores), SSD e 64GB RAM. A Figura