

DIA **D** DO RIO DOCE

Um olhar científico sobre o maior desastre socioambiental do Brasil

Natália Maria de Freitas Vicente
Carlos Frankl Sperber
Marco Aurélio Carbone Carneiro
Organizadores

EDITORA
UFPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

DIA  DO RIO DOCE:

Um olhar científico sobre o maior desastre
socioambiental do Brasil

Natália Maria de Freitas Vicente
Carlos Frankl Sperber
Marco Aurélio Carbone Carneiro
Organizadores

DIA  DO RIO DOCE:
Um olhar científico sobre o maior desastre
socioambiental do Brasil

Lavras, MG
2021

©Editora UFLA 2021 by Natália Maria de Freitas Vicente, Carlos Frankl Sperber, Marco Aurélio Carbone Carneiro
Este livro é de uso livre e gratuito e pode ser copiado na íntegra ou em partes, desde que se cite a fonte. Qualquer dúvida ou informações, entre em contato conosco pelo e-mail: editora@editora.ufla.br. O conteúdo desta obra, além de autorizações relacionadas à permissão de uso de imagens e/ou textos de outro(s) autor(es), é de inteira responsabilidade do(s) autor(es) e/ou organizador(es).
Direitos de publicação reservados à Editora UFLA.
Impresso no Brasil - ISBN: 978-65-86561-16-6

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

Reitor: João Chrysostomo de Resende Júnior
Vice-Reitor: Valter Carvalho de Andrade Júnior
Pró-Reitor de Pesquisa: Luciano José Pereira

UNIDADE RESPONSÁVEL PELA EDIÇÃO DO LIVRO

Conselho editorial responsável pela aprovação da obra:

Marco Aurélio Carbone Carneiro (Presidente), Nilton Curi (Vice-Presidente), Francisval de Melo Carvalho, Alberto Colombo, João Domingos Scalon, Wilson Magela Gonçalves

Referências Bibliográficas: Editora UFLA

Revisão de Português: Editora UFLA

Projeto Gráfico: Patrícia Carvalho de Moraes

Diagramação: Patrícia Carvalho de Moraes

Capa: Patrícia Carvalho de Moraes

EXPEDIENTE EDITORA UFLA

Flávio Monteiro de Oliveira (Diretor)
Patrícia Carvalho de Moraes (Vice-Diretora)
Alice de Fátima Vilela
Damiana Joana Geraldo Souza
Késia Portela de Assis

Marco Aurélio Costa Santiago
Renata de Lima Rezende
Vitor Lúcio da Silva Naves
Walquíria Pinheiro Lima Bello

Ficha catalográfica elaborada pelo Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Universitária da UFLA

Dia D do Rio do Doce : um olhar científico sobre o maior desastre socioambiental do Brasil / organizadores: Natália Maria de Freitas Vicente, Carlos Frankl Sperber, Marco Aurélio Carbone Carneiro. – Lavras : UFLA, 2021.
246 p. : il.

Bibliografia.

1. Desastre da Samarco/Vale/BHP. 2. Rio Doce. 3. Mineração. 4. Impactos ambientais. 5. Restauração ecológica. I. Vicente, Natália Maria de Freitas. II. Sperber, Carlos Frankl. III. Carneiro, Marco Aurélio Carbone. IV. Universidade Federal de Lavras.

CDD – 333.714

Ficha elaborada por Eduardo César Borges (CRB 6/2832)



EDITORA UFLA

Campus Universitário da UFLA, Andar Térreo do Centro de Eventos, Cx. Postal 3037, CEP 37200-900 - Lavras/MG,

Tel: (35) 3829-1532, E-mail: editora@ufla.br, Homepage: www.editora.ufla.br, facebook: Editora UFLA

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	5
SEÇÃO 1. DESCRIÇÃO DOS IMPACTOS	10
Serviços ecossistêmicos em áreas afetadas pela deposição de rejeito da mineração de ferro	11
Processos biogeoquímicos no estuário do Rio Doce após o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG	57
Impactos da ruptura da barragem de rejeito da Samarco na concentração de metais e arsênico em <i>Geophagus brasiliensis</i> da bacia do Rio Doce	78
SEÇÃO 2. RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA	92
Remediação e recuperação da mata ciliar atingida pelos rejeitos da Barragem de Fundão, Mariana/MG: um modelo bem-sucedido.....	93
Como os microrganismos auxiliam na revegetação de áreas afetadas pelo desastre de Mariana?	103
como a tecnologia nuclear pode auxiliar na segurança de barragem	120
SEÇÃO 3. IMPACTOS SOCIAIS	137
Ecologia da saúde: abordagens transdisciplinares para entender doenças em cenários ecológicos de-pauperados, com enfoque na bacia do Rio Doce	138
Rompimento da barragem do fundão: repercussões sobre a comunidade escolar de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo	152
O assombro do desastre: reflexão sobre as questões jurídicas, sociais, econômicas e psicossociais do desastre ligadas a uma perceptiva da história ambiental	171
SEÇÃO 4. CIÊNCIA E SOCIEDADE	191
Ciência cidadã: aproximando pessoas, transformando realidades	192
Ciência cidadã e recursos hídricos no Brasil: reflexões sobre a produção acadêmica nos últimos 10 anos	205
SOBRE OS AUTORES DESTA OBRA	219

APRESENTAÇÃO

Esta obra representa o esforço pela aproximação entre discussões científicas sobre os impactos do rompimento da barragem de rejeitos de mineração da Samarco/Vale/BHP Billiton, na bacia do rio Doce, e o público geral, particularmente os próprios atingidos. O desastre teve início em 15 de novembro de 2015, com o rompimento da barragem de Fundão, de propriedade da mineradora SAMARCO – operada pela Vale S.A. e BHP Billiton – e se constitui no maior desastre sociotécnico¹ da história do Brasil². Foram despejados cerca de 62 milhões de metros cúbicos de rejeitos, que se deslocaram ao longo dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, e atingiram o rio Doce em toda a sua extensão.

A avalanche de lama deixou um rastro de destruição por onde passou. Dezenove pessoas faleceram e milhares de outras pessoas foram e continuam sendo atingidas direta e indiretamente. Foram devastados remanescentes de matas ciliares e de matas de galeria, essenciais para manter a estabilidade das margens dos rios, reduzir a erosão e assoreamento dos rios, e manter a biodiversidade terrestre e aquática. Além disso a avalanche de rejeitos provocou a morte imediata de uma infinidade de organismos terrestres e praticamente todos os organismos aquáticos. Esse desastre evidenciou a situação de conflito e ameaças provocadas pelo extrativismo irresponsável, descomprometido com a vida e com o ambiente e fez emergir conflitos entre os atingidos, duplamente afetados pelos danos diretos e pela insegurança que passou a fazer parte de seu dia a dia.

Dada a amplitude de tipos e intensidades dos danos que ainda se revelam, é essencial que o impacto inicial do derramamento do rejeito e seus desdobramentos ao longo do tempo sejam compreendidos numa perspectiva capaz de superar abordagens fragmentadas que decorrem do sistema vigente na maior parte das instituições e cursos onde se formam

¹Segundo Zhou et al. (2018) o termo sociotécnico é utilizado para definir “um processo deflagrado para além de uma avaria ou erro meramente técnico, remetendo-nos, assim, às falhas da governança ambiental, produtoras de novos padrões de vulnerabilidade que expuseram, de fato, a população ao risco”. Os organizadores dessa obra consideram o desastre a partir dessa visão, porém, a maioria dos autores utiliza o termo socioambiental. Como nosso objetivo aqui é a aproximação das percepções, optamos por manter o termo no título da obra e em grande parte dos capítulos.

²Em 25 de janeiro de 2019 fomos surpreendidos com mais um rompimento de barragem de mineração, dessa vez a do Córrego do Feijão, na bacia do rio Paraopeba, município de Brumadinho (POLIGNANO, 2019). Esse segundo evento, uma reincidência de erros e descaso, foi muito mais trágico do que o do rio Doce em termos de vidas humanas: após um mês de buscas, o número de óbitos ultrapassa 300, com 179 corpos localizados e 131 pessoas “desaparecidas”, se constituindo no maior “acidente” de trabalho no Brasil (as aspas se devem à previsibilidade e, portanto, (ir-)responsabilidade da empresa), e o segundo maior desastre industrial do século (FREITAS et al., 2019). Se em termos ambientais o desastre de Brumadinho não se compara aos impactos socioambientais de Mariana, em termos humanos o impacto foi muito mais terrível, o que se soma à reincidência, demonstrando o descaso dos responsáveis com a vida humana.

e atuam os pesquisadores. É preciso considerar que, se por um lado a formação especializada traz indiscutíveis benefícios, por outro também incorre em limitações que refletem inclusive na dificuldade de diálogo de pesquisadores entre si e, sobretudo, com aqueles a quem interessa diretamente a pesquisa, no caso em tela, os atingidos pelo desastre iniciado no ano de 2015, mas cujos reflexos irão persistir por dezenas de anos.

Vemos o empenho de pesquisadores de laboratórios das mais diversas áreas do conhecimento em compreender os danos imediatos, seus desdobramentos, e apontar possíveis caminhos para minimizar e reverter os prejuízos que também se dão nos mais diversos campos. No entanto, é notável o pouco diálogo entre as equipes de pesquisadores, o que leva a frequentes sobreposições e, simultaneamente, lacunas na investigação de danos e soluções.

Desta forma, se por um lado o exercício interdisciplinar é complexo e trabalhoso, ele também é imprescindível para encarar problemas complexos como aqueles instalados na bacia do rio Doce. Portanto, é urgente a integração de pesquisadores com expertise nas diferentes áreas do conhecimento que estejam ou já tenham sido envolvidos em investigações ligadas à referida bacia.

Para além da integração dos pesquisadores entre si, é fundamental conectá-los com as experiências de quem enfrenta os impactos negativos da mineração, sejam os cidadãos atingidos, sejam os tomadores de decisão e técnicos que elaboram planos de ações, estratégias e demandas voltadas para a recuperação socioambiental da bacia do rio Doce. Essa troca de informações incentiva o desenvolvimento de iniciativas que insiram o cotidiano das comunidades afetadas nas atividades científicas e ações de pesquisadores e demais atores sociais.

Foi buscando essa integração interdisciplinar intra e extracadêmica, que, em novembro de 2018, realizamos em Ouro Preto – MG, o evento “II dia D do rio Doce”, reunindo pesquisadores e público em geral. Visamos criar um espaço de compartilhamento de saberes entre pesquisadores e comunidade para a construção de um ambiente mais sustentável e saudável na bacia do rio Doce. O presente livro é fruto deste evento.

A experiência de se defrontar com uma demanda tão urgente da sociedade, tão fortemente conectada com o dia a dia das pessoas, forçou-nos a nos abriremos a áreas da ciência na qual não tínhamos – e não temos – familiaridade. Mais do que isto, como foi necessário apresentarmos nossos resultados para um público que incluía atingidos, muitos deles ativamente engajados nas lutas sociais e políticas, não era suficiente fazer apresentações estritamente acadêmicas. Tivemos

que aprimorar nossa linguagem, evitar jargões, que escondem, protegem, obscurecem, mas isto só é possível quando se compreende profundamente o problema e os aspectos abordados no próprio estudo. Ficou claro que a ciência leva tempo para amadurecer, para interpretar e compreender os fenômenos naturais, e esta demora muitas vezes poderia ser interpretada como arrogância, elitismo ou incompetência. Tivemos que nos defrontar, sim, com as nossas limitações, e buscar o movimento na direção de aproximação para um diálogo honesto e aberto entre áreas da ciência e com a população. Este diálogo só é possível quando o percebemos como uma interação horizontal, onde nenhum dos interagentes é mais ou menos importante do que o outro.

A questão financeira entra em consideração tanto quanto outras assimetrias de poder, e temos que ver criticamente as implicações, os interesses dos diferentes atores envolvidos, mesmo que de modo oculto. Apenas com uma visão crítica, explicitando as limitações e os riscos das interpretações da realidade e dos dados, é que poderemos superar classificações definitivas e excludentes, seja considerando o conhecimento não-científico como inválido *a priori*, seja priorizando uma área do conhecimento sobre outra, seja desconsiderando um estudo que tenha financiamento de empresas, ou fechando os olhos e deixando-se manipular, consciente ou inconscientemente, por agentes externos. Ficou patente a necessidade, urgência e riqueza de se relativizar o conhecimento, de se compartilhar as dificuldades, as limitações e potenciais do método científico. Por exemplo, para os biólogos envolvidos, tivemos que nos abrir às interpretações sociais, geográficas e econômicas. O desastre não foi um evento isolado. Ele é a consequência de uma forma de exploração dos recursos naturais e humanos que prioriza os interesses de determinados atores sociais, muitas vezes ausentes, escondidos, invisíveis. Tivemos, temos, que superar as visões maniqueístas de classificar os agentes em “bons” e “maus”. Temos que superar essas simplificações. O desafio é imenso. Esse livro é um passo nesta direção. Os aspectos ambientais e sociais dos efeitos do desastre são abordados em 11 capítulos, divididos em quatro seções que compõem a presente obra (Figura 1).

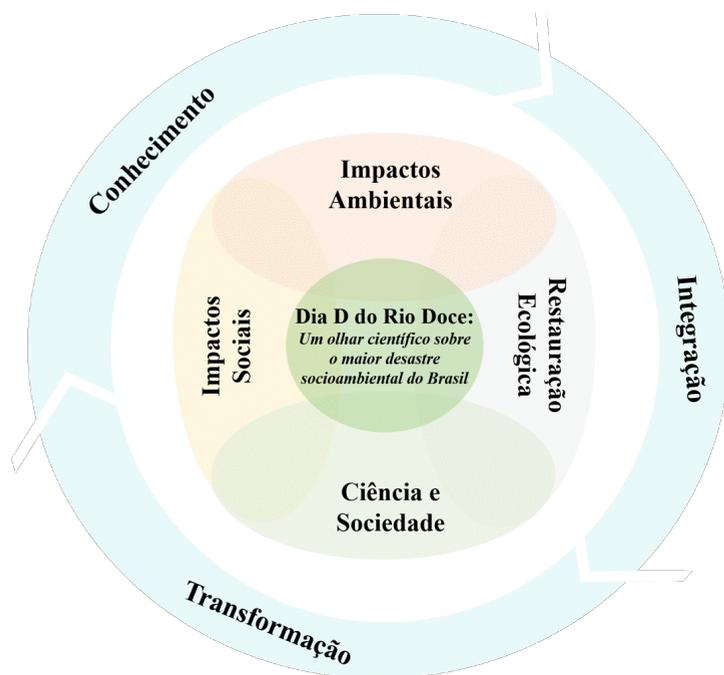


Figura 1. Este livro se organiza em quatro sessões (Impactos Ambientais, Restauração Ecológica, Impactos Sociais e Ciência e Sociedade). Apenas com a integração entre áreas da ciência e a sociedade, chegaremos à transformação que permita uma sociedade menos desigual, socialmente justa e ambientalmente sustentável.

A primeira seção busca descrever os impactos ambientais causados pelo rejeito, com três focos: serviços ecossistêmicos, processos biogeoquímicos e contaminação de peixes. O primeiro capítulo dessa seção aborda o comprometimento dos serviços ecossistêmicos em virtude da alteração dos parâmetros físicos, químicos e biológicos dos solos afetados pelo desastre. O segundo capítulo apresenta um diagnóstico da situação do estuário do rio Doce a partir de uma coletânea de estudos abordando a dinâmica do ferro, a biodisponibilidade de metais, riscos ecológicos com base em índice geoquímicos, e o efeito destes sobre a comunidade microbológica do solo. No terceiro capítulo são analisadas as concentrações de metais e arsênio no tecido de *Geophagus brasiliensis*, uma espécie de peixe nativa da bacia do rio Doce, comparando-se áreas afetadas e não afetadas pelo rejeito.

A segunda seção apresenta possíveis caminhos de restauração ecológica das áreas florestais e monitoramento de barragens. O primeiro capítulo dessa seção, mostra uma experiência bem sucedida de remediação do sódio e eteramina no

solo de áreas afetadas utilizando plantas nativas da Mata Atlântica. O segundo capítulo aborda a estratégia da utilização de microrganismos para acelerar o diagnóstico e processo de restauração das áreas afetadas pelo rejeito. O terceiro capítulo, traz a perspectiva da tecnologia nuclear para a detecção, monitoramento de falhas e prevenção das rupturas de barragens.

A terceira seção destaca e discute as questões sociais envolvidas no desastre provocado pela Samarco. O primeiro capítulo aborda a interface ecologia de hospedeiros e parasitas em resposta à sociedade, distúrbios ambientais e mudanças climáticas à luz dos paradigmas de *One Health / EcoHealth* (uma saúde / eco-saúde)³. O segundo capítulo traz reflexões sobre os impactos do rompimento da barragem do Fundão na identidade das escolas do campo, relativos aos povoados de Bento Rodrigues e de Paracatu de Baixo. O terceiro capítulo traz reflexões sobre a necessidade de integrar as variáveis socioeconômicas, culturais, político-jurídicas, socioambientais e ecológicas na questão do desastre, considerando que o rio não se restringe apenas a condição de recurso hídrico.

A quarta seção aborda a ciência cidadã: o engajamento de atores da comunidade não-científica na produção de conhecimento. No primeiro capítulo dessa seção, os autores apresentam os preceitos básicos da ciência cidadã, relatam uma experiência prática para então expor os resultados da discussão realizada pelo coletivo de pesquisadores durante o “II dia D do rio Doce” e o conjunto de recomendações para aprimoramento das práticas científicas com as populações locais. No segundo capítulo da seção, o objetivo é discutir possíveis relações entre Ciência cidadã, educação ambiental, mobilização social e recuperação de nascentes a partir de trabalhos científicos publicados nos últimos dez anos.

Finalmente, reconhecemos a importância dos financiamentos na realização dessa obra, e destacamos o apoio recebido pela CAPES, FAPEMIG, FAPES, CNPq e ANA.

Carlos Frankl Sperber
Natália Maria de Freitas Vicente
Renata Bernardes Faria Campos

³*EcoHealth* e *One Health* são duas abordagens principais amplamente destinadas a compreender as ligações entre a saúde humana, animal e ambiental (HARRISON, Sarah et al. *EcoHealth and One Health: A theory-focused review in response to calls for convergence*. *Environment international*, v. 132, p. 105058, 2019.)

Seção **1**

DESCRIÇÃO DOS IMPACTOS



SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS EM ÁREAS AFETADAS PELA DEPOSIÇÃO DE REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO

Aline Oliveira Silva¹
Ana Paula Valadares da Silva¹
Marisângela Viana Barbosa¹
Éder Rodrigues Batista¹
Renato Saldanha Bastos^{1,2}
Flávia Louzeiro Aguiar Santiago¹
Moacir de Souza Dias Junior¹
Helder Barbosa Paulino³
Jessé Valentim dos Santos¹
Marco Aurélio Carbone Carneiro^{1*}

1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração consiste num ramo de grande importância para suprir as necessidades da vida moderna, com tecnologias e bens de consumo. Durante o processo de extração de minérios ocorrem mudanças na topografia e paisagem, pela remoção da vegetação e escavação do ambiente, além da grande deposição de resíduos (GUERRA et al., 2017; LOTTERMOSER, 2010). Os resíduos são definidos como subprodutos resultantes das operações da mineração,

¹Universidade Federal de Lavras, Escola de Ciências Agrárias, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, Minas Gerais - Brasil.

²Instituto Federal do Sul de Minas Gerais, Três Corações, Minas Gerais.

³Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Campus Iturama, Iturama, Minas Gerais

*Autor correspondente, e-mail: marcocarbone@ufla.br

processamento mineral e extração metalúrgica (LOTTERMOSER, 2010). Esses resíduos são comumente armazenados em barragens de rejeitos próximas ao local da extração do minério (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS - ICOLD, 2001). Todo esse processo exige licenciamento ambiental segundo as normas vigentes nos órgãos ambientais (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA, 1990).

O armazenamento desses resíduos de forma segura é particularmente importante, principalmente em áreas povoadas, e consiste numa preocupação constante das empresas mineradoras, dos órgãos de proteção ambiental e da comunidade que vive próxima a barragem (ICOLD, 2001). Esses resíduos são depositados em grandes reservatórios, as chamadas barragens de rejeitos ou resíduos, que são frequentemente construídas em encostas íngremes usando o material grosseiro derivado de atividades de mineração (AZAM; LI, 2010). Esses reservatórios de rejeitos estão propensos a falhas, principalmente pela convergência entre um planejamento mal executado em sua construção, pela falta de manutenção ou falha nas operações (AZAM; LI, 2010; SANTAMARINA; TORRES-CRUZ; BACHUS, 2019). Mas conforme Santamarina, Torres-Cruz e Bachus (2019) não são os rejeitos contidos na barragem que levam ao colapso interno e o cisalhamento na estrutura de contenção, mas sim falhas da estrutura da barragem, a qual é frequentemente seguida por um fluxo de lama em movimento rápido, que pode correr a jusante por vários quilômetros, causando efeitos catastróficos.

A tragédia registrada no município de Mariana – MG em 5 de novembro de 2015, e a mais recente no município de Brumadinho – MG em janeiro de 2019, são exemplos das catástrofes causadas após acidentes em barragens de contenção de rejeito de mineração. No caso do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, que pertencia a empresa de mineração Samarco, liberou na bacia hidrográfica do rio Doce mais de 60 milhões de m³ de rejeito que alcançou centenas de quilômetros ao longo do rio, percorrendo um longo caminho entre Minas Gerais e Espírito Santo, atingindo o estuário e chegando ao Oceano Atlântico (LOPES, 2016; MARTA-ALMEIDA et al., 2016).

O derramamento de rejeito da tragédia de Mariana foi considerado um dos maiores desastres ambientais já registrados no Brasil até então, superando o rompimento da barragem de Aznalcollar na Espanha em 1998, que liberou cerca de dois milhões de m³ de lama, contendo principalmente zinco (Zn) e arsênio (As), metais com alto poder de contaminação (GUERRA et al., 2017). O acidente ocorrido no Brasil causou sérios problemas ambientais por toda a extensão da bacia hidrográfica do rio Doce por onde a lama percorreu (FERNANDES et al., 2016; MIRANDA; MARQUES 2016).

Ao longo do percurso atingido pela lama foram registrados diversos impactos ambientais como a contaminação do solo e da água por metais pesados e compostos químicos (CORDEIRO et al., 2019; HATJE et al., 2017; SANTOS et al., 2019; SILVA et al., 2017), ocasionando alterações da composição química dos solos e da água ao longo da bacia (GUERRA et al., 2017; QUEIROZ et al., 2018) provocando a perda da diversidade biológica (BOTTINO et al., 2017; GOMES et al., 2017; SANTOS et al., 2019; SEGURA et al., 2016), além da deposição do rejeito nas áreas atingidas formarem um novo ambiente com atributos químicos e físicos desconhecidos (SILVA et al., 2017), que dificultou o restabelecimento inicial da vegetação.

Esse novo ambiente formado pela deposição do rejeito pode ser denominado de Tecnosolo. Ou seja, trata-se de um ambiente formado por um mosaico complexo de materiais e fatores, sua pedogênese e as suas propriedades são dominadas pela origem técnica dos materiais parentais, com total influência humana na sua constituição, refletindo em sua alta heterogeneidade e diversidade (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006). Segundo Echevarria e Morel (2015) é uma condição comum aos solos formados nos processos de mitigação de áreas após o impacto da atividade de mineração.

Os impactos gerados pela lama, registrado ao longo desses cinco anos após o acidente em Mariana, mostram as dimensões dos danos causados e os desafios para reabilitação das áreas atingidas (CORDEIRO et al., 2019; GUERRA et al., 2017). Portanto, o objetivo desde capítulo foi de demonstrar como os atributos físicos, químicos e biológicos do solo foram afetados pela deposição do rejeito, e seus efeitos nos serviços ecossistêmicos. Em conjunto com os demais capítulos desta importante obra buscamos contribuir com uma melhor compreensão dos danos causados pela deposição do rejeito e possíveis ações para a sua mitigação. Bem como o significado da ocupação vegetal desta região e se isso gerará a retomada ou não de todas as funções ecológicas pré-existentes ao desastre.

2 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO

2.1 Minério de ferro em Mariana

A atividade de mineração na região de Mariana ocorre nas áreas do Complexo Alegria, que pertencente à mineradora Samarco, inserida no Quadrilátero Ferrífero. Essa região é formada por rochas de origem vulcânica e sedimentar, que fazem

parte de uma unidade litológica denominada formação Cauê pertencente ao Grupo Itabira (PEREIRA, 2005). Esse grupo compõem o supergrupo Minas, que tem como principal mineral o itabirito (sílica + óxido de ferro), no qual o minério de ferro se encontra principalmente nas formas de goethita, hematita e magnetita (DORR II, 1964; PEREIRA, 2005). Estas formas apresentam maior teor de ferro (Fe), sendo assim, de maior interesse para mineradoras. Mas esses minerais apresentam também outros metais como manganês (Mn), níquel (Ni), cobre (Cu), chumbo (Pb), cromo (Cr), etc., que podem ter sua disponibilidade alterada em decorrência do processo de moagem do minério, o que permite a quebra de estruturas rochosas, elevando a superfície de contato, podendo ser concentrados no rejeito, o que potencializa o poder de contaminação do mesmo. Na Figura 1 há um resumo da composição química dos principais minerais presentes no Quadrilátero Ferrífero com ênfase nos que estão inseridos no Complexo Alegria.

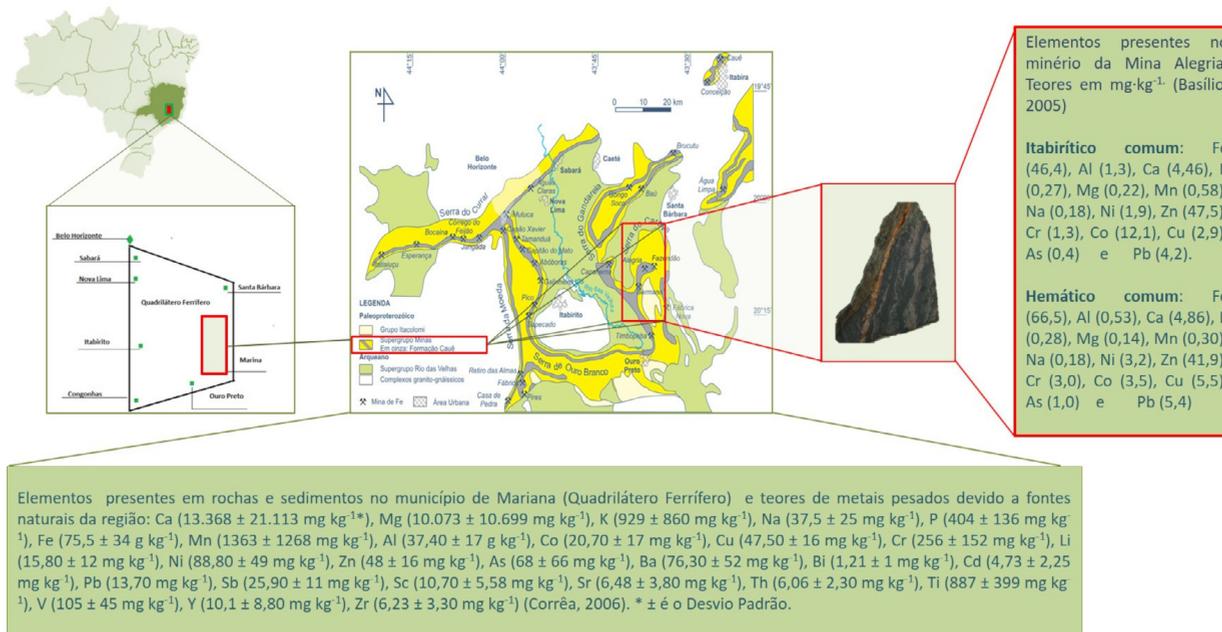


Figura 1. Composição química dos principais elementos presentes nos minerais do Quadrilátero Ferrífero com ênfase nos que estão inseridos no Complexo Alegria.

Fonte: Mapa adaptado de Lobato e Costa (2018).

A goethita (α -FeOOH) é considerada o mais comum óxido de ferro na natureza, de coloração amarelada, composta por aproximadamente 60% de ferro, 30% de oxigênio e 10% de água, pode apresentar Mn em proporção superior a 5 % no Quadrilátero Ferrífero. Além disso, é comum a presença de íons fosfato fortemente adsorvidos a este mineral (GUIMARÃES et al., 2008; NASCIMENTO, 2014).

A hematita é o segundo óxido de ferro mais abundante na natureza sendo comum em solos, rochas metamórficas (itabirito), sedimentares e magmáticas, principalmente em regiões tropicais (OLIVEIRA et al., 2000). Este óxido apresenta diferentes colorações de acordo com o tamanho das partículas, podendo variar de vermelho escuro (partículas muito finas) a cinza. Sua composição química é formada de α -Fe₂O₃, composto por aproximadamente 70% de ferro e 30 % de oxigênio (DANA, 1976). A hematita pode apresentar pequenas quantidades de óxidos de manganês, alumínio, dióxido de silício e titânio como impureza em sua constituição (DEER et al., 1966).

A magnetita é caracterizada por apresentar Fe²⁺ e Fe³⁺ em sua constituição química, tendo sua fórmula descrita Fe₃O₄, e teor de ferro que varia, em itabirito, de 20 a 50 %, com concentrações menores de outros elementos como magnésio (Mg), manganês (Mn), zinco (Zn), alumínio (Al), titânio (Ti), entre outros (DANA, 1976). Este mineral possui coloração cinza escura, sendo de fácil identificação no campo, uma vez que, apresenta propriedades magnéticas (COSTA, 2013; CURI; FRANZMEIER, 1987). Outros minerais como quartzo, caulinita e gibbsita também podem ser observados no Complexo Alegria (NASCIMENTO, 2014).

2.2 Beneficiamento do minério de ferro e geração do rejeito na barragem de Fundão

A escolha do método de extração do minério de ferro está diretamente ligada ao teor de ferro presentes nas jazidas. Dessa forma, o método empregado pela mineradora Samarco consiste em 12 etapas (peneiramento primário, britagem primária, britagem secundária, pré-moagem, moagem primária, deslamagem, flotação mecânica, tank cell, remoagem, flotação e espessamento), das quais os processos em que ocorre a adição de material, irá conseqüentemente compor o rejeito final (MAPA, 2006). Todo o processo está resumido na Figura 2.

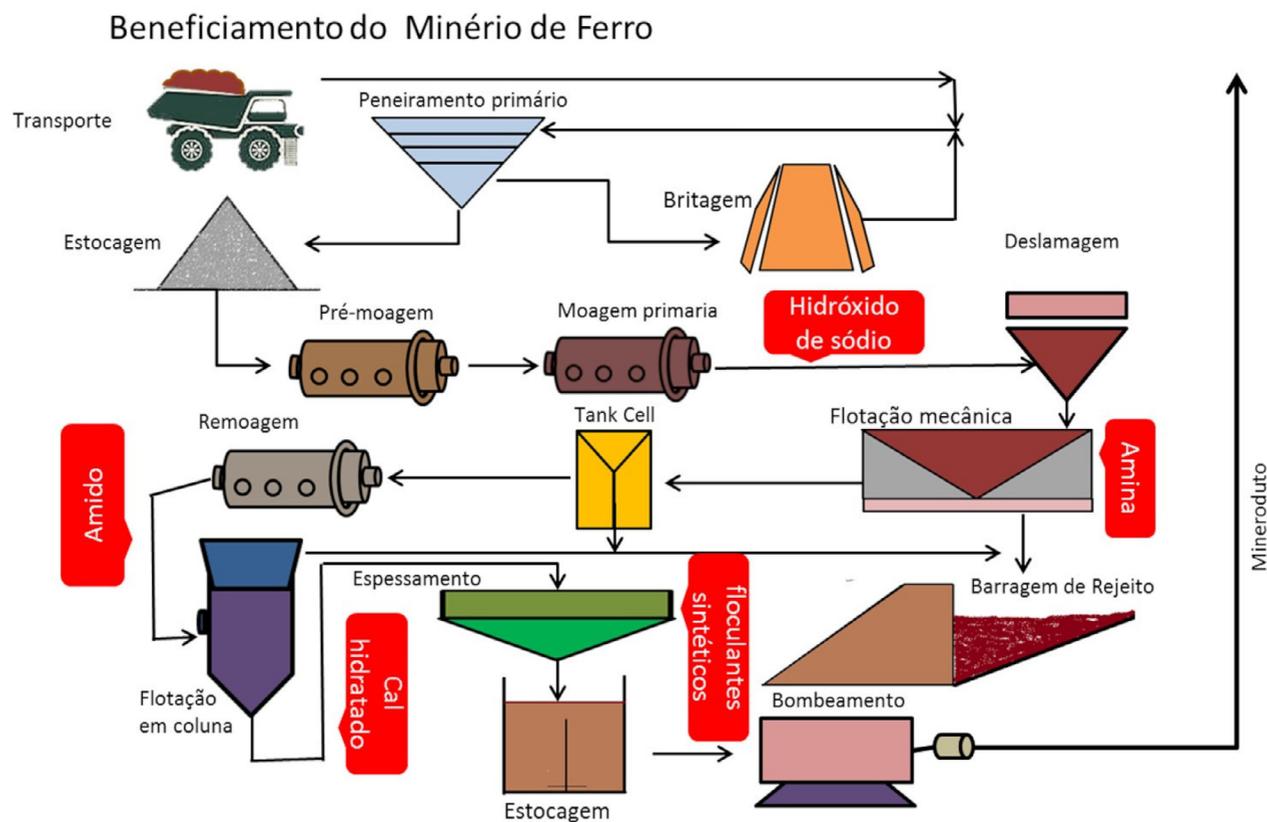


Figura 2. Beneficiamento do minério de ferro e as principais substâncias adicionadas ao processo. Esquema do beneficiamento do minério de ferro.

Fonte: Adaptado Ferreira (2014).

No processo de extração do minério de ferro, a primeira substância adicionada às rochas fragmentadas é o hidróxido de sódio, em seguida, o material é encaminhado a outro processo, no qual, é adicionado a amina (éter monoamina (25%) + éter diaminas (75%)) (LUZ et al., 2010), e antes do material ir ao processo de flotação em coluna é adicionado o amido, e no processo seguinte é adicionado o cal hidratado, a fim de coagular a lama formada. Em seguida é adicionado floculantes sintéticos, com intuito de aumentar a sedimentação das partículas (MAPA, 2006).

Dentre os processos citados, o de flotação é um dos mais importantes na concentração do minério de ferro, uma vez que essa etapa permite a redução dos teores de sílica (MAPA, 2006). Além disso, o processo permite a recuperação de grande quantidade de ferro em minério com baixo teor, diminuindo a quantidade desse elemento nos depósitos de rejeito, o que conseqüentemente, melhora o aproveitamento econômico e diminui os impactos ambientais (MAPA, 2006; RABELO, 1994). No entanto, a adição da amina, necessária para esse processo é de grande preocupação.

As aminas são materiais tóxicos, que quando adicionado em ambientes aquáticos e no solo provocam contaminação (COLLING; RIZZO, 2017). Além disso, acredita-se que essa substância seja carcinogênica e mutagênica (HAUGMO et al., 2009; RAMÍREZ et al., 2015) e quando submetida a processo natural de decomposição ocorre a formação nitritos e nitratos (TEODORO; LEÃO, 2004) que também atuam como substâncias carcinogênicas.

Outro fato importante no processo de flotação é a elevação do pH, mantido em torno de 9,2, a fim de proporcionar condições para dispersão do minério presente na lama (MAPA, 2006).

Ao final do processo, o concentrado de minério de ferro é encaminhado através de mineroduto para o Espírito Santo, na unidade Industrial Ponta Ubu, e o rejeito formado principalmente no processo de flotação é encaminhado para barragem de rejeito.

Após a obtenção do minério de ferro, os resíduos (rejeito) com baixo valor econômico são descartados pela mineradora, porém, estes podem apresentar alto poder de contaminante químico. Esse rejeito é classificado pela mineradora como rejeito fino e/ou grosso de acordo com a granulometria.

Os rejeitos finos também denominados de lama são originados a partir do processo de flotação, que é composto por material extremamente fino, apresentando frações granulométricas correspondentes a silte e argila, e em alguns casos podem apresentar plasticidade (PEREIRA, 2005). Já os rejeitos grosseiros, também chamados de rejeitos granulares, contêm partículas nas frações areia fina a média. Ambos os rejeitos são encaminhados à mesma barragem para decantação, sendo compostos basicamente por quartzo, hematita, goethita e óxido de alumínio em menor proporção, quando o material de origem é o itabirito (PEREIRA, 2005).

A composição química do rejeito varia conforme a composição mineralógica do material de origem. Pires et al. (2003) estimaram a composição de um rejeito de mineração na barragem Germano em: 63,6% goethita; 24,6% hematita, 11,0% quartzo e 6,7% de caulinita. A composição física do material também é variável, em rejeito oriundo da mineração de ferro na mina Alegria, na qual Silva et al. (2006) observaram as seguintes frações: argila 21 g kg⁻¹, silte 122 g kg⁻¹, areia grossa 54 g kg⁻¹, areia fina 729 g kg⁻¹, macroporosidade 38,5% e microporosidade de 7,8%.

2.3 Formação do Tecnosolo após o acidente da barragem de Fundão

Após o rompimento da barragem do Fundão, o rejeito foi distribuído no ambiente de forma aleatória às margens dos rios que compõem a Bacia do rio Doce até o estuário (Figura 3). Nesse ponto, considera-se a mistura de solo mais rejeito oriundo do rompimento da barragem como um Tecnosolo, que se apresenta distinto do solo referência, ou seja, a linha de base antes do acidente, formado pelos solos que não foram atingidos pelo rejeito, ao longo do seu percurso até o Oceano Atlântico. Silva et al. (2017) analisaram as características químicas, físicas e mineralógicas do Tecnosolo às margens do rio Carmo, em que foi identificado um predomínio de areia e silte e baixo teor de argila, além de uma elevada densidade e baixa porosidade do rejeito. Também foi observado um pH alcalino e teores de matéria orgânica, nutrientes e CTC muito baixos. Em relação aos metais pesados disponíveis no rejeito (Zn, cádmio (Cd), Cu, Pb e Ni), estes se encontravam em teores muito baixos, com exceção para o Mn trocável.

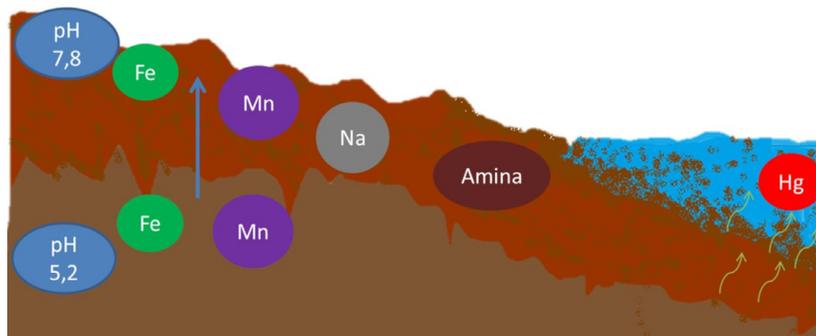


Figura 3. Formação do Tecnosolo após o rompimento da barragem de Fundão em cinco de novembro de 2015.

Fonte: Dos Autores (2020).

Níveis elevados de metais também foram observados em estudo realizado às margens do rio Carmo e rio Doce após o rompimento, em que foram evidenciados níveis mais altos de As (até 3,33 vezes), Mn (4,96), vanádio (V) (1,36) e Zn (1,53) em comparação com valores referências para o estado de Minas Gerais (CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM, 2011; GUERRA et al., 2017).

Os efeitos do rompimento da barragem de rejeito também foram observados na foz do rio Doce no estado do Espírito Santo, apresentando concentrações elevadas de Mn (433 ± 110), Cr ($63,9 \pm 15,1$), Zn ($62,4 \pm 28,4$), Ni ($24,7 \pm 10,4$), Cu ($21,3 \pm 4,6$), Pb ($21,3 \pm 4,6$) e cobalto (Co) ($10,7 \pm 4,8$) em mg kg^{-1} (QUEIROZ et al., 2018). Portanto, houve um enriquecimento desses metais pesados principalmente nas margens das várzeas, no entanto menos de 2% dos metais estavam prontamente disponíveis. Os autores, porém, alertam quanto à expansão da vegetação sobre o rejeito, uma vez que esta pode aumentar a atividade microbiana e exsudatos radiculares e, com isso, aumentar a solubilidade do ferro, ou até mesmo promover a formação de complexos organometálicos e favorecer o aumento da biodisponibilidade desses metais pesados contaminando o solo e a água.

A elevação do teor total de metal pesado também foi verificada por Oliveira et al. (2017), ao comparar análises de metais em solos de estuários realizada 11 dias antes da chegada do rejeito na foz do rio Doce, com coletas realizadas em intervalos de dois dias após a chegada da lama, identificando aumentos nas concentrações de Cr (5x), Fe (3x), alumínio (Al) (3x), Zn (2x) e bário (Ba) (2x).

Todavia, o rejeito de mineração de ferro pode apresentar variações quanto a sua composição e biodisponibilidade, e isto exige certa atenção, pois com o passar dos anos a constante presença de metais pesados, pode fazer com que este material possa apresentar propriedades prejudiciais a diversos habitats e a própria saúde humana e animal, além das relações biológicas entre as espécies, os serviços ambientais e a cadeia alimentar.

3 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

3.1 Definição dos serviços ecossistêmicos

Os serviços ecossistêmicos são os processos pelos quais o meio ambiente produz recursos que muitas vezes associamos como permanentes, como água limpa, habitat, madeira, polinização, dispersão de sementes, etc. Esses serviços são as contribuições diretas ou indiretas do ecossistema para a sobrevivência, a qualidade de vida e o bem-estar humano e de todo ser vivo do planeta (THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODIVERSITY - TEEB, 2010). O Millennium Ecosystem Assessment – MEA (2005) definiu simplesmente como “os benefícios que os humanos recebem da natureza”.

Bens e serviços ecossistêmicos, como a provisão de alimentos e a ciclagem de nutrientes, representam os benefícios que os seres vivos obtêm, direta ou indiretamente, dos ecossistemas, sendo denominados como serviços ecossistêmicos (COSTANZA et al., 1997). Os serviços ecossistêmicos podem ser categorizados em quatro tipos principais: Serviços de provisão, Serviços de regulação, Serviços de suporte e Serviços culturais (Figura 4).

Muitos estudos tiveram o objetivo de estimar os valores dos serviços ecossistêmicos, uma vez que as funções por eles desempenhadas são críticas para o funcionamento do sistema de suporte à vida, mas o estudo realizado por Costanza et al. (1997) foi o primeiro a reunir todas as informações no intuito de estimar um valor econômico desses processos por ano. Os valores econômicos dos 17 principais serviços ecossistêmicos para 16 biomas, com base em estudos publicados, são estimados na faixa de US\$ 16 – 54 trilhões por ano, com uma média de US\$ 33 trilhões por ano (COSTANZA et al., 1997). Costanza et al. (2014) atualizaram os cálculos em relação ao câmbio e estimaram esses mesmos valores em US\$ 124,8 trilhões por ano em 2011.



Figura 4. Os Serviços Ecossistêmicos.

Fonte: Adaptação das definições do TEEB (2010) e o COMMON INTERNATIONAL CLASSIFICATION OF ECOSYSTEM SERVICES – CICES (2011).

Apesar da importância global dos solos nos processos reguladores ambientais, além da provisão de recursos, Hewitt et al. (2015) mencionaram que esse ainda é um componente negligenciado em estudos de serviços ecossistêmicos e nas decisões de nível político sobre o meio ambiente. Os serviços ecossistêmicos providos pelo solo dependem das suas propriedades e de sua interação, sendo influenciados principalmente pelo seu uso e manejo (ADHIKARI; HARTEMINK, 2016). O conhecimento sobre a diversidade e a funcionalidade do solo é fundamental para a segurança da vida, sendo que os vínculos entre solo e os serviços ecossistêmicos devem ser reconhecidos para o desenvolvimento sustentável, bem-estar humano e desenvolvimento econômico (BOUMA, 2014; MCBRATNEY; FIELD; KOCH, 2014).

A agricultura, urbanização e mineração estão entre os usos da terra que mais modificam as paisagens e exercem supressão dos serviços ecossistêmicos (SONTER et al., 2014). Em especial, a mineração exerce papel crucial nas modificações da paisagem e na diminuição dos serviços ecossistêmicos locais, pois é uma atividade antrópica que atua sobre o próprio local e em ecossistemas adjacentes (EDWARDS, 2014; GASTAUER et al., 2018; HUANG; BAUMGARTL; MULLIGAN, 2012; SILVA et al., 2018; SONTER et al., 2017).

A expansão das operações de mineração, pela crescente demanda resulta em uma maior produção e na necessidade de expansão das instalações de armazenamento de rejeitos, que se estende além da própria região de mineração (SONTER et al., 2014). E apesar da grande importância das regiões com alta atividade de mineração, ainda há poucos trabalhos que elucidam os processos de mudança de uso da terra nas regiões mineradas e seus reflexos nos serviços ecossistêmicos (SONTER et al., 2017). Assim como, pouco se sabe dos reais efeitos do processo de mitigação em locais direta e indiretamente afetados pela mineração.

O monitoramento adequado do impacto ecológico nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana – MG é essencial, devendo-se dar uma grande atenção aos serviços ecológicos prestados por este solo formado, ou seja, da mistura entre solo + rejeito que pode ser denominado de “Tecnossolo”. Costanza et al. (2014) definem que mesmo sem qualquer avaliação subsequente, os serviços derivados de um ecossistema devem ser enumerados para auxiliar no entendimento de todos os impactos potenciais de um determinado evento. Isso ajuda a tornar a análise dos sistemas ecológicos mais transparentes, auxiliando aos tomadores de decisão as melhores opções a serem seguidas. O desafio futuro, para pesquisa e para as políticas públicas será a avaliação de processos de remediação que devem ir além da área a ser restaurada

(GASTAUER et al., 2018; SONTER et al., 2014). Nesse sentido, o Tecnosolo formado pela deposição do rejeito oriundo da barragem de Fundão deve ser monitorado avaliando o avanço dos principais serviços ecossistêmico nesse novo ambiente pós acidente. É importante verificar se há ou não recuperação desses serviços, não apenas utilizar a revegetação como um indicativo de recuperação do ecossistema, uma vez que ambiente é muito complexo e inter-relacionado.

3.2 Reabilitação ecológica dos serviços ecossistêmicos

As atividades de mineração interferem na paisagem de maneira constante, gerando alterações em extensas áreas, impactando os ecossistemas e contaminando o solo, afetando a diversidade vegetal e a microbiota do solo, o que compromete o equilíbrio ecológico e consequentemente a saúde humana (AIRES et al., 2018; CLAASSENS et al., 2005, 2008).

Dentre as estratégias utilizadas para reabilitação de áreas mineradas, a prática de revegetação é considerada um dos procedimentos mais eficazes por ser barato e de fácil aplicação, utilizando espécies nativas e/ou exóticas nesse processo (FAUCON; HOUBEN; LAMBERS, 2017; MATIAS et al., 2009; PENG et al., 2009). Além de recompor as comunidades vegetais, a revegetação é importante também na recuperação da diversidade das comunidades microbianas do solo (ESCOBAR et al., 2015; FINKENBEIN et al., 2013; QUADROS et al., 2016). O estabelecimento de uma cobertura vegetal de crescimento rápido, robusta e permanente, que apresente uma alta funcionalidade no ecossistema, é a melhor estratégia para a reabilitação de uma área degradada. Porém, os serviços ecossistêmicos dessa área só são reparados num médio a longo prazo (COURTNEY; HARRINGTON; BYRNE, 2013).

A revegetação em áreas após a mineração, denominada de fitoremediação, é um método adequado para estabilizar eficazmente a superfície dos rejeitos, diminuindo assim a erosão e a contaminação do solo e de corpos d'água subterrâneos, além de exercer influência, modificando a paisagem e contribuindo para a fixação de CO₂ atmosférico, o aumento da biodiversidade acima e abaixo do solo, a produção de energia, entre outros serviços ecossistêmicos (THIJS et al., 2017; VARENNE; CUNHA-QUEDA; QU, 2010). O termo fitorremediação, derivado do grego *phyto* (planta), e latim *remedium* (cura ou remédio), apareceu pela primeira vez na literatura no início dos anos 90, em um artigo de Cunningham e Berti (1993). Trata-se de um sistema de desintoxicação do solo, que favorece a recomposição do ecossistema e o processo de sucessão ecológica, uma vez que a planta funciona também como um fitoextrator de metais pesados, contaminantes comuns em áreas após a mineração (CARRENHO; ALVES; SANTOS, 2018).

Entre os principais fatores que limitam a revegetação dos rejeitos são a ausência ou os níveis muito baixos de matéria orgânica e nutrientes, contaminantes químicos, como os metais pesados, e as propriedades físicas que fazem com que haja uma alta variabilidade no tamanho das partículas e na distribuição dos poros, levando a altas densidades, selamento superficial e endurecimento do rejeito e conseqüentemente a baixa capacidade de retenção de água (ALMEIDA et al., 2018; BATISTA et al., 2020; MARQUES et al., 2017; QUEIROZ et al., 2018; SANTOS et al., 2019; SILVA; FERREIRA; SCOTTI, 2015). Para que haja uma reabilitação efetiva são necessárias ações para correção dos atributos químicos, físicos e biológicos do Tecno solo, proporcionando um ambiente mais equilibrado para o estabelecimento da vegetação (JAIN et al., 2016; MELGAR-RAMÍREZ et al., 2012; SÁNCHEZ et al., 2018).

Além disso, a utilização de plantas tolerantes a metais e com capacidade de acumulá-los pode ser uma estratégia interessante para o processo de reabilitação do solo (CARRENHO; ALVES; SANTOS, 2018). Do ponto de vista da reabilitação e da estabilização das áreas mineradas, as plantas que têm capacidade de absorver e acumular grandes quantidades de metais são as mais desejáveis, porque diminuem a disponibilidade dos metais no solo, sendo relatada a capacidade de maior acúmulo nas raízes quando comparada a parte aérea (YANG et al., 2010). O estabelecimento de uma cobertura do solo bem-sucedida, com plantas de rápido crescimento, reduz a erosão, aumenta a estabilidade da superfície, incorpora carbono no solo, contribuindo com a sucessão ecológica (ESCOBAR et al., 2015; QUADROS et al., 2016).

Assim deve-se observar que a revegetação não necessariamente indica que o ambiente esteja exercendo seus serviços ecossistêmicos, dando uma falsa impressão de que houve reabilitação dos ambientes modificados pelos rejeitos de mineração. A recuperação ambiental exige um olhar mais acurado, que deve ir além da vegetação.

SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NO TECNO SOLO FORMADO APÓS O ACIDENTE

Apesar do incremento de metais pesados na bacia do rio Doce, conforme já relatado por alguns autores após o rompimento da barragem (GOMES et al., 2017; GUERRA et al., 2017), a presença desses elementos químicos pode ocorrer de forma natural, sendo identificada em algumas regiões, a presença de metais pesados totais em valores superiores aos

estabelecidos para o estado de Minas Gerais (CORRÊA, 2006; COSTA et al., 2019; QUEIROZ et al., 2018). Dessa forma, é importante destacar, que concentrações médias totais de metais pesados no solo da Bacia do rio Doce podem apresentar valores de até 67 vezes superiores aos níveis médios registrados (DE SOUZA et al., 2015; GUEVARA et al., 2018). Outro fato preocupante é o rejeito ter atingido os rios que compõem a bacia do rio Doce que já se encontravam em estágio de degradação devido ao lançamento diário de esgoto sem tratamento e demais atividades antropogênicas, como a mineração clandestina (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2016; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2015; PASSOS et al., 2017).

O revolvimento dos sedimentos depositados a anos no leito do rio Doce proporcionou a suspensão de metais pesados oriundos principalmente da mineração clandestina (garimpo), que desde o século XVIII, vem ocorrendo e utilizando mercúrio na extração de ouro. O maior risco quanto à presença de mercúrio (Hg) nos rios é a entrada desse elemento na cadeia trófica, que muitas vezes, pode ocorrer através da contaminação de peixes, e estes podem vir a ser consumidos por seres humanos ou animais causando intoxicação (ALLOWAY, 2013; SILVA; FRUCHTENGARTEN, 2005).

Dessa forma, a separação de qual foi o principal fator que elevou os níveis de metais pesados nos rios ainda não é clara. Porém, a necessidade de recuperação desses é evidente. O rejeito ampliou o problema de degradação na Bacia do rio Doce, não só na contaminação dos rios, mas também dos solos, atingindo até mesmo áreas agricultáveis, elevando ainda mais a preocupação quanto à entrada de metais pesados, na cadeia trófica (EMBRAPA 2015; FELIPPE, 2016).

Outro fator de contaminação importante e intrínseco ao rejeito oriundo da barragem de Fundão é a presença da amina. Como já relatado, as eteraminas são substâncias adicionadas ao minério, durante o processo de extração do ferro, a qual apresentou concentrações que variaram de 3,70 a 23,88 mg L⁻¹ em rejeito de mineração (ARAÚJO et al., 2010).

Em monitoramento de degradabilidade das aminas em resíduo da flotação na Samarco, foi observado que em 12 dias de monitoramento, a quantidade de eteramina diminuiu em 85%, por biodegradação e transformação da molécula, e após 21 dias houve a estabilização da eteramina, sendo mantida a uma concentração de 2,1 mg L⁻¹ (CAVALLIERI, 2011). No entanto, não se tem um monitoramento da concentração efetiva dessa substância química no Tecno solo, localizado as margens dos rios afetados pela deposição de rejeito de Fundão.

Dessa forma, após o rompimento, a eteramina foi identificada em vários pontos de Barra Longa e Bento Rodrigues, e comparada a pontos em que não foram atingidos pelo rejeito, demonstrando a presença de eteramina juntamente com a elevação de sódio (Na) (SANTOS et al., 2019), mesmo após 3 anos do rompimento da barragem. A eteramina e Na são tidos como prejudiciais a vários organismos aquáticos, plantas e microrganismos no solo (FAUBE, 1986; GARCÍA; CAMPOS; RIBOSA, 2007; GIGON; RORISON, 1972; NEWSOME et al., 1991; ROOSTA; SCHJOERRING, 2007; SANTOS et al., 2019; SCHULTZ et al., 1991).

O Na é o principal agente dispersante utilizado no processamento do minério, e no Tecno solo também apresenta esse aumento na dispersão de partículas, o que favorece a instabilidade do solo, contribui para a inibição do crescimento de plantas e pode, até mesmo, levar a mortalidade. (KIRKBY, 1968; ROOSTA; SCHJOERRING, 2007). Além disso, o excesso de Na pode elevar a densidade do solo, acarretando a redução da infiltração de água e tornando-o mais erodível e infértil (HALLIWELL; BARLOW; NASH, 2001). Além de ocasionar o escoamento superficial e a contaminação dos cursos da água com sedimentos.

Santos et al. (2019) em seus estudos, sugerem que as substâncias usadas no processo de extração do ferro (hidróxido de sódio e amina) podem explicar os sintomas e mortalidade de plantas observada no campo, e contribuem para o baixa resiliência e perda de biodiversidade, e conseqüentemente efeito nos serviços ecossistêmicos. Indicando que os processos de estruturação do solo, aumento da porosidade deverão levar um tempo superior ao de áreas antropizadas dada ao perfil do rejeito. Neste sentido observa-se que os benefícios da revegetação sobre os atributos do solo demandarão mais tempo do que em áreas sem a presença de Na.

4.1 Características físicas e químicas do Tecno solo

Dentre os parâmetros químicos do Tecno solo, o valor de pH é o que apresenta a maior discrepância em relação ao solo referência, além dos teores de matéria orgânica e os teores totais de metais pesados (Tabela 1). A concentração hidrogeniônica no Tecno solo é por volta de duzentas vezes maior do que a do solo referência. Isto se justifica pela presença de bases fortes (hidróxido de sódio) e fracas (eteraminas) na extração do minério de ferro. Após 3 anos e meio do rompimento da barragem (coleta em fevereiro de 2019) foram poucas as alterações nesses parâmetros, o que indica um efeito prejudicial sobre a recuperação física do solo, dada pelo efeito dos dispersantes que continuam atuando. Este fato imprime a necessidade de estratégias mais eficazes no processo de reabilitação.

Tabela 1. Análise física e química (teores totais e disponíveis de metais) do solo referência (linha de base) e do Tecnosolo formado após a deposição do rejeito as margens do Rio Gualaxo do Norte em Paracatu de Baixo, Mariana - MG. [Elementos disponíveis: K, P, Ca, Mg, Al; atributos de fertilidade: acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de bases (V), saturação de alumínio (m); matéria orgânica (M.O); fósforo remanescente (P-Rem); densidade do solo (Ds); densidade de partículas (Dp); porosidade total (Pt)]. Colocar no rodapé: pH em água (1:2,5). P, K, Fe, Zn, Mn, Ni, Cr, Pb, As e Cu extraídos por solução de Mehlich-1 (MEHLICH, 1953). P Remanescente (P-rem) (ALVAREZ; FONSECA, 1990). Ca, Mg e Al extraídos por KCl 1 mol L⁻¹ (MCLEAN et al., 1958). Acidez Potencial (H+Al) por extrator SMP (SHOEMAKER; MCLEAN; PRATT, 1961). S extraído por fosfato monocálcio em ácido acético (HOEFT; WALSH; KENNEY, 1973). Matéria orgânica do solo (M.O.) por oxidação de dicromato de potássio em meio ácido (WALKLEY; BLACK, 1934). Textura pelo método de Bouyoucos (BOUYOUCOS, 1951).

		Tecnossolo (2019)	Solo Referência (2019)	
Atributos Químicos	Disponíveis	pH (H ₂ O)	7,50	5,32
		K ⁺ (mg kg ⁻¹)	41,41	104,19
		P (mg kg ⁻¹)	5,50	1,49
		S (mg kg ⁻¹)	11,86	9,66
		N (g kg ⁻¹)	0,66	1,89
		Na (mg kg ⁻¹)	31,23	2,27
		Ca (cmol _c kg ⁻¹)	1,51	1,64
		Mg (cmol _c kg ⁻¹)	0,10	0,55
		Al (cmol _c kg ⁻¹)	0,03	1,32
		H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	0,84	3,54
		SB (cmol _c kg ⁻¹)	1,73	2,46
		CTC (cmol _c kg ⁻¹)	2,56	5,99
		V (%)	67,29	41,01
		m (%)	1,72	51,36
		M.O. (dag kg ⁻¹)	0,88	2,31
		P-Rem (mg L ⁻¹)	40,11	47,71
Fe (mg kg ⁻¹)	267,82	65,39		

Continua ...

Tabela 1. Continuação.

		Tecnossolo (2019)	Solo Referência (2019)	
Atributos Químicos	Disponíveis	Mn (mg kg ⁻¹)	157,03	107,04
		Cu (mg kg ⁻¹)	0,79	0,14
		Zn (mg kg ⁻¹)	0,8	2,92
	Totais	Fe (mg kg ⁻¹)	404,24	2706,33
		Mn (mg kg ⁻¹)	187,11	107,07
		Cu (mg kg ⁻¹)	1,09	0,6
		Zn (mg kg ⁻¹)	2,22	20,51
		Ni (mg kg ⁻¹)	0,78	2,33
		Cr (mg kg ⁻¹)	1,07	6,65
		Cd (mg kg ⁻¹)	0,06	0,02
		Pb (mg kg ⁻¹)	0,86	35,48
	As (µg kg ⁻¹)	10,49	20,41	
Atributos Físicos		Ds (Mg m ⁻³)	1,95	1,17
		Dp (Mg m ⁻³)	3,01	2,53
		Pt (m ³ m ⁻³)	0,35	0,54
		Areia (g kg ⁻¹)	540	620
		Silte (g kg ⁻¹)	390	180
		Argila (g kg ⁻¹)	70	200
		Textura	Média	Média

Fonte: Dos Autores (2020).

No ano de 2013 a Samarco utilizou aproximadamente 3.000 toneladas de aminas no seu processo minerário (SAMARCO, 2013). Diante destes dados, mesmo sabendo que o processo de flotação reversa deve se dar em meio alcalino (com adição de

NaOH) é notório o fato da resistência da alteração do pH do Tecnosolo com o passar dos anos. Essa resistência temporal se justifica, pois as eteraminas são bases fracas e possuem efeito tamponante no solo.

Também pode-se observar as baixas concentrações de metais pesados disponíveis, exceto para Fe, Mn e As. Estas elevadas concentrações devem-se ao próprio material de origem, como descrito no início deste capítulo, dos minérios de ferro da região de Mariana, formados quase que exclusivamente por Itabirito que naturalmente contém esses metais em sua constituição.

A primeira evidência física que diferencia o solo referência do Tecnosolo é a densidade. O solo considerado referência apresenta uma densidade (D_s) de $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$, já o Tecnosolo apresenta um valor de $1,95 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 1). A elevação de quase 70% no valor da densidade do material evidencia a ausência de estrutura e, conseqüentemente, afeta diretamente a porosidade no Tecnosolo. A análise da densidade considera a presença de espaço poroso dentro da matriz analisada (TEIXEIRA et al., 2017) e como o Tecnosolo foi classificado de textura arenosa, tende apresentar D_s em torno de 1,30 a $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$ (BRADY; WEIL, 2013). Diante destes valores constata-se que o Tecnosolo, de maneira geral, apresenta elevado grau de compactação e baixa porosidade total. Tal constatação é ratificada pelos valores de porosidade total calculada (P_t) apresentados na Tabela 1. É regra que solos compactados ou adensados, com baixa porosidade total e desestruturados apresentarão severas restrições ao desenvolvimento do sistema radicular de plantas e principalmente a dinâmica da água no solo como a infiltração, armazenamento e redistribuição.

Os dados de densidade de partículas mostram que o Tecnosolo é mais rico em minerais que apresentam densidade elevada, especificamente de minérios ricos em ferro, como a hematita ($d= 5,2 \text{ g cm}^{-3}$) e a goethita ($d= 3,3 - 4,3 \text{ g cm}^{-3}$), argilominerais presentes em quantidades consideráveis. Estes resultados deixam claro que a microbiota deste solo apresentará condições físicas restritivas ao seu desenvolvimento. Além disso, a decomposição das plantas “soterradas” poderá, ao longo dos anos, apresentar alterações uma vez que se desenvolviam no horizonte superficial do solo e agora se encontram no subsolo do Tecnosolo e receberá em breve a carga de Na e amina das camadas superficiais.

Nota-se que solos degradados apresentaram uma recuperação física, como pode se observar em Alves et al. (2012), após 13 anos de manejo com plantas, no entanto essa recuperação de atributos físicos foi apenas na camada de 0-0,10m. A composição granulométrica dos materiais analisados mostra que, mesmo apresentando classificações texturais iguais (SANTOS

et al., 2019), houve uma elevação significativa na quantidade de silte presente no Tecnosolo. Esta fração granulométrica teve sua quantidade dobrada nas amostras de Tecnosolo analisadas em relação ao solo referência. O enriquecimento da fração silte reduz a expressão de diversas características desejáveis no Tecnosolo como a capacidade de troca catiônica que tem relação direta com a presença de argilominerais e matéria orgânica no solo. O entupimento dos poros provoca selamento superficial e endurecimento da camada do solo, quando seco, dificultando assim o processo de infiltração de água, escoamento superficial e principalmente contaminando os cursos d'água com sedimentos da mineração de ferro conforme mostrado na Figura 5 o que afeta diretamente os serviços ecossistêmicos.

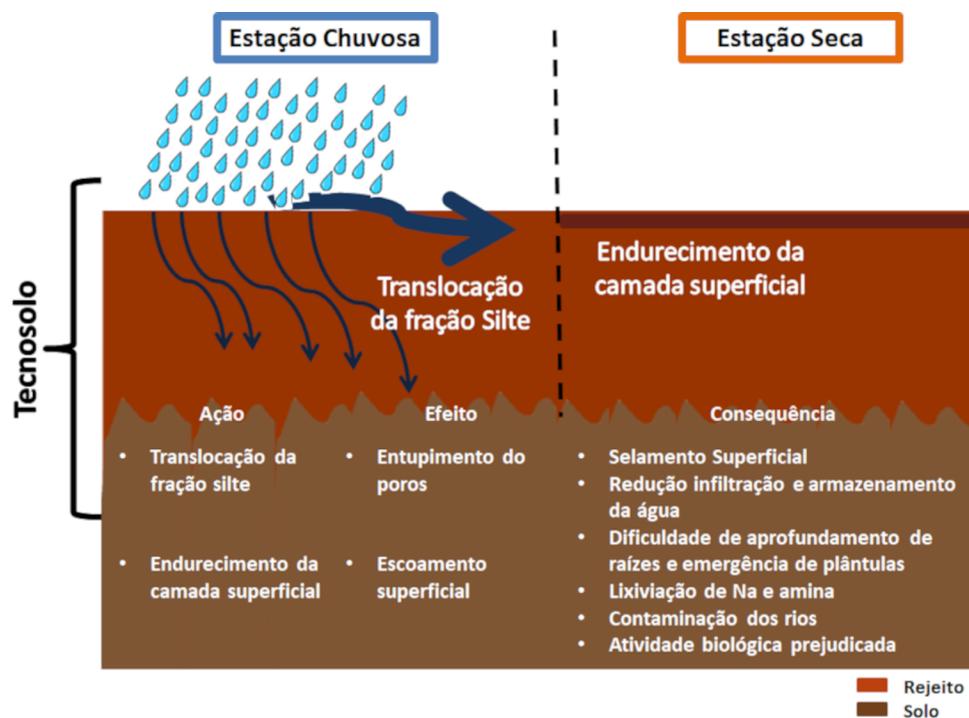


Figura 5. Comportamento físico do Tecnosolo formado após o acidente da Barragem de Fundão na Bacia do Rio Doce.

Fonte: Dos Autores (2020).

4.2 Características biológicas do Tecnosolo

De todos os grupos de organismos edáficos, os microrganismos formam o grupo mais abundante, diverso e funcionalmente importante. São essenciais para muitos processos bioquímicos e ecológicos que garantem a manutenção das funções do ecossistema (SHOEMAKER; LOCEY; LENNON, 2017). Nesse sentido, os microrganismos são os que mais sofrem com os processos que alteram o ambiente natural. Assim, os microrganismos podem funcionar como bons indicadores para o monitoramento das funções dos ecossistemas degradados, como aqueles afetados após o acidente na barragem de Fundão, pois estão em íntima associação com mudanças nas condições físico-químicas de seu ambiente físico (MENDEZ; MAIER, 2008; WANG et al., 2012). Além disso, essa classe de indicadores é de fundamental importância para o monitoramento do sucesso de práticas de reabilitação, pois são ferramentas úteis para medir o grau de resistência e resiliência do ecossistema (LUDWIG; WILMES; SCHRADER, 2018).

O retorno das atividades das comunidades microbianas em áreas degradadas garante o sucesso da recuperação dessas áreas devido ao seu papel primordial na decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, estabelecimento de plantas, transformações geoquímicas e formação do solo (THAVAMANI et al., 2017). Deve-se atentar que este processo é lento em solos antropizados, e nesse Tecnosolo pode-se observar um tempo maior, uma vez que, para a reabilitação das funções ecológicas da microbiota, previamente ou concomitantemente, é necessária a reabilitação das características físicas e química deste Tecnosolo.

Em áreas pós-mineradas em processo de reabilitação, a vegetação tem efeito positivo na melhoria de funções e processos microbianos do solo por meio das entradas de carbono (C), resultando em aumento na biomassa e atividade das comunidades microbianas (MUÑOZ-ROJAS et al., 2016). Estudos revelaram aumento gradual na biomassa microbiana do solo à medida que ocorre o desenvolvimento da vegetação e que o tempo de revegetação avança (CHODAK; NIKLIŃSKA, 2010; HELINGEROVÁ; FROUZ; ŠANTRŮČKOVÁ, 2010; URBANOVÁ et al., 2011). Esta relação é coerente com o fato de que ao transformarem os detritos orgânicos, os microrganismos produzem substratos solúveis para a assimilação e síntese de sua própria biomassa (KALLENBACH; FREY; GRANDY, 2016; SINSABAUGH; SHAH, 2012).

Entretanto, em áreas impactadas pela deposição de rejeito próximas ao município de Mariana, MG, observou-se efeitos negativos sobre populações de fungos e bactérias (SEGURA et al., 2016), também houve forte inibição da biomassa microbiana (BMS) quando comparada aos locais preservados (BATISTA et al., 2020; SANTOS et al., 2019). Similarmente, reduções em diversos grupos funcionais (e.g., amonificadores, nitrificadores, fixadores de N₂, denitrificadores) foram observadas nas áreas com deposição de rejeito após o acidente (ARAGÃO et al., 2017; KEMMELMEIER et al., 2017; LOPEZ et al., 2017; VEGA et al., 2017). Tal declínio foi relacionado a um aumento na citotoxicidade e a danos no DNA microbiano, de amostras de áreas onde ocorreu a deposição de rejeito, podendo ser atribuído à presença de contaminantes como metais pesados (SEGURA et al., 2016) e a presença de eteraminas (SANTOS et al., 2019). A presença de metais pesados pode suprimir ou mesmo eliminar membros sensíveis da população microbiana do solo, incluindo membros de grupos funcionais, reduzindo sua atividade, diversidade e modificando sua estrutura (QUADROS et al., 2016; SANTOS et al., 2016), e principalmente afetando os serviços ecossistêmicos.

Estudos conduzidos por Batista et al. (2020) relata reduções acentuadas na biomassa microbiana e na sua atividade em áreas afetadas pela deposição de rejeito, apresentando reduções de até 80% quando comparadas às áreas sem impacto, mesmo após 2 anos do rompimento da barragem. Esses mesmos autores relatam ainda o efeito negativo na atividade enzimática, seguindo a mesma tendência da biomassa microbiana, com reduções acentuadas na atividade da arilsulfatase, β -glicosidase e na fosfatase ácida e alcalina. Esses resultados obtidos estão associados principalmente às condições físico-químicas desfavoráveis, como descrita nesse capítulo. Além de uma baixa disponibilidade de matéria orgânica e de nutrientes nessas áreas com deposição de rejeito (BATISTA et al., 2020; SANTOS et al., 2019).

A BMS representa o tamanho do compartimento microbiano do solo (i.e., a massa de actinobactérias, bactérias e fungos) (JENKINSON, 1976) e por incluir uma gama diversificada de microrganismos é fundamental para as transformações da matéria orgânica (MO), contribuindo diretamente para o acúmulo de frações estáveis de carbono orgânico no solo (COS) (KALLENBACH; FREY; GRANDY, 2016; LANGE et al., 2015; MILTNER et al., 2012). Além disso, atua como força motriz que impulsiona a decomposição/mineralização, ciclagem biogeoquímica, estruturação do solo e simbioses radiculares (DELGADO-BAQUERIZO et al., 2016). Portanto a sua redução afeta diretamente os serviços ecossistêmicos e a reabilitação das áreas afetadas pela deposição do rejeito.

Em levantamento de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) verificou-se que 42% das espécies de FMAs foram compartilhadas entre as áreas de referência e o Tecnossolo, demonstrando que estas espécies são capazes de sobreviver e colonizar as áreas com Tecnossolo (KEMMELMEIER, 2018). O reestabelecimento da vegetação nas áreas afetadas pela deposição de rejeito pode auxiliar na redução dos processos erosivos e amenizar impactos ambientais. Nesse contexto, a presença de uma comunidade biodiversa de FMAs pode contribuir no estabelecimento da vegetação e no processo de sucessão ecológica de espécies vegetais.

4.3 Utilização das ferramentas metagenômicas no estudo dos serviços ecossistêmicos

As funções dos ecossistemas estão diretamente relacionadas à estrutura e composição das comunidades microbianas do solo (FERNANDES et al., 2018; FIERER et al., 2012; OKA; UCHIDA, 2018; O'NEILL et al., 2009; TAKETANI et al., 2013). Um dos gargalos nos estudos de ecologia microbiana é o fato de apenas 1% do total dos microrganismos serem cultivados, já que não se conhece um meio de cultura universal com todos os componentes requerido pela maioria dos microrganismos (TORSVIK; GOKSOYR; DAAE, 1990; WHITMAN; COLEMAN; WIEBE, 1998).

Utilizando a metagenômica e o sequenciamento na plataforma Illumina MiSeq para obter informações sobre a composição bacteriana do Tecnossolo, foram coletadas amostras de solo da área referência e amostras do Tecnossolo após 2 anos do rompimento da barragem. Foram consideradas as 20 e 50 unidades taxonômicas operacionais (OTUs) mais abundantes para representar a composição das comunidades bacterianas em nível de Classe e Gênero, respectivamente (Figuras 6 e 7).

Os resultados, mostram que a abundância das OTUs, principalmente de *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Gemmatimonadetes*, *Alphaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria*, e *Verrucomicrobiae* foram significativamente alteradas pela deposição do rejeito de mineração de ferro (Figuras 6 e 7). Essas alterações na composição das comunidades microbianas, principalmente, dos representantes do filo Proteobacteria, foram bem acentuadas, de modo que se observou maior abundância de OTUs das Alphaproteobacteria nas áreas de Mata e Gammaproteobacteria nas áreas impactadas pelo rejeito.

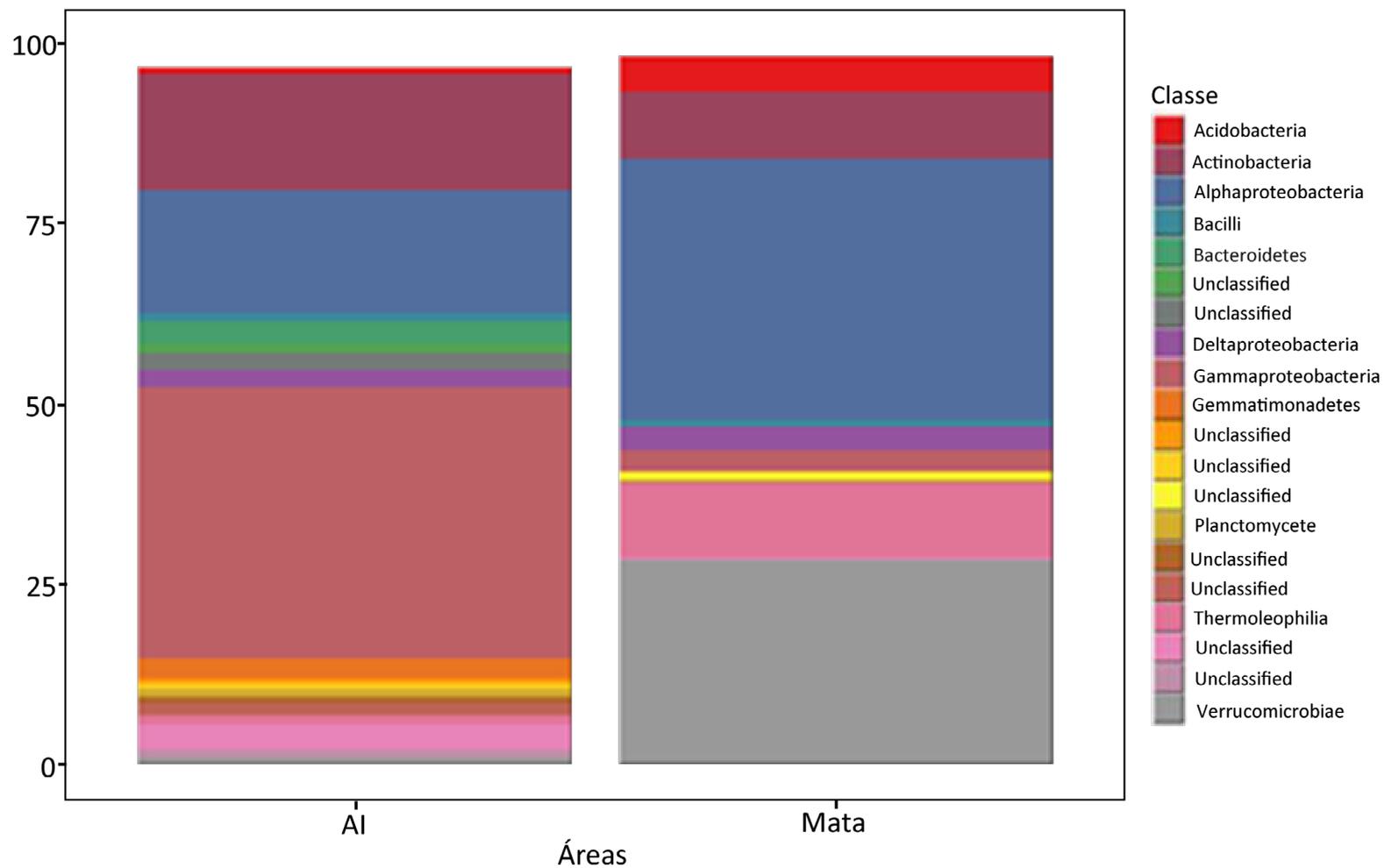


Figura 6. Composição taxonômica em nível de Classe, a partir das 20 OTUs mais abundantes nas áreas impactadas pelo rejeito de mineração de ferro (AI) e na área de Mata, que não foi atingida pelo rejeito.

Fonte: Dos Autores (2020).

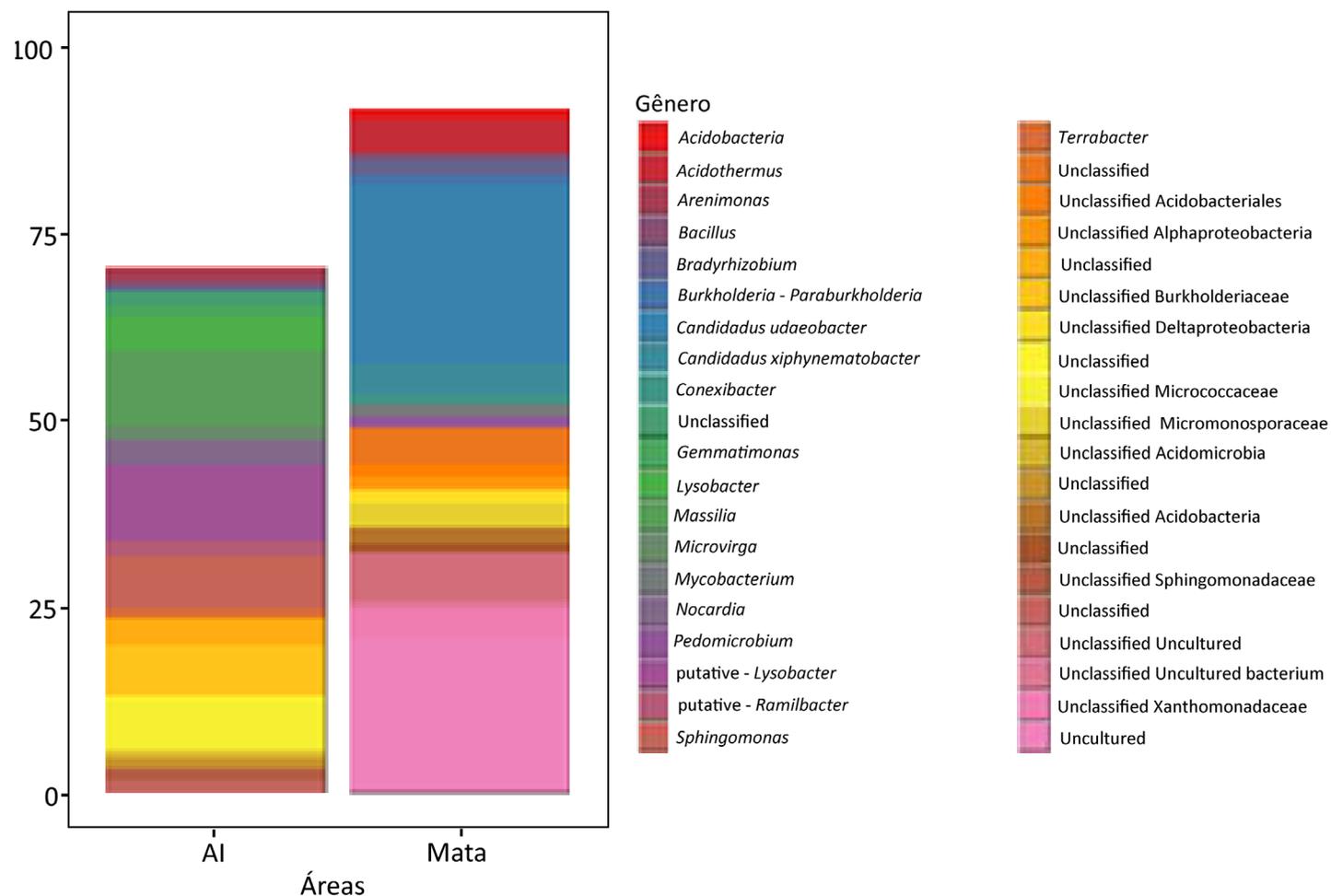


Figura 7. Composição taxonômica em nível de Gênero, a partir das 40 OTUs mais abundantes nas áreas impactadas pelo rejeito de mineração de ferro (AI) e na área de Mata, que não foi atingida pelo rejeito.

Fonte: Dos Autores (2020).

As Proteobacteria são gram-negativas e estão envolvidas na maioria dos processos bioquímicos que ocorrem no solo, correspondendo à maior e mais versátil divisão dos procariotos (GUPTA, 2000). No solo, são encontradas principalmente nas camadas superficiais e estão relacionadas a processos de fixação de nitrogênio, oxidação do ferro e enxofre. Em profundidades, essas funções são desempenhadas por outros grupos, como as *Actinobacteria* que foram aumentadas com a deposição do rejeito de mineração (Figura 7).

Espécies do gênero *Bradyrhizobium*, por exemplo, encontram-se dentro da classe *Alphaproteobacteria*, e estão envolvidas no ciclo do nitrogênio e sua abundância foi ligeiramente reduzida no Tecnosolo. Já os gêneros *Microvirga* e *Lysobacter*, envolvidos no processo de fixação de nitrogênio e agente de controle biológico no solo, respectivamente (MSADDAK et al., 2017; QIAN et al., 2014; RADL et al., 2014), apresentaram suas populações aumentadas no Tecnosolo, como pode ser observado na Figura 7.

As OTUs de *Acidobacteria* também foram reduzidas no Tecnosolo. Essa redução é justificada pelo fato de grande parte dessas bactérias serem oligotróficas e prosperarem sob condições onde a disponibilidade de substrato orgânico é alta (CHEN et al., 2015; EILERS et al., 2010; FIERER; BRADFORD; JACKSON, 2007; NEMERGUT et al., 2010), o que não é encontrado no Tecnosolo (Tabela 1). Os resultados mostraram maior abundância de *Acidobacteria* nas áreas de Mata, corroborando com achados anteriores de que muitos membros da *Acidobacteria* (por exemplo, subgrupos 4 e 6) foram bastante abundantes em solos com alto conteúdo de C orgânico (LIU et al., 2014).

As espécies de *Arenimonas* e Xanthomonadaceae apresentaram abundância reduzida no Tecnosolo. As *Arenimonas* possuem atividades catalíticas de fosfatases ácida e alcalina, esterases, lipases e arilamidases (HUY et al., 2013; JIN et al., 2012; MAKK et al., 2015) o que confirma os resultados verificados por Batista et al. (2020) pois as áreas impactadas pelo rejeito apresentaram redução na atividade dessas enzimas. Os membros Xanthomonadaceae são conhecidos por decompor hidrocarbonetos (LUEDERS et al., 2006), e foram previamente descritos como dominantes no processo de decomposição de madeiras (FOLMAN et al., 2008). Devido à baixa disponibilidade de material para decomposição no Tecnosolo, as Xanthomonadaceae apresentam-se reduzidas.

As espécies de *Gemmatimonas* são capazes de modular as ingestões de C e nitrogênio (N) de acordo com suas necessidades metabólicas sob várias condições. Além disso, estas espécies demonstram alta abundância em solos adicionados de compostos

orgânicos pirogênicos (XU et al., 2018), indicando que essas bactérias desempenham função de decompor compostos poliaromáticos no solo. Adicionalmente, relatos na literatura apontam *Gemmatimonas* como bactérias acumuladoras de polifosfato (ZANG et al., 2003), podendo ser estimuladas pela entrada de fertilizantes fosfatados, o que possivelmente tenha ocorrido no Tecno solo devido ao processo de reabilitação.

Outro gênero que foi drasticamente afetado no Tecno solo foi o previamente descrito como *Candidatus*, representado em nossas amostras por *C. udaebacter* e *C. xiphynematobacter*. Essas bactérias são potencialmente representantes do Verrucomicrobia, e embora bastante difundidas no solo, apresentam tamanho genômico reduzido (com apenas 2,81 Mbp) em relação à média das bactérias cosmopolitas do solo (4,74 Mbp). Essas bactérias estão ligadas ao ciclo do carbono (BREWER et al., 2016), e compreendem mais de 15% das bactérias no solo. Contudo, não há registros de ocorrência dessas bactérias em camadas profundas no solo (BROWN et al., 2015), provavelmente devido à diminuição de substrato ao longo do perfil do solo. Como no Tecno solo há uma baixa quantidade de matéria orgânica (Tabela 1) a abundância dessas bactérias encontra-se reduzida nesse ambiente.

A metagenômica é uma importante e poderosa ferramenta, capaz de acessar rapidamente a biodiversidade do solo e melhorar a compreensão dos processos e serviços ecossistêmicos. Além disso, permite conhecer microrganismos com elevado potencial biotecnológico, que podem ser utilizados tanto no setor ambiental, no caso da biorremediação, como em diversos setores industriais (AHSAN et al., 2018; HUSSAIN et al., 2018). Pode-se observar que os microrganismos foram severamente afetados e que, mesmo após dois anos do rompimento da barragem de Fundão, o Tecno solo ainda apresenta limitações para a maioria dos serviços ecossistêmicos promovido pelos microrganismos do solo.

5 PERSPECTIVAS FUTURAS

Todos os ecossistemas possuem níveis variados de resiliência, ou seja, a capacidade de se recuperar naturalmente de perturbações (MCDONALD; JONSON; DIXON, 2016). Os microrganismos são essenciais para tal processo, visto que são essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, como a biodegradação de contaminantes orgânicos. Portanto, as respostas microbianas funcionais às perturbações são importantes para a compreensão dos impactos da mineração (KÖNIG et al., 2017).

A Figura 9 ilustra o processo de degradação de um ecossistema e o processo de reabilitação após um distúrbio. Inicialmente, o ecossistema encontra-se degradado, danificado ou destruído, apresentando baixa capacidade de resiliência devido aos poucos processos ecossistêmicos microbianos, ausência de vegetação e, conseqüentemente, baixa funcionalidade (1). Com a adoção de estratégias de reabilitação, parte dos serviços ecossistêmicos passa a ser realizado com a remediação das propriedades físico-químicas e microbiológicas (2). Esse manejo deve ser assistido, uma vez que na medida em que ocorre o restabelecimento das comunidades vegetais, o monitoramento torna-se importante a partir das metas predefinidas. Em um terceiro estágio (3), os processos microbianos do ecossistema tornam-se resilientes, de modo que as comunidades microbianas já estão restabelecidas, mostrando-se mais diversas e ativas, impulsionadas pelo restabelecimento das comunidades vegetais e entrada de C via exsudação radicular. Por fim, o aumento da biodiversidade, aliada ao incremento das funções microbianas tornam o ecossistema completamente funcional e em equilíbrio (4).

Seguindo este diagrama apresentado na Figura 8 pode-se observar que o Tecno solo às margens do rio Doce ainda têm um longo caminho a seguir, a fim de chegar a um patamar de reabilitação ideal para o retorno dos serviços ecossistêmicos, mas está havendo esse processo, lentamente. Mesmo após quase seis anos (2015 – 2021) do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, o efeito do rejeito nas áreas afetadas ainda gera grandes preocupações, principalmente do ponto de vista físico, químico e biológico do solo. A estruturação física do solo consistiu em um problema imediato após a deposição do rejeito, que limitou o rápido restabelecimento da vegetação e do retorno dos serviços ecossistêmicos nas áreas afetadas, formando esse Tecno solo sem estrutura, diferente do solo referência local.

Por outro lado, as características químicas do Tecno solo também são preocupantes, tendo em vista que a redução do pH pode condicionar a liberação lenta dos metais pesados contidos no rejeito, caso estes não estejam na forma cristalina ou pouco disponível. Isso pode representar uma preocupação a longo prazo, principalmente pela maior disponibilidade desses metais no solo, além da contaminação com etramina. Nesse aspecto, as características físicas e químicas do Tecno solo ainda representam uma situação preocupante, à medida que impactam os serviços ecossistêmicos como a atividade biológica do solo, decomposição, mineralização, ciclagem de nutrientes, estruturação do solo, simbioses radiculares, e outras funções ecológicas, limitando o restabelecimento desses serviços.



Figura 8. Diagrama conceitual dos processos de degradação e restauração de ecossistemas representando a estabilidade na qual um ecossistema pode permanecer em um estado estacionário antes de ser deslocado para um evento de degradação, com baixa funcionalidade (estágio 1), ou para um evento de restauração com elevação da funcionalidade (estágio 4). Nem todos os locais que necessitam de alteração físico-química dependem de reintrodução de espécies para o retorno da microbiota e sua atividade.

Fonte: Baseada em McDonald et al. (2016).

Os principais gargalos e desafios para atingir o retorno dos serviços ecossistêmicos consistem no entendimento científico dos fatores físicos, químicos e biológicos (Figura 9). No entanto, é necessária a interferência antrópica para acelerar o retorno desses processos, a recomposição do ecossistema e a sucessão ecológica das áreas afetadas. É importante

considerar que a reabilitação de um ecossistema vai além da revegetação, é necessário que várias propriedades sejam consideradas para avaliar se o processo está sendo efetivo, e assim poder chegar ao retorno dos serviços ecossistêmicos prestados por esse ambiente.

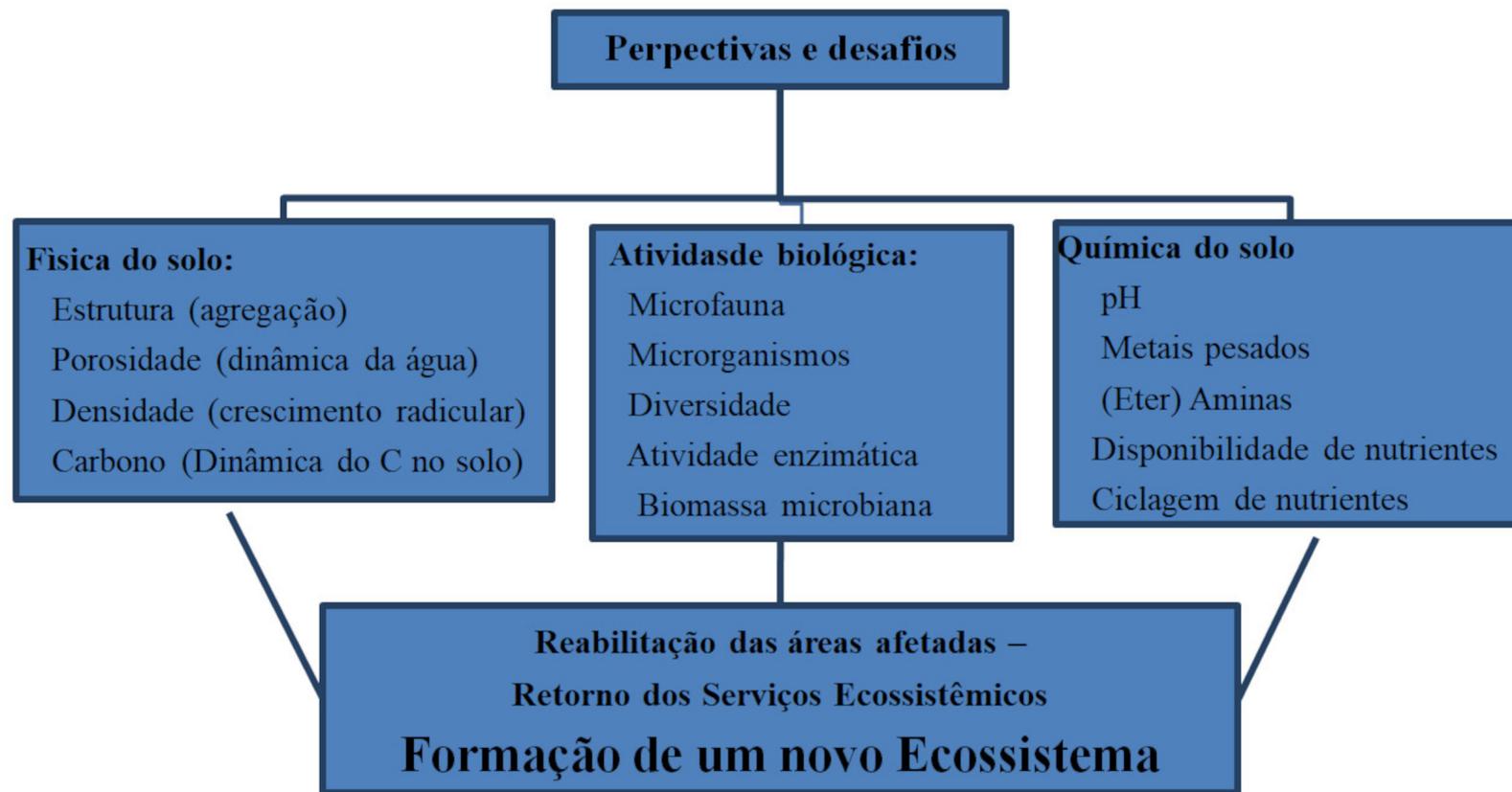


Figura 9. Interação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, que resultam no retorno dos serviços ecossistêmicos e na reabilitação das áreas degradadas.

Fonte: Dos Autores (2020).

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnologia (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e bolsas de estudo concedidas aos autores.

7 REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services - a global review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, p. 101-111, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce-Rompimento da Barragem em Mariana MG**. Brasília, DF: ANA, 2016.
- AHSAN, M. T. et al. Augmentation with potential endophytes enhances phytostabilization of Cr in contaminated soil. **Environmental Science and Pollution Research**, Bordeaux, v. 25, p. 7021-7032, 2018.
- AIRES, U. R. V. et al. Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. **Land use Policy**, Amsterdam, v. 70, p. 63-70, 2018.
- ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability**. Netherlands: Springer, 2013. p. 614.
- ALMEIDA, C. A. et al. Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin e Brazil. **Chemosphere**, Oxford, v. 209, p. 411-420, 2018.
- ALVAREZ V, V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfato e ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, p. 49-55, 1990.

- ALVES, M. C. et al. Recuperação em área de empréstimo usada para construção de usina hidrelétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 887-893, 2012.
- ARAGÃO, O. O. S. et al. Amonificadores e oxidantes de amônio em áreas afetadas por rejeito de mineração em Mariana – MG. In: CONGRESSO DA PÓS-GRADUAÇÃO, 26., 2017, Lavras. **Anais [...]**. Lavras: UFLA, 2017. 1 CD-ROM.
- ARAÚJO, D. M. et al. Biodegradation studies on fatty amines used for reverse flotation of iron ore. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Barking, v. 64, n. 2, p. 151-155, 2010.
- AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. **Geotechnical News**, Vancouver, v. 28, n. 4, p. 50-53, Dec. 2010.
- BATISTA, É. R. et al. Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 738, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720329703>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- BOTTINO, F. et al. Influence of the residue from an iron mining dam in the growth of two macrophyte species. **Chemosphere**, Oxford, v. 186, p. 488-494, 2017.
- BOUMA, J. Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 2, p. 111-120, 2014.
- BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. **American Society of Agronomy Journal**, Madison, v. 43, p. 434-437, 1951.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704 p.
- BREWER, E. T. et al. Genome reduction in an abundant and ubiquitous soil bacterium ‘Candidatus Udaeobacter copiosus’. **Nature Microbiology**, London, v. 2, 161-198, 2016.

- CARRENHO, R.; ALVES, L. J.; SANTOS, I. S. Arbuscular mycorrhizal fungi, interactions with heavy metals and rehabilitation of abandoned mine lands. In: PRASAD, M. N. V.; FAVAS, P. J. V.; MAITI, S. K. (ed.). **Bio-Geotechnologies for mine site rehabilitation**. Amsterdam: Elsevier, 2018. P. 261-279.
- CAVALLIERI, H. C. F. **Estudo da biodegradação de eteraminas utilizadas na flotação do minério de ferro**. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.
- CHEN, L. et al. Bacterial community structure in maize stubble-amended soils with different moisture levels estimated by bar-coded pyrosequencing. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 86, p. 62-70, 2015.
- CHODAK, M.; NIKLIŃSKA, M. Effect of texture and tree species on microbial properties of mine soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 46, n. 2, p. 268-275, 2010.
- CLAASSENS, S. et al. Soil microbial community function and structure in a post-mining chronosequence. **Water Air Soil Pollut**, Dordrecht, v. 194, p. 315-329, 2008.
- CLAASSENS, S. et al. Soil microbial properties in coal mine tailings under rehabilitation. **Applied Ecology and Environmental Research**, Budapest, v. 4, n. 1, p. 75-83, 2005.
- COLLING, A. V.; RIZZO, A. C. L. **Biodegradação de aminos: recuperação ambiental e viabilidade econômica do processo**. Rio de Janeiro: CETEM, 2017.
- COMMON INTERNATIONAL CLASSIFICATION OF ECOSYSTEM SERVICES (CICES). **European Environment Agency**. 2011. Disponível em: https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2009/11/CICES_Update_Nov2011.pdf. Acesso em: 22 jan. 2020.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. **Deliberação Normativa Copam nº 166, de 29 de junho de 2011**: altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta Copam CERH nº 2 de 6 de setembro de 2010, estabelecendo os valores de referência de qualidade dos solos. Belo Horizonte: COPAM, 2011. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>. Acesso em: 2 abr. 2019.

- CORDEIRO, M. C. et al. Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the world's largest mining disaster. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 654, p. 1209-1217, 2019.
- CORRÊA, T. L. **Bioacumulação de metais pesados em plantas nativas a partir de suas disponibilidades em rochas e sedimentos: o efeito na cadeia trófica.** 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- COSTA, J. C. V. **Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia.** 2013. 78 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- COSTA, R. V. et al. Análise comparativa de metodologias de determinação de valores de referência para sedimentos de corrente. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 42, p. 554-566, 2019.
- COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, Guildford, v. 26, p. 152-158, 2014.
- COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, London, v. 387, p. 253-260, 1997.
- COURTNEY, R.; HARRINGTON, T.; BYRNE, K. A. Indicators of soil formation in restored bauxite residues. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 58, p. 63-68, 2013.
- CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 153-158, 1987.
- DANA, J. D. **Manual de mineralogia.** Revisado Cornelius S. Hurlbut Júnior e traduzido Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976. V. 1, p. 303-342.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes de rochas: uma introdução.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1966. 558 p.

- DELGADO-BAQUERIZO, M. et al. Relative importance of soil properties and microbial community for soil functionality: insights from a microbial swap experiment. **Functional Ecology**, Oxford, v. 30, p. 1862-1873, 2016.
- DE SOUZA, J. J. L. L. et al. Geochemistry and spatial variability of metal (loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais, Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 505, p. 338-349, 2015.
- DORR II, J. V. N. **Ocorrências e classificação de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero**. [S. l.: s. n], 1964.
- ECHEVARRIA, G.; MOREL, J. L. Technosols of mining areas. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 9, p. 1-20, 2015.
- EDWARDS, D. P. et al. Mining and the African environment. **Conservation Letters**, Washington, v. 7, p. 302–311, 2014.
- EILERS, K. G. et al. Shifts in bacterial community structure associated with inputs of low molecular weight carbon compounds to soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, p. 896–903, 2010.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA EM AGROPECÁRIA – EMBRAPA. **Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG**: apoio ao plano de recuperação agropecuária. Brasília, DF: EMBRAPA, 2015).
- ESCOBAR, I. E. C. et al. Changes in microbial community structure and soil biological properties in mined dune areas during re-vegetation. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 55, p. 1433-1445, 2015.
- FAUBE, J. (ed.). **Surfactants in consumer products**: theory, technology and applications. Berlin: Springer, 1986.
- FAUCON, M.; HOUBEN, D.; LAMBERS, H. Plant functional traits: soil and ecosystem services. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 22, n. 5, p. 385-394, 2017.
- FELIPPE, M. F. et al. A tragédia do Rio Doce: a lama, o povo e a água. Relatório de campo e interpretações preliminares sobre as consequências do rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão (Samarco/Vale/Bhp). **Revista Geografias**, Belo Horizonte, Edição especial, p. 63-94, 2016.

- FERNANDES, C. C. et al. Bacterial communities in mining soils and surrounding areas under regeneration process in a former ore mine. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 49, p. 489-502, 2018.
- FERNANDES, G. W. et al. Deep into the mud: ecological and socioeconomic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/43tribu/article/pii/S1679007316301104?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- FERREIRA, H. **Aplicação metodologia de avaliação do ciclo de vida na produção de polpa de concentrado de minério de ferro**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- FIERER, N.; BRADFORD, M. A.; JACKSON, R. B. Toward an ecological classification of soil bacteria. **Ecology**, London, v. 88, p. 1354-1364, 2007.
- FIERER, N. et al. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 109, n. 52, p. 21390-21395, Dec. 2012.
- FINKENBEIN, P. et al. Soil enzymatic activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 56, p. 87-89, 2013.
- FOLMAN, L. B. et al. Impact of white-rot fungi on numbers and community composition of bacteria colonizing beech wood from forest soil. **FEMS Microbiology Ecology**, Amsterdam, v. 63, p. 181-191, 2008.
- GARCÍA, M. T.; CAMPOS, E.; RIBOSA, I. Biodegradability and ecotoxicity of amine oxide based surfactants. **Chemosphere**, Oxford, v. 69, n. 10, p. 1574-1578, 2007.
- GASTAUER, M. et al. Mine land rehabilitation: modern ecological approaches for more sustainable mining, **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 172, p. 1409-1422, 2018.
- GIGON, A.; RORISON, I. H. The response of some ecologically distinct plant species to nitrate-and to ammonium-nitrogen. **The Journal of Ecology**, London, v. 60, n. 1, p. 93-102, 1972.

- GOMES, L. E. et al. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce Estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 120, p. 28-36, 2017.
- GUERRA, M. B. B. et al. Post-catastrophe Analysis of the Fundão tailings dam failure in the Doce River system, Southeast Brazil: Potentially toxic elements in affected soils. **Water, Air & Soil Pollution**, Dordrecht, v. 228, n. 7, p. 252, 2017.
- GUIMARÃES, I. R. et al. Modified goethites as catalyst for oxidation of quinoline: evidence of heterogeneous Fenton process. **Applied Catalysis A: General**, Amsterdam, v. 347, n. 1, p. 89-93, 2008.
- GUPTA, S. The phylogeny of proteobacteria: relationships to other eubacterial phyla and eukaryotes Radhey. **FEMS Microbiology Reviews**, Amsterdam, v. 24, p. 367-402, 2000.
- HALLIWELL, D. J.; BARLOW, K. M.; NASH, D. M. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. **Soil Research**, Rome, v. 39, n. 6, p. 1259-1267, 2001.
- HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, London, v. 7, p. 1-13, 2017.
- HAUGMO, I. E. et al. Environmental impact of amines. **Energy Procedia**, Oxford, v. 1, n. 1, p. 1297-1304, 2009.
- HELINGEROVÁ, M.; FROUZ, J.; ŠANTRŮČKOVÁ, H. Microbial activity in reclaimed and unreclaimed post-mining sites near Sokolov (Czech Republic). **Ecological Engineering**, Oxford, v. 36, p. 768-776, June 2010.
- HEWITT, A. et al. Soil natural capital quantification by the stock adequacy method. **Geoderma**, Amsterdam, v. 241/242, p. 107-114, 2015.
- HOEFT, R. G.; WALSH, L. M.; KENNEY, D. R. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. **Soil Science Society American Proceeding**, Madison, v. 37, p. 401-411, 1973.
- HUANG, L.; BAUMGARTL, T.; MULLIGAN, D. Is rhizosphere remediation sufficient for sustainable revegetation of mine tailings? **Annals of Botany**, London, v. 110, p. 223-238, 2012.

- HUSSAIN, Z. et al. Treatment of the textile industry effluent in a pilot-scale vertical flow constructed wetland system augmented with bacterial endophytes. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 645, p. 966-973, 2018.
- HUY, H. et al. *Arenimonas daechungensis* sp nov., isolated from the sediment of a eutrophic reservoir. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, Reading, v. 63, p. 484–489, 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação**. IBAMA, 1990. 96p.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Tailings dams-risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences**. Paris: Committee on Tailings Dams and Waste Lagoons, 2001. 144 p.
- IUSS WORKING GROUP WRB. **World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication**. Rome: FAO, 2006. p. 145. (World Soil Resources Reports, 103).
- JAIN, S. et al. Impact of biochar amendment on enzymatic resilience properties of mine spoils. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 544, p. 410–421, 2016.
- JIN, L. et al. *Arenimonas daejeonensis* sp nov., isolated from compost. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, Reading, v. 62, p. 1674-1678, 2012.
- KALLENBACH, C. M.; FREY, S. D.; GRANDY, A. S. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. **Nature Communications**, London, v. 7, p. 13630, nov. 2016.
- KEMMELMEIER, K. Comunidades de fungos micorrízicos arbusculares (Glomeromycota) em ecossistemas impactados por rejeito de mineração de ferro em Mariana-MG. 2018. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- KEMMELMEIER, K. et al. Microorganismos celulolíticos e solubilizadores de fosfato em área afetada por deposição de rejeito de mineração em Mariana, MG. In: CONGRESSO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 26., 2017, Lavras. **Anais [...]**. Lavras: Ufla, 2017.

- KIRKBY, E. A. Influence of ammonium and nitrate nutrition on the cation-anion balance and nitrogen and carbohydrate metabolism of white mustard plants grown in dilute nutrient solutions. **Soil Science**, Baltimore, v. 105, n. 3, p. 133-141, 1968.
- LANGHE, M. et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature Communications**, London, v. 6, p. 6707, 2015.
- LIU, J. J. et al. High throughput sequencing analysis of biogeographical distribution of bacterial communities in the black soils of northeast China. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 70, p. 113-122, 2014.
- LOBATO, L. M.; COSTA, M. A. **Recursos minerais no cenário geológico de Minas Gerais online**. Belo Horizonte: UFMG, 2018. 47 p.
- LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Sinapse Múltipla**, Betim, v. 5, p. 1-14, 2016.
- LOPEZ, B. D. O. et al. Densidade da comunidade microbiana em áreas afetadas por lama de rejeito da mineração de ferro no município de Mariana – MG. In: CONGRESSO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 26., 2017, Lavras. **Anais [...]**. Lavras: Ufla, 2017.
- LOTTERMOSER, B. G. **Mine wastes-characterization, treatment, and environmental impacts**. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2010.
- LUDWIG, M.; WILMES, P.; SCHRADER, S. Measuring soil sustainability via soil resilience. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 626, p. 1484-1493, 2018.
- LUEDERS, T. et al. Identification of bacterial micropredators distinctively active in a soil microbial food web. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 72, 5342-5348, 2006.
- LUZ, A. B. et al. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- MAKK, J. et al. *Arenimonas subflava* sp nov., isolated from a drinking water network, and emended description of the genus *Arenimonas*. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, Reading, v. 65, p. 1915–1921, 2015.

- MAPA, P. S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração**. 2006. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- MARQUES, A. R. et al. Biological re-colonization of sub-aerial boundaries of an ‘artificial construction-niche’ contaminated by iron mine tailings: laboratory bioassays. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 76, n. 480, p. 1-14, 2017.
- MARTA-ALMEIDA, M. R. et al. Fundão Dam collapse: oceanic dispersion f River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 112, n. 1/2, p. 359-364, 2016.
- MATIAS, S. R. et al. Effect of rhizobia, mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing microorganisms in the rhizosphere of native plants used to recover an iron ore area in Brazil. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 45, p. 259-266, 2009.
- MCBRATNEY, A. B.; FIELD, D. J.; KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, Amsterdam, v. 213, p. 203-213, 2014.
- MCDONALD, T.; JONSON, J.; DIXON, K. W. National standards for the practice of ecological restoration in Australia. **Restoration Ecology**, Malden, v. 24, p. S4–S32, 2016.
- MCLEAN, E. O. et al. Aluminum in soils: extraction methods and magnitudes in ohio clays and soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 22, n. 5, p. 382, 1958.
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. Raleigh: North Carolina Soil Testing Division, 1953. 195 p.
- MELGAR-RAMÍREZ, R. et al. Effects of application of organic and inorganic wastes for restoration of sulphur-mine soil. **Water Air Soil Pollut**, Dordrecht, v. 223, p. 6123-6131, 2012.
- MENDEZ, M. O.; MAIER, R. M. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments: an emerging remediation technology. **Environmental Health Perspectives**, Triangle Park, v. 116, n. 3, p. 278-283, 2008.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). **Ecosystems and Human Well-being** . Washington: Island, 2005.

- MILTNER, A. et al. SOM genesis: Microbial biomass as a significant source. **Biogeochemistry**, Barking, v. 111, n. 1/3, p. 41-55, 2012.
- MIRANDA, L. S.; MARQUES, A. C. Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna: an example from the staurozoans (Cnidaria). **Biota Neotropica**, Campinas, v. 16, n. 2, 2016.
- MSADDAK, A. et al. Diverse Bacteria Affiliated with the Genera *Microvirga*, *Phyllobacterium*, and *Bradyrhizobium* nodulate *Lupinus micranthus* growing in soils of northern Tunisia. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 83, n. 6, p. 1-13, 2017.
- MUÑOZ-ROJAS, M. et al. Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. **Restoration Ecology**, Malden, v. 24, p. S43-S52, ago. 2016.
- NASCIMENTO, H. N. **Caracterização tecnológica de materiais estéreis com elevado teor de PPC e P da Mina de Alegria da Samarco Mineração S. A.** 2014. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- NEMERGUT, D. R. et al. Plot-scale manipulations of organic matter inputs to soils correlate with shifts in microbial community composition in a lowland tropical rain forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, p. 2153-2160, 2010.
- NEWSOME, L. D. et al. A Qsar study of the toxicity of amines to the fathead minnow. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 109, p. 537-551, 1991.
- OKA, M.; UCHIDA, Y. Heavy metals in slag affect inorganic N dynamics and soil bacterial community structure and function. **Environmental Pollution**, Barking, v. 243, p. 713-722, 2018.
- OLIVEIRA, L. E. et al. Impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 120, n. 1-2, p. 28-36, 2017.
- OLIVEIRA, T. S. et al. Relation between magnetization and trace elements content of Brazilian soils from different parent materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 165, n. 10, p. 825 - 834. 2000.

- O'NEILL, B. et al. Bacterial community composition in Brazilian Anthrosols and Adjacent soils characterized using culturing and molecular identification. **Microbial Ecology**, New York, v. 58, p. 23–35, 2009.
- PASSOS, F. L. et al. (Des) territórios da mineração: planejamento territorial a partir do rompimento em Mariana, MG. **Cadernos Metr pole**, São Paulo, v. 19, n. 38, p. 269-297, 2017.
- PENG, J. F. et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 161, p. 633-640, 2009.
- PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefa o de rejeitos de minério de ferro sob carregamento est tico**. 2005. 185 p. Disserta o (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- PIRES, J. M. M. et al. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Minera o: estudo de caso da barragem do Germano. **Revista  rvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 393-397, 2003.
- QIAN, G. et al. Roles of a solo LuxR in the biological control agent *Lysobacter enzymogenes* strain OH11. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 104, n. 3, p. 224-231, 2014.
- QUADROS, P. D. et al. Coal mining practices reduce the microbial biomass, richness and diversity of soil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 98, p. 195–203, 2016.
- QUEIROZ, H. M. et al. The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 637, p. 498-506, 2018.
- RABELO, P. J. B. **Estudos de caracteriza o e redu o do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG**. Belo Horizonte: UFMG, 1994.
- RADL, V. *Microvirga vignae* sp. nov., a root nodule symbiotic bacterium isolated from cowpea grown in semi-arid Brazil. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, Reading, v. 64, 725–730, 2014.

- RAMÍREZ, C. J. et al. Steady-state inhibition model for the biodegradation of sulfonated amines in a packed bed reactor. **New Biotechnology**, Waltham, v. 32, n. 3, p. 379-386, 2015.
- ROOSTA, H. R.; SCHJOERRING, J. K. Effects of ammonium toxicity on nitrogen metabolism and elemental profile of cucumber plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, p. 1933-1951, 2007.
- SAMARCO. **Relatório anual de sustentabilidade**, 2013. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorio/relatorio-anual-de-sustentabilidade-2013/>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- SANTAMARINA, J. C.; TORRES-CRUZ, L. A.; BACHUS, R. C. Why coal ash and tailings dam disasters occur. **Science**, Washington, v. 364, n. 6440, p. 526–528, 2019.
- SANTOS, J. V. et al. Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. **Environmental Science and Pollution Research**, Bordeaux, v. 23, n. 7, p. 6735–6748, abr. 2016.
- SANTOS, O. S. H. et al. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 48, n. 2, p. 439, 2019.
- SCHULTZ, T. W. et al. QSARs for selected aliphatic and aromatic amines. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 109, p. 581-587, 1991.
- SEGURA, F. R. et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, Barking, v. 218, p. 813–825, 2016.
- SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 25, n. 4, p. 274, 1961.
- SHOEMAKER, W. R.; LOCEY, K. J.; LENNON, J. T. A macroecological theory of microbial biodiversity. **Nature Ecology & Evolution**, London, v. 1, n. 5, p. 0107, 2017.

- SILVA, A. C. et al. Características químicas, mineralógicas e físicas do material acumulado em terraços fluviais, originado do fluxo de lama proveniente do rompimento de barragem de rejeitos de mineração de ferro em Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brasil. **Revista Espinhaço**, Diamantina, p. 44-53, 2017. Disponível em: <http://www.revistaespinhaco.com/index.php/journal/article/view/133>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- SILVA, A. O. et al. Soil microbiological attributes indicate recovery of an iron mining area and of the biological quality of adjacent phytophysionomies. **Ecological Indicators**, Berlin, v. 93, p. 142–151, 2018.
- SILVA, C. A. M.; FRUCHTENGARTEN, L. Riscos químicos ambientais à saúde da criança. **Jornal de Pediatria**, Porto Alegre, v. 81, n. 5, p. 205-211, 2005.
- SILVA, D. L.; FERREIRA, M. C.; SCOTTI, M. R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, Belo Horizonte, v. 24, n. 1/2, p. 136-158, 2015.
- SILVA, G. P. et al. Caracterização química, física e mineralógica de estereis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 1, p. 45-52, 2006.
- SINSABAUGH, R. L.; SHAH, J. J. F. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 43, n. 1, p. 313–343, 2012.
- SONTER, L. J. et al. Multi-site interactions: Understanding the offsite impacts of land use change on the use and supply of ecosystem services. **Ecosystem Services**, Oxford, v. 23, p. 158–164, 2017.
- SONTER, L. J. et al. Processes of land use change in mining regions. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 84, p. 494–501, 2014.
- TAKETANI, R. G. et al. Bacterial community composition of anthropogenic biochar and Amazonian anthrosols assessed by 16S rRNA gene 454 pyrosequencing. **Antonie van Leeuwenhoek**, Amsterdam, v. 104, p. 233–242, 2013.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2017.

- TEODORO, A. L.; LEÃO, V. A. Recuperação de aminas, utilizadas na flotação de minério de ferro, utilizando-se zeólitas naturais. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 57, p. 197-201, 2004.
- THAVAMANI, P. et al. Microbes from mined sites: Harnessing their potential for reclamation of derelict mine sites. **Environmental Pollution**, Barking, v. 230, p. 495–505, 2017.
- THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODIVERSITY (TEEB). **Mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB**. 2010. Disponível em: <http://www.teebweb.org/publication/mainstreaming-the-economics-of-nature-a-synthesis-of-the-approach-conclusions-and-recommendations-of-teeb/>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- THIJS, S. et al. Phytoremediation: state-of-the-art and a key role for the plant microbiome in future trends and research prospects. **International Journal of Phytoremediation**, Philadelphia, v. 19, p. 23–38, 2017.
- TORSVIK, V.; GOKSOYR, J.; DAAE, F. L. High diversity in DNA of soil bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 56, n. 3, p. 782–787, 1990.
- URBANOVÁ, M. et al. Development of bacterial community during spontaneous succession on spoil heaps after brown coal mining. **FEMS Microbiology Ecology**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 59–69, 2011.
- VARENNE, A.; CUNHA-QUEDA, C.; QU, G. Amendment of an acid mine soil with compost and polyacrylate polymers enhances enzymatic activities but may change the distribution of plant species. **Water Air Soil Pollution**, Dordrecht, v. 208, p. 91–100, 2010.
- VEGA, C. F. P. et al. Avaliação do impacto produzido pelo acidente em Mariana (MG) sobre os microrganismos fixadores de N₂ do solo. In: CONGRESSO DA PÓS-GRADUAÇÃO, 26., 2017, Lavras. **Anais [...]**. Lavras: UFLA, 2017.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.
- WANG, Q. et al. Using microbial community functioning as the complementary environmental condition indicator: A case study of an iron deposit tailing area. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 51, p. 22–29, 2012.

- WHITMAN, W. B.; COLEMAN, D. C.; WIEBE, W. J. Prokaryotes: the unseen majority. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 95, p. 6578- 6583, 1998.
- XU, Y. et al. Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 621, p. 148–159, 2018.
- YANG, S. X. et al. Acidification, heavy metal mobility and nutrient accumulation in the soil–plant system of a revegetated acid mine wasteland. **Chemosphere**, Oxford, v. 80, p. 852–859, 2010.
- ZHANG, H. et al. *Gemmatimonas aurantiaca* gen. nov., sp nov. a gram-negative, aerobic, polyphosphate-accumulating micro-organism, the first cultured representative of the new bacterial phylum Gemmatimonadetes phyl. nov. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, Reading, v. 53, p. 1155–1163, 2003.

PROCESSOS BIOGEOQUÍMICOS NO ESTUÁRIO DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG

Ana Luisa Soares Vasconcelos¹
Hermano Melo Queiroz¹
Fabricio Ângelo Gabriel²
Amanda Duim Ferreira¹
Diego Barcellos^{1,2}
Fernando Dini Andreote¹
Tiago Osório Ferreira¹
Ângelo Fraga Bernardino²

1 INTRODUÇÃO

Estuários são zonas costeiras de transição entre o oceano e o continente, onde ocorre a mistura entre água doce e salgada. Diversos ecossistemas, como os manguezais, as marismas e as pradarias marinhas, podem estar presentes no ambiente estuarino a depender, principalmente, do clima, do nível de salinidade e da influência da maré (BIANCHI, 2007; COPERTINO et al., 2016; MCLUSKY; ELLIOTT, 2004; MOFFETT et al., 2015). Estes ecossistemas desempenham uma grande quantidade de serviços ecossistêmicos, como por exemplo: (i) sequestro de carbono; (ii) retenção e imobilização de contaminantes; (iii)

¹Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias 11, Piracicaba, São Paulo 13.418-260, Brasil

²Departamento de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo 29075-910, Brazil

proteção contra tempestades e tsunamis; (iv) produção de fibras; e (v) servir de berçário e criatório para espécies de peixes, aves, crustáceos e mamíferos (WALTERS et al., 2008). No entanto, as zonas estuarinas estão constantemente ameaçadas pela entrada de poluentes (e.g.: metais pesados) (BIANCHI, 2007).

No ano de 2015, o rompimento da barragem Fundão, contendo rejeitos de processamento de minério de ferro da mineradora Samarco, liberou na bacia hidrográfica do rio Doce cerca de 60 milhões de m³ de resíduos ricos em oxi-hidróxidos de ferro, atingindo centenas de quilômetros do rio até alcançar o estuário na vila de Regência no Estado do Espírito Santo (MARTA-ALMEIDA et al., 2016; SILVA et al., 2017). O “desastre de Mariana” é considerado um dos maiores desastres da indústria de mineração (HATJE et al., 2017) e um dos maiores desastres ambientais do mundo, causando prejuízos ecológicos, econômicos e culturais (CARMO et al., 2017). Além da destruição em massa, foram registradas a morte de 19 pessoas, sendo considerado o desastre com maior prejuízo socioambiental da história do Brasil (ARMADA, 2019; ESCOBAR, 2015; FONSECA; FONSECA, 2016).

No estuário a chegada do rejeito trouxe diversos prejuízos ambientais como a morte de centenas de peixes e invertebrados, aumento do conteúdo de metais pesados no sedimento de fundo, solo e água (FONSECA; FONSECA, 2016; GOMES et al., 2017; MIRANDA; MARQUES, 2016; QUEIROZ et al., 2018), além de danos sociais às comunidades que dependem da pesca, produção de alimentos às margens do rio e turismo. As implicações ambientais da chegada do rejeito ao estuário são alvo de estudos multidisciplinares. Nesse capítulo, reunimos os resultados de estudos desenvolvidos no estuário da bacia do rio Doce que abordam a dinâmica do ferro (principal constituinte do rejeito) e a biodisponibilidade de metais, riscos ecológicos com base em índice geoquímicos, e o efeito sobre a comunidade microbológica do solo estuarino e suas alterações genéticas. Esses estudos multidisciplinares buscam promover um diagnóstico da situação do estuário do rio Doce e assim, construir predições sobre as implicações ambientais que auxiliem em medidas de mitigação ou recuperação dos danos ambientais.

2 BIOGEOQUÍMICA DO FERRO E SEU CONTROLE SOBRE A DINÂMICA DE METAIS TRAÇO NOS SOLOS DO ESTUÁRIO DO RIO DOCE APÓS O “DESASTRE DE MARIANA”

Após 16 dias, o rejeito de processamento de minério de ferro despejado pelo rompimento da barragem de “Fundão” em Mariana (MG) chegou ao estuário do rio Doce (Figura 1) na vila de Regência (ES) (ESCOBAR, 2015; GOMES et al., 2017).

Estudos apontam que o rejeito é composto principalmente por óxidos de ferro, um grupo mineral que tem um importante papel na retenção de contaminantes, como por exemplo, metais pesados.



Figura 1. Deposição de rejeitos no estuário do Rio Doce em novembro de 2015 (15 dias após a chegada do rejeito)

Fonte: Ferreira (2020).

De fato, foi observado um aumento dos teores totais de metais como cromo (Cr), alumínio (Al), ferro (Fe), zinco (Zn) e bário (Ba) no sedimento de fundo de rio, dois dias após a chegada do rejeito, alcançando níveis de 27 mg kg^{-1} , 3941 mg kg^{-1} , 45551 mg kg^{-1} , 6 mg kg^{-1} e 75 mg kg^{-1} , respectivamente (GOMES et al., 2017). Após quinze dias, também foi observada a presença dos metais pesados Cr, cobre (Cu), e níquel (Ni) no solo estuarino, principalmente na camada superficial de 0 a 5 cm (Figura 2).

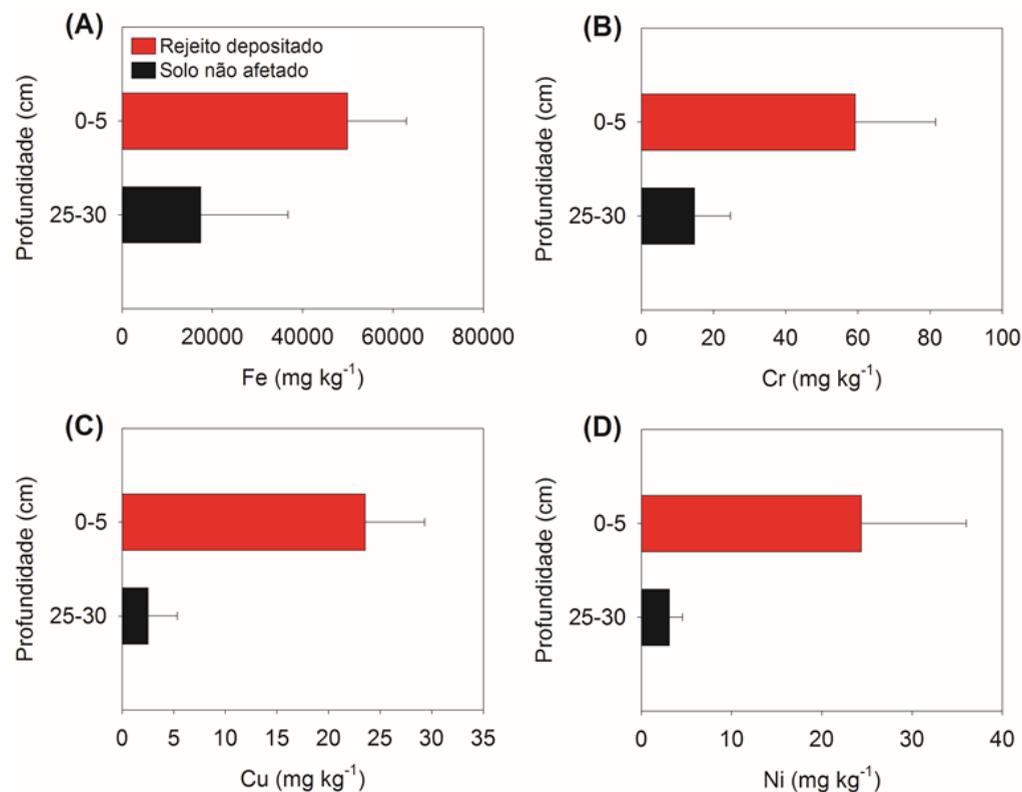


Figura 2. Teores totais de Fe, Cr, Cu e Ni no solo do estuário do rio Doce, em novembro de 2015, quinze dias após a chegada do rejeito, evidenciando o aumento de metais em superfície.

Fonte: Queiroz et al. (2019).

Esses resultados mostram que o rejeito depositado no solo do estuário possui forte afinidade por metais pesados, evidenciado também pela forte correlação entre esses elementos (Figura 3). Dessa forma, o rejeito pode atuar como sumidouro desses elementos potencialmente tóxicos.

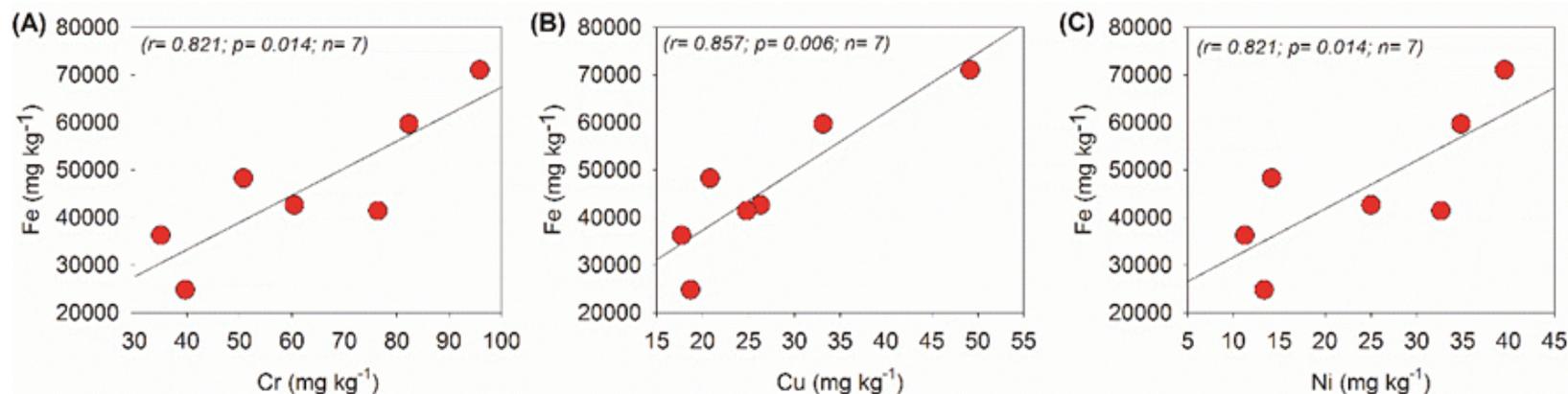


Figura 3. Correlação de Spearman entre os conteúdos totais de Fe, Cr, Cu e Ni do rejeito, evidenciando o potencial de retenção de metais do rejeito.

Fonte: Queiroz et al. (2019).

No entanto, apesar do potencial do rejeito para retenção de metais, as condições físico-químicas no ambiente estuarino são favoráveis ao processo conhecido como redução de ferro. Nesse processo, a presença de matéria orgânica, baixa disponibilidade de oxigênio e constante saturação por água promove a solubilização dos óxidos de ferro e conseqüentemente a liberação e biodisponibilidade de metais, trazendo risco de contaminação (BONNEVILLE; VAN CAPPELLEN; BEHREND, 2004; CANFIELD; THAMDRUP; HANSEN, 1993; QUEIROZ et al., 2018). Além disso, a baixa presença de sulfato no estuário do rio Doce dificulta a formação de sulfetos (e.g.: pirita) que auxiliam no controle da biodisponibilidade de metais (QUEIROZ et al., 2018; YE et al., 2010).

O óxido de ferro ao ser reduzido altera sua cor de avermelhado para acinzentado. Após dois anos do desastre é possível observar evidências morfológicas do processo de redução do ferro (Figura 4) no solo do estuário do rio Doce (setas

amarelas indicando coloração acinzentada em meio a coloração avermelhada oriunda do rejeito oxidado). Esta evidência nos permite inferir que as predições de redução do material e consequente solubilização e liberação de metais está ocorrendo. E apontam um potencial de contaminação crônica a longo prazo, uma vez que o aporte de rejeito em eventos de cheias do rio durante os períodos chuvosos ocorre com frequência na região.

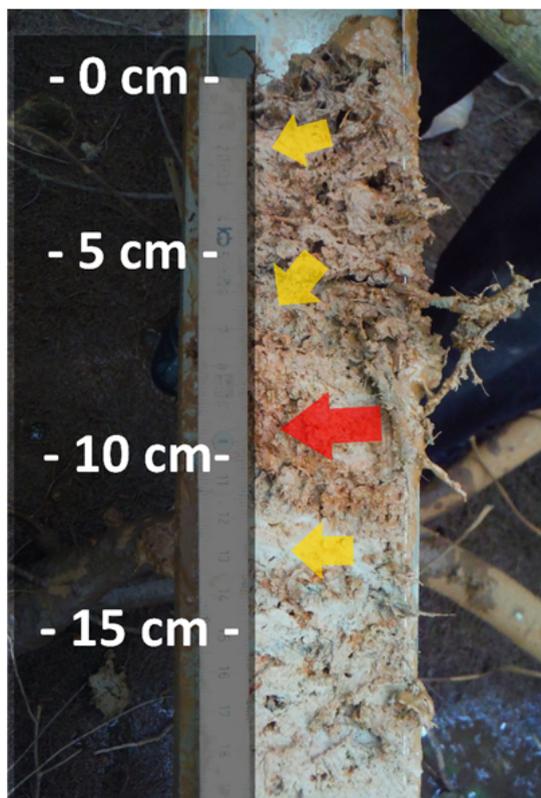


Figura 4. Evidências morfológicas do processo de redução de Fe no solo do estuário do Rio Doce dois anos após o desastre. As setas amarelas indicam o solo acinzentado que é uma característica de ausência de ferro como agente pigmentante do solo. As setas vermelhas indicam a presença do rejeito, dado a coloração vermelha característica do rejeito.

Fonte: Queiroz (2020).

Até o momento, estudos multidisciplinares abordaram o efeito da chegada do rejeito e do enriquecimento de metais sobre assembleia bentônica do estuário (GOMES et al., 2017; MIRANDA; MARQUES, 2016), assim como a qualidade da água nessas regiões (HATJE et al., 2017). Porém, poucos estudos têm abordado a dinâmica biogeoquímica do ferro nos solos do ambiente estuarino do rio Doce e suas implicações sobre a dinâmica e contaminação por metais (QUEIROZ et al., 2018). A biodisponibilidade de metais no estuário do rio Doce pode trazer riscos toxicológicos, uma vez que o destino desses elementos é a fauna/flora e a cadeia alimentar, gerando risco inclusive para a população local (BOSCO-SANTOS et al., 2017; KENNISH, 2002). Estudos apontam que a cadeia alimentar é uma das principais formas de entrada de contaminantes (e.g. metais pesados) na população ribeirinha que depende da pesca e produção de alimentos às margens dos rios (SANDILYAN; KATHIRESAN, 2014).

3 RISCOS E IMPACTOS ECOLÓGICOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE “FUNDÃO” NO ESTUÁRIO DO RIO DOCE

Dada a importância e os serviços ecossistêmicos prestados pelo estuário do rio Doce é imprescindível quantificar os efeitos da entrada e deposição do rejeito do ponto vista ecológico. Nesse sentido, os índices de qualidade ambiental são fundamentais para avaliar o status da poluição por metais pesados e seu potencial risco ecológico (LIU et al., 2016). A integração e resumo de dados científicos complexos em resultados facilmente interpretáveis tornam estes índices ferramentas úteis e aplicáveis na comunicação com gestores e na tomada de decisão (WILSON; JEFFREY, 1994). Estes índices podem ainda auxiliar na proposição de medidas para remediação e futuros monitoramentos ecossistêmicos.

Em 2017 e 2018, nossa equipe realizou coletas em pontos amostrais ao longo da bacia do rio Doce (Figura 5).

Foram coletadas amostras do sedimento do fundo do rio (Figura 6), para determinar e calcular os seguintes índices de acordo com os teores de ferro e metais:

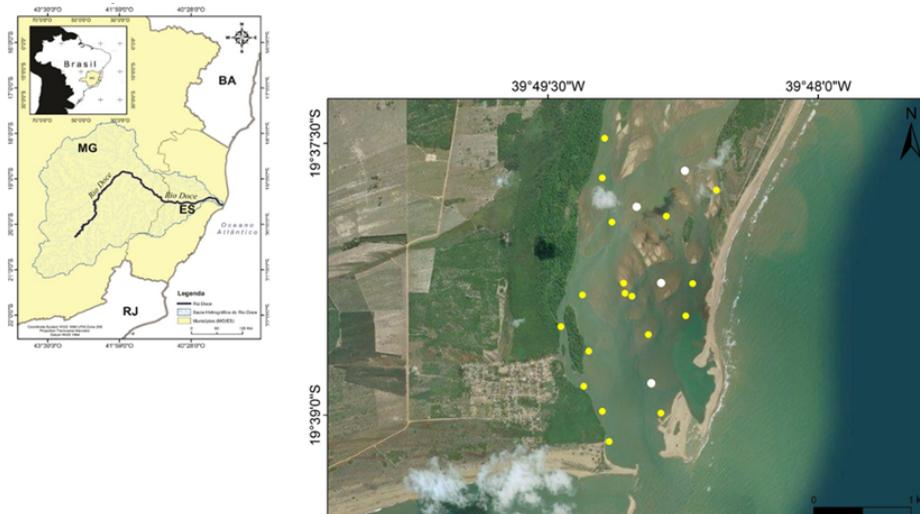


Figura 5. Bacia do rio Doce nos estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES) e pontos amostrais monitorados no estuário do Rio Doce.

Fonte: Gabriel (2020b)



Figura 6. Coleta do sedimento do fundo do rio com pegador do tipo van-veen. Os sedimentos foram peneirados e as amostras acondicionadas e preservadas para posterior triagem laboratorial e identificação taxonômica dos organismos bentônicos.

Fonte: Gabriel (2018).

– Grau de contaminação (GC): leva em consideração a razão entre a concentração encontrada na amostra de sedimento estuarino e o valor de referência amostrado antes da passagem de rejeitos. Ao final, relaciona-se o grupo de metais (Al, Ba, Cr, Fe, Zn, Mn, Ni, As, Cu, Pb e Co) analisados. A premissa do GC é quanto maior o número de metais e sua concentração no sedimento, maior o grau de contaminação do ecossistema.

– Índice de risco ecológico (IRE): considera, além da concentração de metais no sedimento, o nível de toxicidade de cada metal para o meio ambiente. O fator de resposta tóxica leva em consideração ensaios ecotoxicológicos já realizados para avaliação da resposta de organismos-teste. Deste modo, é possível inferir, com os resultados do IRE, o grau de risco para a biota aquática em relação a toxicidade e bioacumulação (processo de acúmulo de metais no organismo).

O valor médio do grau de contaminação (GC) em agosto de 2017 (época seca) (Tabela 1) pode ser classificado como muito alta (ABRAHIM; PARKER, 2008). A maior parte dos pontos amostrados apresentam GC muito alto com valores variando entre 11,6 a 15,8. Porém, em janeiro de 2018 (época chuvosa), observa-se uma redução no valor do GC. Em geral, independentemente da estação, o intervalo de classificação ficou entre muito baixo a alto (1,4 a 7,4, respectivamente).

Quanto ao índice de risco ecológico (IRE; Tabela 1), em agosto de 2017 (época seca) praticamente todos os pontos amostrados foram classificados com risco muito alto (> 600 , de acordo com Hakanson (1980)). Assim como para o GC, houve diminuição do IRE em janeiro de 2018 (época chuvosa), com a maioria das estimativas apresentando risco moderado (187 a 268,1). Em síntese, nossos resultados sugerem que toxicidade e bioacumulação podem ocorrer. Além disso, o estudo das avaliações de risco ecológico traz dados ecológicos significativos para o futuro manejo do estuário do rio Doce após o desastre da Samarco, com especial importância não apenas para os sedimentos e fauna estuarina associada, mas também para o monitoramento da saúde humana (GABRIEL et al., 2020a).

Tabela 1. Médias do grau de contaminação (CG) e índice de risco ecológico (IRE) em duas estações (seca e chuvosa)

Índice	Agosto de 2017	Janeiro de 2018
GC	17,01 ± 3,72*	4,65 ± 1,60
IRE	841,64 ± 300,22	226,32 ± 120,58

*Média ± desvio padrão

O biomonitoramento de contaminações frequentemente utiliza os organismos que vivem parte ou todo seu ciclo de vida no fundo dos ambientes aquáticos, conhecidos como organismos bentônicos ou bentos. Esses organismos são muito susceptíveis à perturbações, e por isso se tornam eficazes na identificação de impactos ecológicos (DOLBETH et al., 2007; HIRST, 2004).

A rápida sedimentação do rejeito pode ter afetado diretamente a comunidade bentônica no estuário do rio Doce devido à redução da difusão do oxigênio na água. Afinal sabe-se que a falta de oxigênio na água está relacionada à perda de indivíduos, de biodiversidade e aumento da abundância de espécies oportunistas tolerantes (KRISTENSEN et al., 2014; LANCELLOTTI; STOTZ, 2004) e mortalidade da fauna bentônica menos tolerante e funcional (PILÓ et al., 2016). Impactos indiretos incluem a mobilização e ressuspensão do sedimento por processos bióticos e abióticos (GARCIA et al., 2017), retirando metais e outros contaminantes ligados ao sedimento na coluna d'água e afetando águas próximas não contaminadas (HATJE; BARROS, 2012).

Resultados preliminares, obtidos em coletas realizada em agosto de 2017 (BERNARDINO et al., 2019), demonstram que a distribuição espacial de ferro no estuário está controlando a distribuição de organismos bentônicos, como nemátodos, copépodes, ostracodes e vermes planos. Não foi observado efeito significativo de elementos potencialmente tóxicos (como arsênio (As) e chumbo (Pb)) nesses organismos, apesar, dos elevados teores encontrados nos sedimentos (20 vezes superiores aos limites da legislação). Uma vez que os óxidos de ferro presentes no rejeito são reconhecidos pela retenção de metais, alguns elementos tóxicos (metais pesados) presentes no rejeito podem não estar biodisponíveis, diminuindo o risco imediato para a biota. No entanto, nas condições estuarinas esses minerais são susceptíveis ao processo de redução dissimilatória, que pode resultar na liberação dos metais retidos pelos óxidos de ferro (QUEIROZ et al., 2018).

4 A DINÂMICA DAS COMUNIDADES MICROBIANAS FRENTE À CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL

A contaminação pelo rejeito proveniente do desastre não tem seus efeitos restringidos aos seres macroscópicos como os peixes (GOMES et al., 2017) e organismos bentônicos (BERNARDINO et al., 2019). Seus efeitos também afetam os seres microscópicos.

Os microrganismos são os responsáveis pela manutenção e a funcionalidade dos ecossistemas. Esses seres regem a maioria dos ciclos geoquímicos, como a redução do ferro e a biodisponibilidade de metais pesados. Os microrganismos são altamente sensíveis às contaminações dos seus habitats. Desta forma, o entendimento da alteração das suas populações nos auxilia entender os efeitos da contaminação na saúde do ecossistema a curto e médio prazo (MENEZES; CLIPSON; DOYLE, 2012; SILVER; PHUNG, 2005).

Mudanças na diversidade e na atividade dos microrganismos do solo, em resposta à contaminação por metais, foram observadas por diversos autores (CIARKOWSKA; SOŁEK-PODWIKA; WIECZOREK, 2014; HAGMANN et al., 2015; HU et al., 2014, 2016; WAHSHA et al., 2017). Estes estudos descrevem que algumas populações são mais abundantes em ambiente com altas concentração de metais, sendo consideradas indicadores de contaminação, como as classes Epsilonproteobacteria e Deltaproteobacteria em relação ao zinco (Zn) e cádmio (Cd), e os grupos Chloroflexi e Gammaproteobacteria para mercúrio (Hg) ou Firmicutes para cobre (Cu).

Para o rio Doce, alguns autores sugerem que as Streptomycetaceae (Actinobacteria) podem ser consideradas biomarcadoras de contaminação da água do rio (CORDEIRO et al., 2019). Segundo eles, os organismos desta família foram super-representados na maioria das amostras coletadas no rio Doce logo após o desastre. As Actinobacteria são um filo de bactérias típicas de solo e apresentam tolerância a metais pesados (NEWTON et al., 2011).

Além de indicadores de contaminação, os estudos de diversidade nos permitem identificar as comunidades presentes e suas funções. Esta informação contribui com a caracterização do ocorrido, além de auxiliar a identificação dos organismos potenciais na biorremediação do sistema. Dhal e Sar (2014), ao estudar a diversidade microbiana em rejeitos de uma mineração de urânio, identificaram que as populações microbianas oriundas do próprio ambiente eram capazes de regenerar a sustentabilidade do ambiente.

Além de análise de diversidade, uma outra forma de identificar os efeitos da contaminação é por meio das enzimas presentes no solo. As enzimas são proteínas modificadas capazes de acelerar a transformação de compostos complexos em substâncias mais simples. Por serem muito específicas e sensíveis às alterações ambientais, o estudo de atividade enzimática possibilita inferir sobre as alterações biogeoquímicas que estão ocorrendo naquele momento. Afinal, a maioria das enzimas são produzidas por bactérias durante o processo de catabolismo e, portanto, biodisponibilidade de elementos.

Entre as diversas enzimas do solo, três merecem destaque por estarem relacionadas aos ciclos biogeoquímicos e serem conhecidas como boas indicadoras de contaminação e qualidade do solo, são elas: a betaglucosidase, relacionada ao ciclo do carbono (C), arilsulfatase, relacionada ao ciclo do enxofre (S) e a fosfatase ácida, relacionada ao ciclo do fósforo (P) (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Com o objetivo de mensurar a alteração biológica em razão da presença do rejeito ao longo da profundidade do solo, realizamos a análise da atividade enzimática do solo do estuário do rio Doce, após dois anos do desastre (dezembro de 2017). Nossos resultados indicam o aumento da atividade microbiana nos primeiros 20 centímetros do solo (Figura 7). Entre as enzimas analisadas as que apresentam um comportamento mais sensível à contaminação são a arilsulfatase e a fosfatase ácida. Ambas enzimas apresentam picos de atividade nas áreas de maior concentração de rejeito (5-15 cm) indicando que a alta atividade biológica está relacionada à presença do rejeito.

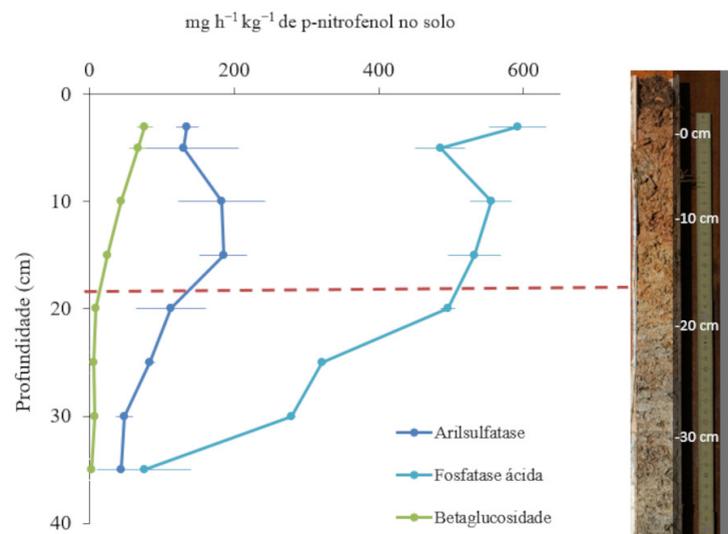


Figura 7. Atividade das enzimas arilsulfatase, fosfatase ácida e betaglucosidade ao longo do perfil do solo do estuário do rio Doce dois anos após o desastre. A linha pontilhada indica a área de maior influência do rejeito.
Fonte: Vasconcelos (2020).

Grande parte das enzimas estudadas são originárias da digestão extracelular de microrganismos do solo e por isso muitas vezes possuem grande correlação com consumo de matéria orgânica e portanto com a ciclagem biogeoquímica de nutrientes (BURNS et al., 2013). Afinal sabe-se que o aumento de cofatores, como oxigênio por exemplo, aumenta as atividades das enzimas hidrolíticas do solo envolvidas na quebra lábil de C (GRANDY; NEFF, 2008). Desta forma, os resultados apoiam o estudo e resultados acima citados neste capítulo que predizem a solubilização e liberação de metais a longo prazo nas áreas estuarinas (QUEIROZ et al., 2019).

5 A RELAÇÃO DA SAÚDE DO AMBIENTE E DA POPULAÇÃO

Os microrganismos possuem uma série de mecanismos de adaptação que lhes conferem tolerância a ambientes mais hostis. Para sobreviverem em áreas com alta concentração de metais, não é diferente. Inicialmente ocorre uma seleção dos tolerantes e posteriormente adaptação por meio de mutações, conhecido como mecanismo de resistência.

Há vários tipos de mecanismos de resistência a metais e muitos desses mecanismos também conferem aos microrganismos, resistência a antibióticos (HU et al., 2016; IMCHEN et al., 2018). Há um reconhecimento da importância da poluição ambiental, principalmente por metais traço, na emergência e disseminação de genes de resistência à antibióticos (ASHBOLT et al., 2013). Os locais onde ocorre contaminação são áreas de surgimento de resistência (GRAHAM et al., 2011), onde estes genes podem multiplicar-se em seus hospedeiros, e serem transferidos (horizontalmente) para outras populações bacterianas. E segundo alguns autores esta transferência de genes pode ocorrer de bactérias ambientais para bactérias patogênicas (BERENDONK et al., 2015; MARTI et al., 2013).

Apesar dos genes de resistência serem onipresentes nos mais diversos ambientes, o solo é o principal reservatório e fonte de sua diversidade, dada a quantidade de espécies microbianas existentes (SURETTE; WRIGHT, 2017). Imchen et al. (2018), ao comparar resistomas de diversos ambientes, confirmou a afirmação acima e identificou que em solos estuarinos há um enriquecimento de resistomas associados a cobalto (Co), zinco (Zn) e cádmio (Cd), e alguns antibióticos (e.g. acrilflavina, fluoroquinolona, β -lactamase e metilicina) em relação ao ambiente marinho, solos florestais, solos agrícolas e pastagens.

Em um estudo de metagenômica realizado ao longo do rio Doce foi identificada uma alta abundância relativa de genes de resistência a cobalto (Co), zinco (Zn) e cádmio (Cd). Além disso foram identificados genes relacionados indiretamente à contaminação como proteínas de membrana relacionada a efluxo de metais e estresse nitrosativo (CORDEIRO et al., 2019). Apesar da importância do tema poucos estudos sobre o aumento dos genes de resistência a metais e antibióticos foram realizados no rio Doce.

Estudos multidisciplinares são pontos fundamentais na compreensão da magnitude dos impactos dos desastres. Estes estudos permitem o diagnóstico da contaminação de maneira mais holística além de inovações na mitigação e recuperação dos danos. Cabe ressaltar que as regiões estuarinas impactadas possuem, além de grande importância ambiental, um importante valor social, haja vista que muitas famílias têm sua saúde e seu sustento relacionados a este ambiente.

6 REFERÊNCIAS

- ABRAHIM, G. M. S.; PARKER, R. J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 136, p. 227–238, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-007-9678-2>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- ARMADA, C. A. S. **The Environmental disasters of Mariana and Brumadinho and the Brazilian social environmental law state**. Itajaí: Univali, 2019. 14 p. Disponível em: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3442624>. Acesso em: 21 dez. 2019.
- ASHBOLT, N. J. et al. Human Health Risk Assessment (HHRA) for environmental development and transfer of antibiotic resistance. **Environmental Health Perspectives**, Triangle Park, v. 121, p. 993–1002, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.1206316>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- BERENDONK, T. U. et al. Tackling antibiotic resistance: The environmental framework. **Nature Reviews Microbiology**, London, v. 13, p. 310–317, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nrmicro3439>. Acesso em: 12 dez. 2019.

- BERNARDINO, A. et al. Chronic trace metals effects of mine tailings on estuarine assemblages revealed by environmental DNA. **Peer J**, London, v. 7, p. 27924, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27924v1>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- BIANCHI, T. S. **Biogeochemistry of estuaries, e os, transactions american geophysical union**. Oxford: Oxford University, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007EO520011>. Acesso em: 21 fev. 2020.
- BONNEVILLE, S.; VAN CAPPELLEN, P.; BEHRENDTS, T. Microbial reduction of iron(III) oxyhydroxides: Effects of mineral solubility and availability. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 212, p. 255–268, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.08.015>. Acesso em: 12 mar. 2020.
- BOSCO-SANTOS, A. et al. Fractionation of rare earth and other trace elements in crabs, *Ucides cordatus*, from a subtropical mangrove affected by fertilizer industry. **Journal of Environmental Sciences**, Los Angeles, v. 54, p. 69–76, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.05.024>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 58, p. 216–234, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- CANFIELD, D. E.; THAMDRUP, B.; HANSEN, J. W. The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: Iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. n. 57, p. 3867–3883, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90340-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90340-3). Acesso em: 12 out. 2019.
- CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9788586481567>. Acesso em: 26 fev. 2020.
- CARMO, F. F. D. et al. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, São Paulo, v. 15, p. 145–151, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>. Acesso em: 23 dez. 2019.
- CIARKOWSKA, K.; SOŁEK-PODWIKA, K.; WIECZOREK, J. Enzyme activity as an indicator of soil-rehabilitation processes at a zinc and lead ore mining and processing area. **Journal of Environmental Management**, London, v. 132, p. 250–256, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.022>. Acesso em: 24 mar. 2020.

- COPERTINO, M. S. et al. Seagrass and Submerged Aquatic Vegetation (VAS) habitats off the coast of Brazil: state of knowledge, conservation and main threats. **Brazilian Journal of Oceanography**, São Paulo, v. 64, p. 53–80, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-875920161036064sp2>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- CORDEIRO, M. C. et al. Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the world’s largest mining disaster. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 654, p. 1209–1217, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.112>. Acesso em: 22 maio 2020.
- DHAL, P. K.; SAR, P. Microbial communities in uranium mine tailings and mine water sediment from Jaduguda U mine, India: A culture independent analysis. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, Barking, v. 49, n. 6, p. 694–709, 2014.
- DOLBETH, M. et al. Anthropogenic and natural disturbance effects on a macrobenthic estuarine community over a 10-year period. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 54, n. 5, p. 576-585, May 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.12.005>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- EL BAZ, S. et al. **Resistance to and accumulation of heavy metals by actinobacteria isolated from abandoned mining areas**. 2015. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2015/761834/>. Acesso em: 23 jan. 2020.
- ESCOBAR, H. Mud tsunami wreaks ecological havoc in Brazil. **Science**, Washington, v. 80, n. 350, p. 1138–1139, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.350.6265.1138>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- FERREIRA, T. O. **Deposição de rejeitos no estuário do Rio Doce em novembro de 2015: (15 dias após a chegada do rejeito)**. 2015. 4 Fotografias.
- FONSECA, P. G.; FONSECA, I. G. Brazil’s greatest environmental catastrophe – Samarco’s Fundão Tailings Dam. **Environmental Policy and Law**, Lausanne, v. 46, p. 334–337, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3233/EPL-46505>. Acesso em: 21 nov. 2019.

- GABRIEL FA, Silva AG, Queiroz HM, Ferreira TO, Hauser-Davis RA, Bernardino AF. 2020a. **Ecological risks of metal and metalloid contamination in the Rio Doce estuary**. Integr Environ Assess Manag 00:1-6 DOI: 10.1002/ieam.4250.
- GABRIEL, F. A. **Bacia do Rio Doce nos estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES) e pontos amostrais monitorados no estuário do Rio Doce**. 2020b. 1 Fotografia.
- GABRIEL, F. A. **Coleta do sedimento do fundo do rio com pegador do tipo van-veen. Os sedimentos foram peneirados e as amostras acondicionadas e preservadas para posterior triagem laboratorial e identificação taxonômica dos organismos bentônicos**. 2018. 2 Fotografias.
- GARCIA, L. C. et al. Brazil's worst mining disaster: Corporations must be compelled to pay the actual environmental costs: corporations. **Ecological Applications**, Washington, v. 27, n. 1, p. 5-9, Jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/eap.1461>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- GOMES, L. E. O. et al. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 120, p. 28–36, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.056>. Acesso em: 13 fev. 2020.
- GRAHAM, D. W. et al. Antibiotic resistance gene abundances associated with waste discharges to the Almendares river near Havana, Cuba. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 45, p. 418–424, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es102473z>. Acesso em: 22 out. 2019.
- GRANDY, A. S.; NEFF, J. C. Molecular C dynamics downstream: the biochemical decomposition sequence and its impact on soil organic matter structure and function. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 404, p. 297–307, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.013>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- HAGMANN, D. F. et al. Effect of metal contamination on microbial enzymatic activity in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 91, p. 291–297, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.09.012>. Acesso em: 22 ago. 2019.

- HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. **Water Research**, Dübendorf, v. 14, n. 8, p. 975-1001, 1980. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8). Acesso em: 22 nov. 2019.
- HATJE, V.; BARROS, F. Overview of the 20th century impact of trace metal contamination in the estuaries of Todos os Santos Bay: past, present and future scenarios. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 64, n. 11, p. 2603-2614, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.009>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, London, v. 7, n. 1, p. 1-13, Dec. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>. Acesso em: 21 out. 2019.
- HIRST, A. J. Broad-scale environmental gradients among estuarine benthic macrofaunal assemblages of south-eastern Australia: implications for monitoring estuaries. **Marine and Freshwater Research**, East Melbourne, v. 55, n. 1, Jan. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/MF03011>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- HU, H. W. et al. Field-based evidence for copper contamination induced changes of antibiotic resistance in agricultural soils. **Environmental Microbiology**, Oxford, v. 18, p. 3896–3909, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13370>. Acesso em: 29 jan. 2020.
- HU, X. F. et al. Effects of mining wastewater discharges on heavy metal pollution and soil enzyme activity of the paddy fields. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 147, p. 139–150, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.08.001>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- IMCHEN, M. et al. Comparative mangrove metagenome reveals global prevalence of heavy metals and antibiotic resistome across different ecosystems. **Scientific Reports**, London, v. 8, p. 11187, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29521-4>. Acesso em: 15 fev. 2020.
- KENNISH, M. J. Environmental threats and environmental future of estuaries. **Environmental Conservation**, Lausanne, v. 29, p. 78–107, 2002. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2014.00041/full>. Acesso em: 18 jan. 2020.

- KRISTENSEN, E. et al. Influence of benthic macrofauna community shifts on ecosystem functioning in shallow estuaries. **Frontiers in Marine Science**, Berlin, Sept. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00041>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- LANCELLOTTI, D. A.; STOTZ, W. B. Effects of shoreline discharge of iron mine tailings on a marine soft-bottom community in northern Chile. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 48, n. 3/4, p. 303-312, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.08.005>. Acesso em: 22 nov. 2019.
- LIU, R. et al. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metals in Yangtze estuary sediment. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 110, p. 564–571, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.060>. Acesso em: 22 nov. 2019.
- MARTA-ALMEIDA, M. et al. Fundão Dam collapse: oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**, Oxford, v. 112, n. 1/2, p. 359-364, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.039>. Acesso em: 16 out. 2019.
- MARTI, R. et al. Impact of manure fertilization on the abundance of antibiotic-resistant bacteria and frequency of detection of antibiotic resistance genes in soil and on vegetables at harvest. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 79, p. 5701–5709, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/AEM.01682-13>. Acesso em: 23 set. 2019.
- MCLUSKY, D. S.; ELLIOTT, M. **The estuarine ecosystem: ecology, threats, and management**. Oxford: Oxford University, 2004. Disponível em: <https://www.oxford-scholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780198525080.001.0001/acprof-9780198525080>. Acesso em: 15 set. 2019.
- MENEZES, A.; CLIPSON, N.; DOYLE, E. Comparative metatranscriptomics reveals widespread community responses during phenanthrene degradation in soil. **Environmental Microbiology**, Oxford, v. 14, p. 2577–2588, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02781.x>. Acesso em: 28 jan. 2020.
- MIRANDA, L. S.; MARQUES, A. C. Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna – an example from the staurozoans (Cnidaria). **Biota Neotropica**, Campinas, v. 16, p. 1–3, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1676-0611>. Acesso em: 20 nov. 2019.

- MOFFETT, K. et al. Multiple stable states and catastrophic shifts in coastal wetlands: progress, challenges, and opportunities in validating theory using remote sensing and other methods. **Remote Sensing**, New York, v. 7, p. 10184–10226, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs70810184>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- NEWTON, R. J. et al. A guide to the natural history of freshwater lake bacteria. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, New York, v. 75, n. 1, p. 14-49, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/membr.00028-10>. Acesso em: 12 out. 2019.
- PILÓ, D. et al. How functional traits of estuarine macrobenthic assemblages respond to metal contamination? **Ecological Indicators**, Berlin, v. 71, p. 645–659, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.019>. Acesso em: 18 fev. 2020.
- QUEIROZ, H. M. et al. The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? **Science of the Total Environment**, Amsterdam, p. 637/638, p. 498-506, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370>. Acesso em: 23 dez. 2019.
- QUEIROZ, H. M. **Evidências morfológicas do processo de redução de Fe no solo do estuário do Rio Doce dois anos após o desastre. As setas amarelas indicam o solo acinzentado que é uma característica de ausência de ferro como agente pigmentante do solo. As setas vermelhas indicam a presença do rejeito, dado a coloração vermelha característica do rejeito.** 2020. 1 Fotografia.
- SANDILYAN, S.; KATHIRESAN, K. Decline of mangroves: a threat of heavy metal poisoning in Asia. **Ocean & Coastal Management**, Augustinusga, v. 102, p. 161–168, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.09.025>. Acesso em: 19 fev. 2020.
- SILVA, A.C. et al. Características químicas, mineralógicas e físicas do material acumulado em terraços fluviais, originado do fluxo de lama proveniente do rompimento de barragem de rejeitos de mineração de ferro em Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brasil. **Revista Espinhaço**, Diamantina, p. 44-53, 2017. Disponível em: <http://www.revistaespinhaco.com/index.php/journal/article/view/133>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- SILVER, S.; PHUNG, L.T. A bacterial view of the periodic table: Genes and proteins for toxic inorganic ions. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, Hampshire, v. 32, p. 587–605, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10295-005-0019-6>. Acesso em: 22 jan. 2020.

- SURETTE, M.; WRIGHT, G. D. Lessons from the environmental antibiotic resistome. **Annual Review of Microbiology**, Palo Alto, v. 8, n. 71, p. 309-329, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-090816-093420>. Acesso em: 11 abr. 2020.
- VASCONCELOS, A. L. **Atividade das enzimas arilsulfatase, fosfatase ácida e betaglucosidade ao longo do perfil do solo do estuário do rio Doce dois anos após o desastre. A linha pontilhada indica a área de maior influência do rejeito.** 2020. 1 Fotografia.
- WAHSHA, M. et al. Microbial enzymes as an early warning management tool for monitoring mining site soils. **Catena**, Amsterdam, v. 148, p. 40–45, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.021>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- WALTERS, B. B. et al. Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: a review. **Aquatic Botany**, Amsterdam, v. 89, p. 220–236, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.02.009>. Acesso em: 25 nov. 2019.
- WILSON, J. G.; JEFFREY, D. W. Benthic biological pollution indices in estuaries. In: KRAMER, K. J. M. (ed.). **Biomonitoring of coastal waters and estuaries**. Boca Raton: CRC, 1994. p. 311-327.
- YE, S. et al. Pyritization of trace metals in estuarine sediments and the controlling factors: a case in Jiaojiang Estuary of Zhejiang Province, China. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 61, p. 973–982, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0416-7>. Acesso em: 23 jan. 2020.

IMPACTOS DA RUPTURA DA BARRAGEM DE REJEITO DA SAMARCO NA CONCENTRAÇÃO DE METAIS E ARSÊNICO EM *Geophagus brasiliensis* DA BACIA DO RIO DOCE

Natália Maria de Freitas Vicente^{1*}

Frederico Fernandes Ferreira²

Neucir Szinwelski³

Carlos Frankl Sperber⁴

1 INTRODUÇÃO

Em 2015, o Brasil vivenciou o maior desastre ambiental de sua história, quando o rompimento da barragem de rejeitos da SAMARCO, em Mariana – MG, Brasil, lançou na bacia do rio Doce uma enorme enxurrada de rejeitos de mineração de ferro. Esse evento chamou atenção das comunidades científicas, governos, sociedade civil e o setor privado para a contaminação dos rios da bacia por elementos tóxicos e suas consequências para a saúde ambiental e humana na região. Desde então, universidades, agências de fomento à pesquisa, instituições governamentais e particulares, se mobilizaram para desenvolver estratégias visando compreender o que ocorreu e as dimensões de seus impactos, visando a recuperação tanto do meio

¹Universidade Federal de Viçosa (UFV), Laboratório de Orthoptera, Avenida P.H. Rolfs s/n – Campus Universitário, cep: 36570-977. E-mail: natalliavicente@gmail.com

²Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal de Viçosa (UFV)

³Universidade Estadual do oeste do Paraná, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde (UNIOESTE)

⁴Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Viçosa (UFV)

*Autor de correspondência

ambiente quanto dos diversos aspectos humanos (economia, sociedade, cultura etc.). Dentre essas iniciativas, formou-se a rede de pesquisa “Terra-Água”, unindo três universidades mineiras: Universidade Federal de Viçosa (UFV), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Universidade Vale do Rio Doce (UNIVALE). Nessa rede de pesquisa, estudamos como os peixes e também os organismos que habitam as margens dos rios, como as formigas, foram afetados pelo rompimento da barragem da SAMARCO e pelo despejo de rejeitos na bacia do rio Doce.

A seguir apresentamos alguns dos resultados dos estudos realizados pela rede Terra-Água, em que avaliamos os efeitos causados pela enxurrada de rejeitos na concentração de metais pesados e arsênio nos músculos de *Geophagus brasiliensis*, também conhecido como Cará, Acará-diadema, Acaraí ou Papaterra. Antes, porém, convidamos você para um passeio sobre os temas que embasam nosso estudo: (i) O que são metais pesados? (ii) Qual era o estado da bacia do rio Doce antes do desastre? e (iii) Quais foram os impactos ambientais do desastre na bacia do rio Doce?

1.1 O que são metais pesados?

Metais pesados ocorrem naturalmente em rochas, solo, água e atmosfera. Apesar de seu uso ter sido fundamental para o progresso e sucesso da civilização humana, ainda existe muito debate entre os cientistas sobre o que são “metais pesados”. Nós vamos considerar metais pesados como “um termo coletivo aplicado a um grupo de metais ou metalóides com uma densidade atômica maior que 6g/cm^3 ” (DUFFUS, 2002). Só para comparar, 1 cm^3 do magnésio (Mg) pesa 1,7 gramas, enquanto que 1 cm^3 de qualquer metal pesado pesa, pelo menos, 6 gramas. Essa diferença ocorre devido aos átomos dos metais pesados ficarem mais próximos uns dos outros, ou seja, são mais densos e, portanto, mais pesados.

Geralmente, o termo “metal pesado” é usado quando nos referimos a substâncias tóxicas e contaminantes, que oferecem risco à saúde humana e ao meio ambiente. Mas não é bem assim. Assim como o velho ditado “A dose faz o veneno”, a toxicidade da maioria dos metais está ligada à sua concentração. A partir do momento que a concentração de um metal ultrapassa um determinado limite, ele passa a apresentar efeitos tóxicos. Esses limites são estudados pelos cientistas para os diferentes metais e em diferentes situações, como no solo, na água e nos organismos. O cobre (Cu), por exemplo, participa de vários processos no nosso organismo e a falta de cobre pode levar à anemia (CORDANO, 1998). Já em altas concentrações, o

cobre pode causar dor abdominal, cefaleias, náuseas, vômitos, tonturas, diarreia, entre outros sintomas (BREMNER, 1998). Já o chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cádmio (Cd) e arsênio (As) são extremamente tóxicos mesmo em baixas concentrações e sua acumulação pode provocar graves doenças, como câncer (BREMNER, 1998). A rigor o arsênio (As) não é um metal pesado e sim um metalóide, pois embora tenha alta densidade atômica, esse elemento não tem alta condutividade elétrica (DUFFUS, 2002).

Existem duas características importantes para compreender a toxicidade de metais pesados: a biodisponibilidade e a bioacumulação. A biodisponibilidade é uma propriedade que relaciona a “forma” que o metal pesado é encontrado na natureza e como isso afetará sua absorção pelos organismos. Por exemplo, em solos com pH abaixo de 4,0 (solos ácidos), o alumínio (Al) aparece na sua forma iônica Al^{3+} . Esta forma é tóxica para algumas plantas. A adição de calcário nos solos eleva o pH e transforma o Al^{3+} em compostos estáveis, como o hidróxido de alumínio ($Al(OH)_3$), diminuindo a biodisponibilidade (ou seja, sua absorção pelas plantas) da sua forma tóxica Al^{3+} . Em outros casos, alterações do meio ambiente podem tornar os metais pesados mais biodisponíveis. É o caso do aumento de absorção e acumulação de cromo (Cr) e zinco (Zn) nos peixes em locais com maiores temperaturas da água, baixo nível de oxigênio dissolvido e baixo pH (CANPOLAT, 2013).

Já a bioacumulação é o processo pelo qual os metais pesados são absorvidos e acumulados nos tecidos dos organismos ao longo da sua vida. Quando a bioacumulação ocorre entre espécies de diferentes níveis tróficos, damos o nome de biomagnificação, que é quando um predador, além de absorver metais diretamente do ambiente, também absorve os metais contidos em suas presas, e acumula estes metais em seus tecidos. Sendo assim, quando ocorre biomagnificação, os organismos que estão no topo da cadeia alimentar apresentam maior acúmulo de metais pesados, uma vez que, além de acumular os metais pelo contato direto, acumulam também os metais presentes nos organismos dos quais se alimentam. A biomagnificação é especialmente importante para o ser humano, já que somos consumidores de topo de cadeia, uma vez que nos alimentamos de outros predadores. Outro processo conhecido é a biodiluição, que é quando a concentração de metais diminui com o peso do indivíduo (ou seja, com sua idade) ou com o aumento no nível trófico na cadeia alimentar. A biodiluição pode estar relacionada com a eficiência de excreção dos metais que alguns organismos possuem (WATANABE et al., 2008).

A atividade humana tem provocado aumento na concentração dos metais pesados no ambiente. Isso acontece porque muitos metais pesados são subprodutos de produtos químicos utilizados na agricultura (fertilizantes e defensivos), do processo

de extração de minerais e da industrialização. O chumbo, por exemplo, apesar de não ser um elemento encontrado comumente na água, é frequentemente introduzido pelo homem através de produtos como plástico, tintas, pigmentos e aditivos da gasolina (KLAASSEN, 2001). O mercúrio (Hg) é outro metal pesado muito tóxico cuja concentração natural é baixa, porém, seu uso na mineração de ouro contaminou (e contamina ainda hoje) diversos cursos d'água no mundo. O cádmio (Cd) é utilizado principalmente em baterias de produtos eletrônicos (celulares, computadores) e seu descarte incorreto gera a contaminação dos solos e da água.

Perto de grandes cidades, é muito comum se encontrar poluição dos rios acima dos níveis permitidos de metais pesados (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM, 2005). A bacia do rio Doce é uma das mais densamente povoadas do Brasil, com cerca de 3,5 milhões de residentes, distribuídos em 229 municípios (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, 2015). Veremos a seguir como essa intensa atividade humana influenciou a degradação da bacia do rio Doce e a acumulação de metais pesados ao longo do seu histórico de ocupação.

1.2 Qual era o estado da bacia do rio Doce antes do desastre?

A ocupação do território na bacia do rio Doce esteve atrelada à mineração desde os primórdios. A busca pelo ouro já no século XVIII se valia da escavação e represamento das águas ao longo da cabeceira do Carmo, com uso de mercúrio (Hg) para amalgamar partículas de ouro (GONÇALVES, 2007). A partir da segunda metade do século XVIII, o declínio da exploração de ouro estimulou o movimento de ocupação da bacia. As novas levas de imigrantes eram motivadas pela possibilidade favorável do solo para a instalação de atividades agropecuárias (ESPÍNDOLA et al., 2016; FELLIPE et al., 2016). A construção da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), iniciada em 1903 e concluída em 1942, ligando Vitória (Espírito Santo) a Itabira do Mato Dentro (Minas Gerais) (ROSA, 1976) impulsionou a ocupação do vale do rio Doce. Com a construção da ferrovia, as áreas florestais foram devastadas por madeireiros e fazendeiros (ESPÍNDOLA et al., 2016). Este eixo ferroviário possibilitou a ocupação do território da bacia e o impulsionamento da economia regional, com destaque para as atividades agropastoris, a mineração de ferro, a siderurgia e, a partir da década de 1940, a silvicultura do eucalipto (ESPÍNDOLA et al., 2016).

Todo esse processo histórico de ocupação extrativista, aliado à densidade populacional e intensa atividade econômica da região, fizeram da bacia do rio Doce uma das drenagens brasileiras mais comprometidas por impactos das atividades humanas. A poluição por esgotos é a principal causa de degradação da qualidade da água da bacia nos dias atuais, como mostram os dados do IGAM (2005) em resultados obtidos entre 1997 e 2003: para as estações de amostragem da parte mineira da bacia, os parâmetros que apresentaram maior número de violações aos parâmetros mínimos de qualidade da água foram fosfato total, coliformes fecais e coliformes totais. Essas ocorrências, acima dos limites legais, têm como principal causa a falta de tratamento de esgoto: das 230 cidades que formam a bacia, 191 (83%) (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010) lançam seus dejetos *in natura* (sem tratamento) nos rios. A contaminação por fosfato também pode se dar por carreamento para os rios de excesso de fertilizantes usados para adubação em plantações de eucalipto, para elevar os níveis de fósforo no solo. Ainda segundo o IGAM (2005), a presença da suinocultura (criação de porcos) é responsável pela ocorrência de elevados níveis de zinco (Zn).

Os impactos da extração de ouro na bacia teriam disponibilizado ou liberado uma grande quantidade de elementos tóxicos que foram se acumulando na bacia do rio Doce desde o século XVIII até os dias atuais. Foram encontradas elevadas concentrações de metais como mercúrio (Hg) e arsênio (As) em sedimentos do ribeirão do Carmo e no rio Gualaxo, atribuídas às atividades de extração mineral, inclusive das já exauridas (COSTA, 2006; ELEUTÉRIO, 1997). Diferentes estudos têm apresentado evidências contraditórias sobre a quantidade de metais pesados no rio Doce após o desastre de Mariana: níveis normais (CPRM; ANA, 2015; GOVERNADOR VALADARES, 2015) – níveis elevados: Relatório SAAE Baixo Guandu (BAIXO GUANDU, 2015; CARVALHO et al., 2017; GIAIA, 2015; IGAM, 2015). Ainda não se sabe se os valores aumentados de metais pesados na calha do rio Doce foram causados pela presença de metais no rejeito da barragem da SAMARCO, ou se o revolvimento do leito do rio pela avalanche de lama de rejeitos foi o que disponibilizou esses elementos que estavam depositados e presos no fundo, acumulados ao longo da história de atividades minerárias na bacia.

A forte remoção e alteração da cobertura vegetal ao longo de todo processo histórico de ocupação potencializa o quadro de fragilidade da bacia do rio Doce. O desmatamento predatório levou a um intenso processo de erosão que não só afeta a qualidade das águas pela lixiviação (que é a extração ou solubilização de constituintes químicos de uma rocha, mineral, solo, entre outros, pela ação de lavagem da água) do alumínio (Al) presente nas rochas e solo da região e de agroquímicos,

para os cursos d'água, mas também causa o assoreamento (processo de recobrimento do fundo do rio por solo de outro local, reduzindo sua profundidade), o que intensifica as inundações na bacia (IGAM, 2005).

Assim, vimos que a bacia do rio Doce já vinha sofrendo com os impactos da atividade humana há muito tempo. O estado anterior ao desastre já era preocupante em termos ambientais, sociais e de segurança alimentar. O rompimento da barragem da SAMARCO somou-se a esse longo histórico de degradação da bacia do rio Doce e tornou ainda mais urgente a necessidade de recuperação, não para o estado anterior ao desastre, que era ruim, mas sim próximo ao seu estado original de conservação, anterior à degradação ambiental.

1.3 Quais foram os impactos ambientais do desastre na bacia do rio Doce?

O rompimento da barragem da SAMARCO lançou de 35 a 62 toneladas de rejeito na bacia do rio Doce. Em seu trajeto, a lama de rejeito removeu um total de 1.587 ha de vegetação, sendo 511,08 ha de Mata Atlântica (MINAS GERAIS, 2016). Foram devastados remanescentes de matas ciliares e de matas de galeria, essenciais para manter a estabilidade das margens, a diversidade biológica e as funções ecossistêmicas da interface entre os habitats aquáticos e terrestres. A biota aquática depende de fontes de alimentos externas ao meio aquático além de uma diversidade de substratos para que possam se alimentar, reproduzir e evitar predadores (BUNN; DAVIES; KELLAWAY, 1997; RIOS; BAILEY, 2006; ROQUE; CORBI; TRIVINHO-STRIXINO, 2003). Além disso, as florestas ripárias evitam mudanças estruturais do canal, pois promovem a estabilidade das margens, evitando o assoreamento e a consequente redução na profundidade do canal (FERREIRA et al., 2011). Essa integridade estrutural dos habitats aquáticos é de fundamental importância para a preservação da biodiversidade aquática. A vegetação ripária funciona ainda como uma barreira natural para a carga de partículas de solo trazida pelas enxurradas, impedindo que sedimentos e poluentes vindos de regiões adjacentes, como agrotóxicos, fertilizantes químicos e resíduos de depósitos de lixo, contaminem a calha do rio, afetando os organismos aquáticos e a qualidade da água (DOSSKEY et al., 2010; LITZ et al., 2011).

A enxurrada de rejeito descarregada pelo rompimento da barragem da SAMARCO, atingiu 663 km de rios da bacia, alterando a qualidade dos cursos d'água e causando morte imediata da maior parte dos organismos aquáticos. A elevada turbidez causada pela quantidade de sólidos em suspensão levou à mortandade de plantas aquáticas pela inviabilidade da fotossíntese e dos peixes por asfixia (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS

RENOVÁVEIS - IBAMA, 2015). Foram retiradas 11 toneladas de peixes mortos (IBAMA, 2015) da bacia do rio Doce após a passagem do rejeito. No seu trajeto, a enxurrada de lama ressuspendeu os sedimentos nas partes mais profundas do leito desses rios, aumentando para níveis tóxicos a concentração de metais pesados que estavam retidos nos sedimentos (MINAS GERAIS, 2016). A imensa quantidade de lama se acumulou nos leitos, alterando completamente o habitat de espécies aquáticas de fundo. O rejeito funcionou como um “asfaltamento” do fundo do rio, recobrando abrigos e microhabitats onde peixes se alimentavam. O assoreamento, principalmente nos leitos dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e parte do Doce, isolou os organismos que sobreviveram, provocando o que chamamos de fragmentação de habitat e interrupção do fluxo gênico, que é a interrupção do contato e reprodução entre os organismos de diferentes populações de uma mesma espécie.

A passagem da lama não somente contaminou os rios e removeu a vegetação, mas levou ou soterrou a serapilheira e seus bancos de sementes das margens, comprometendo a resiliência, que é a capacidade de recuperação, e o processo de sucessão das áreas afetadas (IBAMA, 2015). Devido à sua composição, a lama de rejeitos tem baixa fertilidade e constitui uma barreira física que impede o crescimento das raízes de vegetais assim como impede o desenvolvimento de micro-organismos aeróbicos, importantes para o crescimento das plantas (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2015). Dessa forma, as alterações causadas pelo rompimento da barragem da SAMARCO, impactaram tanto organismos aquáticos quanto terrestres. Os valores elevados de metais pesados nas águas da bacia do rio Doce podem ser resultado do revolvimento do leito do rio já contaminado ao longo do histórico de sua ocupação. Até agora, as medições da concentração de metais pesados conhecidas foram todas referentes à água ou solo da bacia do rio Doce. O estudo realizado pela rede Terra-Água é o primeiro a medir a concentração de metais pesados e arsênio nos peixes coletados ao longo da bacia. Nosso estudo foi realizado três anos após a exposição da comunidade de peixes aos rejeitos da barragem da SAMARCO. Veremos e discutiremos os nossos resultados no próximo tópico.

2 EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM NA CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS E ARSÊNIO EM *Geophagus brasiliensis*

Avaliamos os efeitos do rompimento da barragem da SAMARCO na concentração de metais pesados e arsênio no tecido de *Geophagus brasiliensis* (Figura 1). Analisamos esta espécie, também chamada de Cará, Acará-diadema, Acaráí ou

Papaterra, porque ela esteve presente com maior número de indivíduos tanto em locais afetados quanto em locais não afetados pelos rejeitos. Nós comparamos peixes coletados nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, nas porções atingidas pelos rejeitos, com afluentes (rios que deságuam no rio Doce) que não foram atingidos diretamente pelos rejeitos. Analisamos o tecido muscular dos peixes para medir a concentração de 12 elementos: prata (Ag), alumínio (Al), arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), mercúrio (Hg), manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn).



Figura 1. Espécie nativa da bacia do rio Doce *Geophagus brasiliensis*, também conhecida como Cará, Acará-diadema, Acarái ou Papaterra.
Fonte: Dos Autores (2019).

Para 10 dos elementos químicos analisados (prata, alumínio, cádmio, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) a concentração nos peixes coletados em locais atingidos pelo rejeito foi igual à dos peixes coletados nos locais que não foram atingidos pelo rejeito. Entretanto, para dois elementos, arsênio e mercúrio, houve maiores concentrações nos peixes de locais atingidos pelos rejeitos, enquanto para prata e zinco a concentração nos peixes de locais atingidos foi menor que em peixes de locais não atingidos pelos rejeitos. As maiores concentrações de arsênio e mercúrio, mesmo nos peixes de

locais atingidos pelos rejeitos, foram menores que os limites de segurança estabelecidos pela ANVISA (2019), porém são preocupantes, pois estes dois elementos são muito tóxicos para o ser humano. Isso não implica, necessariamente, que o rejeito em si é que trouxe arsênio e mercúrio. A bacia do rio Doce já vinha sofrendo contaminação por mercúrio e arsênio devido à intensa atividade minerária. Citamos por exemplo, a contaminação histórica por mercúrio para a extração do ouro. O arsênio é comum em rochas do quadrilátero ferrífero do estado de Minas Gerais, e a extração de minérios pode ter sido a responsável pela liberação deste elemento para os rios. Como os rejeitos não tem arsênio e mercúrio em altas concentrações, o que pode ter aumentado a quantidade destes elementos nos locais atingidos pelos rejeitos foi a solubilização destes elementos que estavam inertes no sedimento dos rios (FERNANDES et al., 2016). O despejo de milhões de toneladas de rejeito de forma repentina na calha do rio gerou uma enxurrada de lama que revolveu seu leito e suas margens, provavelmente desprendendo do fundo dos rios elementos que haviam sido acumulados vindo de atividades minerárias antigas. Antes da torrente de rejeitos estes elementos estavam provavelmente estabilizados e depositados no sedimento. Dessa forma, mesmo que o rejeito em si fosse de fato inerte, sem elementos tóxicos, ele teve uma ação física no fundo do rio, que liberou elementos tóxicos, aumentando sua absorção pelos peixes.

A concentração de arsênio diminuiu com o peso dos peixes, ou seja, quanto maior (mais pesado) o peixe, menor foi a concentração desse elemento, tanto em locais afetados quanto em locais não afetados pelos rejeitos. Esse resultado sugere que, no Cará (*G. brasiliensis*), a excreção de arsênio supera sua absorção, ou seja, à medida que os peixes vão crescendo, eles vão diluindo a quantidade de arsênio que acumulam nos seus tecidos. Chamamos este processo de biodiluição. Os peixes evoluíram diferentes mecanismos de transformar elementos tóxicos em formas menos tóxicas, que são prontamente excretadas (BEARS; RICHARDS; SCHULTE, 2006). *G. brasiliensis* é uma espécie que se alimenta de detritos no fundo do rio (ABELHA; GOULART, 2004), o que provavelmente leva a uma alta exposição ao arsênio. Uma excreção eficiente de arsênio teria um alto valor adaptativo (ou seja, aumenta as chances de sobrevivência e reprodução) para uma espécie que ingere altos níveis de compostos tóxicos. Assim, a redução dos níveis de arsênio com o peso dos peixes pode ser uma adaptação específica para essas populações de *G. brasiliensis*. Mais estudos são necessários para avaliar essa hipótese.

Não foi nosso objetivo com esse estudo avaliar a segurança do consumo de peixes da bacia do rio Doce. Apesar disso, comparamos os valores da concentração de metais pesados e arsênio que encontramos com regulamentos de limites seguros

de consumo. Não foram observados em nossos resultados níveis de concentração de metais pesados e arsênio no tecido dos peixes acima dos limites máximos permitidos, conforme a ANVISA. Entretanto, os limites considerados seguros para consumo não consideram explicitamente a bioacumulação dos metais no ser humano, ou seja, uma pessoa que come todo dia a porção permitida de peixes vai acumular os metais ingeridos a cada dia, a longo de sua vida. Os limites também não consideram eventuais efeitos sinérgicos, ou seja, quando dois metais são ingeridos juntos, a ação tóxica deles se multiplica. Além disso, a própria ANVISA (em nota técnica 08/2019, emitida em maio de 2019) aponta que foram encontrados peixes contaminados acima desse limite para mercúrio (peixes de água doce), cádmio e chumbo (peixes de água salgada) na bacia do rio Doce.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os metais pesados e arsênio são importantes elementos encontrados na natureza. Eles fazem parte de processos biológicos necessários para a vida e também são componentes básicos dos equipamentos que usamos no nosso dia a dia, como celulares, computadores e impressoras. Entretanto, se a quantidade limite de contato com esses metais for ultrapassada, eles se tornarão tóxicos e irão acarretar graves problemas de saúde humana e impactos ambientais severos. O descarte de lixo contendo metais pesados, assim como a sua extração pela indústria mineradora, devem ser realizados de forma a evitar a contaminação dos rios, ar, solo e florestas. Esse cuidado não foi tomado ao longo da ocupação da bacia do rio Doce. O rompimento da barragem da SAMARCO em Mariana somou-se ao longo histórico de degradação da bacia, multiplicando exponencialmente os graves impactos à população e ao ecossistema. Nossos estudos demonstram que no tecido de *G. brasiliensis* coletados na bacia do rio Doce, a concentração de arsênio e mercúrio foram elevadas pelo rejeito proveniente da barragem. Esses resultados são preocupantes, já que esses dois elementos são tóxicos, mesmo em pequenas quantidades. Apesar de não termos encontrado concentrações de metais pesados nos tecidos dos peixes acima dos limites considerados seguros para consumo humano pela ANVISA, a intensa atividade pesqueira da região e a bioacumulação desses metais pode colocar em risco a população do entorno que se alimentar desses peixes. É urgente a recuperação da bacia do rio Doce não para o estado anterior ao desastre, mas sim buscando seu estado original de conservação, revertendo

não só os impactos imediatos do rompimento da barragem da SAMARCO, como o processo de degradação ambiental acumulada ao longo de várias décadas nessa bacia.

O desastre de Mariana não foi suficiente para evitar novos desastres semelhantes. Três anos, após, a barragem do córrego do Feijão da mineradora Vale, situada na cidade de Brumadinho, rompeu-se, provocando 270 mortes e 11 “desaparecimentos”, além de outras 50 barragens sob alto risco de rompimento em Minas Gerais. Precisamos rever urgentemente a forma de exploração de recursos naturais, em particular na mineração. Vemos o rompimento da barragem da SAMARCO como um símbolo do acúmulo de degradação e sobre-exploração dos recursos naturais, sem o devido cuidado com os riscos ambientais, sociais/humanos e econômicos.

4 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnologia (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e bolsas de estudo concedidas aos autores.

5 REFERÊNCIAS

ABELHA, M. C. F.; GOULART, E. Oportunismo trófico de *Geophagus brasiliensis* (Quoy & Gaimard, 1824) (Osteichthyes, Cichlidae) no reservatório de Capivari, Estado do Paraná, Brasil. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 26, n. 1, p. 37-45, 2004.

BAIXO GUANDU (ES). Prefeitura Municipal. **Relatório analítico parcial SAAE**. 2015. Disponível em: [http://www.pmbg.es.gov.br/adm/ckfinder/userfiles/files/RELATORIO %20002-63866-96.pdf](http://www.pmbg.es.gov.br/adm/ckfinder/userfiles/files/RELATORIO%20002-63866-96.pdf). Acesso em: 10 dez. 2019.

BEARS, H.; RICHARDS, J. G.; SCHULTE, P. M. Arsenic exposure alters hepatic arsenic species composition and stress-mediated gene expression in the common killifish (*Fundulus heteroclitus*). **Aquatic Toxicology**, Amsterdam, v. 77, p. 257-266, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2005.12.008>. Acesso em: 222 jun. 2019.

- BREMNER, I. Manifestations of copper excess. **American Journal of Clinical Nutrition**, New York, v. 67, p.1069S-1073S, 1998.
- BUNN, S. E.; DAVIES, P. M.; KELLAWAY, D. M. Contributions of sugar cane and invasive pasture grass to the aquatic food web of a tropical lowland stream. **Marine and Freshwater Research**, East Melbourne, v. 48, p. 173-179, 1997.
- CANPOLAT, O. The determination of some heavy metals and minerals in the tissues and organs of the *Capoeta umbla* fish species in relation to body size, sex, and age. **Ekoloji**, Dübendorf, v. 22, n. 87, p. 64-72, 2013.
- CARVALHO, M. S. et al. Concentração de metais no Rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. **Acta Brasiliensis**, Campina Grande, v. 1, n. 3, p. 37-41, 2017.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM)/AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Monitoramento especial da bacia do rio Doce. Relatório 1-Acompanhamento da onda de cheia**. Belo Horizonte- MG: CPRM/ANA, 2015. Disponível em: www.cprm.org.br. Acesso em: 21 nov. 2019.
- CONSORCIO 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**. 2010. 472 p. (Contrato nº 043/2008 – IGAM). Disponível em: http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Doce/CBH/relatorios/PIRH_Doce_Volume_I.pdf. Acesso em: 15 ago. 2019.
- CORDANO, A. Clinical manifestations of nutritional copper deficiency in infants and children. **American Journal of Clinical Nutrition**, New York, v. 67, p. 1012S-1016S, 1998.
- COSTA, A. T. **Registro histórico de contaminação por metais pesados associados a exploração aurífera no alto e médio curso na bacia do ribeirão do Carmo**. 2006. 257 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- DOSSKEY, M. G. et al. the role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 46, n. 2, p. 261-277, 2010.

- DUFFUS, J. “Heavy metals” a meaningless term. **Pure and Applied Chemistry**, Oxford, v. 74, n. 5, p. 793-807, 2002. (IUPAC Technical Report). Disponível em: <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- ELEUTÉRIO, L. **Diagnóstico da situação ambiental da cabeceira da bacia do rio Doce, MG, no âmbito das contaminações por metais pesados em sedimentos de fundo**. 1997. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: apoio ao plano de recuperação agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- ESPÍNDOLA, H. S. et al. Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. **Journal of Social, Technological and Environmental Science**, Anápolis, v. 5, n. 3, p. 72-100, 2016.
- FELIPPE, M. F. et al. Conexões geo-históricas e contemporâneas entre ocupação territorial, degradação ambiental e rarefação hídrica na bacia do rio Doce. **Geografias**, Belo Horizonte, Edição Especial, p. 203-222, 2016.
- FERNANDES, G. W. et al. Deep into the mud: ecological and socioeconomic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1679007316301104?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jan. 2020.
- FERREIRA, A. et al. Riparian coverage affects diets of characids in neotropical streams. **Ecology of Freshwater Fish**, Copenhagen, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0633.2011.00518.x>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- GIAIA. **Relatórios técnicos**. 2015. Disponível em: <http://giaia.eco.br/>. Acesso em: 21 out. 2019.
- GONCALVES, A. L. As técnicas de mineração nas Minas Gerais do século XVIII. In: RESENDE, M. E. L.; VILLALTA, L. C. (org.). **As minas setecentistas**. Belo Horizonte: Autentica; Companhia do Tempo, 2007. p. 159-186.

GOVERNADOR VALADARES (MG). Prefeitura Municipal. **Relatório SAAE**. 2015. Disponível em: http://www.valadares.mg.gov.br/Materia_especifica/22642/SAAE-analisa-regularmente-agua-do-Rio-Doce. Acesso em: 12 nov. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Brasília, DF: Diretoria de Proteção Ambiental (DIPRO); Coordenação Geral de Emergências Ambientais (CGEMA), 2015. 38 p. (Laudo Técnico Preliminar).

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Diagnóstico consolidado da bacia**. 2005. Disponível em: <http://www.riodoce.cbh.gov.br/Diagnostico2005/diagnostico.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2019.

KLAASSEN, C. **Casarett and Doull's Toxicology: the basic science of poisons**. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2001. p. 812-837.

LITZ, N. T. et al. Comparative studies on the retardation and reduction of glyphosate during subsurface passage. **Water Research**, Dübendorf, v. 45, n. 10, p. 3047-3054, 2011.

MINAS GERAIS (Estado). **Relatório: avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana, Minas Gerais, 2016. 287 p.

RIOS, S. L.; BAILEY, R. C. Relationship between riparian vegetation and stream benthic communities at three spatial scales. **Hydrobiologia**, The Hague, v. 553, p. 153-160, 2006.

ROQUE, F. O.; CORBI, J. J.; TRIVINHO-STRIXINO, S. Macroinvertebrates on different technosubstrates in a stream of an urban area of Sao Carlos - SP, Brazil. **Multiciência**, São Carlos, v. 5, p. 172-177, 2003.

ROSA, L. B. R. **Companhia Estrada de Ferro de Vitória a Minas: 1890-1940**. 1976. 199 p. (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

WATANABE, K. et al. Biodilution of heavy metals in a stream macroinvertebrate food web: evidence from stable isotope analysis. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 394, n. 1, p. 57–67, 2008.

Seção **2**

RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA



REMEDIAÇÃO E RECUPERAÇÃO DA MATA CILIAR ATINGIDA PELOS REJEITOS DA BARRAGEM DE FUNDÃO, MARIANA/MG: UM MODELO BEM-SUCEDIDO

Maria Rita Scotti¹
Alessandra R. F. Gomes¹
Arthur de Carvalho Antão¹
Tomas Jansen Lacerda¹
Samuel Lourenço L. Silva¹
Mirelli B. Medeiros²
Stael Alvarenga²
Carlos Henrique B. Santos³
Everlon C. Rigobelo³

1 INTRODUÇÃO

A ruptura da barragem de Fundão (Mariana/MG) em novembro de 2015, derramou cerca de 43 milhões de m³ de rejeitos ao longo da Bacia do rio Doce, especialmente sobre os rios Gualaxo do Norte e rio do Carmo (SILVA; FERREIRA; SCOTTI, 2015), destruindo fragmentos de áreas preservadas de Mata Atlântica e atingindo 36 municípios. Para a avaliação do impacto sobre a biota é absolutamente necessário conhecer a composição e origem deste rejeito.

No processo de beneficiamento do minério de ferro, diferentes procedimentos podem ser empregados para a extração do mesmo, visando a sua maior concentração. Dentre esses procedimentos, o sistema de flotação é o mais usado e baseia-se na

¹Departamento de Botânica/ICB/UFMG;

²Escola de Arquitetura /UFMG Programa Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável; ³Dep. Produção Vegetal/ Universidade do Estado de São Paulo /Unesp Jaboticabal.

separação dos minerais pelas características de afinidade pela água (materiais hidrofílicos) daquelas que são repelidas pela água (materiais hidrofóbicos). Enquanto aquelas partículas hidrofóbicas tendem a flutuar até a superfície permanecendo retidas em uma camada de espuma, aquelas hidrofílicas permanecem em suspensão e podem ser carregadas separadamente daquelas hidrofóbicas. Para que essa separação ocorra, é necessário aplicação de uma solução contendo aminas em elevado pH (>9,0), que é obtido pela adição de hidróxido de sódio (NaOH), o qual favorece a repulsão eletrostática entre as partículas.

A flotação catiônica reversa tem sido utilizada pela Samarco desde o final da década de 1970. Este sistema ocorre em meio aquoso, consistindo na precipitação do minério de ferro e flotação do material restante na ganga (rejeito), que contém barita (BaSO_4), hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), silte, argila, quartzo (SiO_2) e outros minerais da rocha mãe. A adição do amido ao sistema ajuda a precipitar o ferro. As moléculas de amido adsorvidas na superfície da hematita fazem com que essas partículas sigam o fluxo da água, sendo assim removidas na parte inferior das máquinas de flotação, constituindo o concentrado (ARAÚJO et al., 2008).

Além disso, o sistema de beneficiamento recebe o hidróxido de sódio (NaOH) e as aminas (éter mono-amina e éter di-amina). Estas últimas são coletoras dos minerais de quartzo e estabilizadoras da espuma através da flotação (BATISTELLI, 2007; MA; MARQUES; GONTIJO, 2011). Esse material flotado na espuma é direcionado para a barragem. Dessa forma, espera-se encontrar tais substâncias no rejeito oriundo da barragem.

Realmente, Santos et al. (2019), estudando a composição do rejeito em amostras de sedimentos coletadas desde Bento Rodrigues até Barra Longa, encontraram concentrações baixas e variáveis de nutrientes, caracterizando uma baixa fertilidade, além de um elevado pH, altas concentrações de sódio e de eteramina.

Não foram registrados níveis tóxicos de metais pesados quando comparados com solo da área preservada. As Figuras 1A e B mostram o aspecto do rejeito, a Figura 1C mostra o aspecto da água do rio Gualaxo em 2016. As plantas foram selecionadas pelo grau de sobrevivência e diferentes graus de tolerância aos contaminantes (Figura 1E).

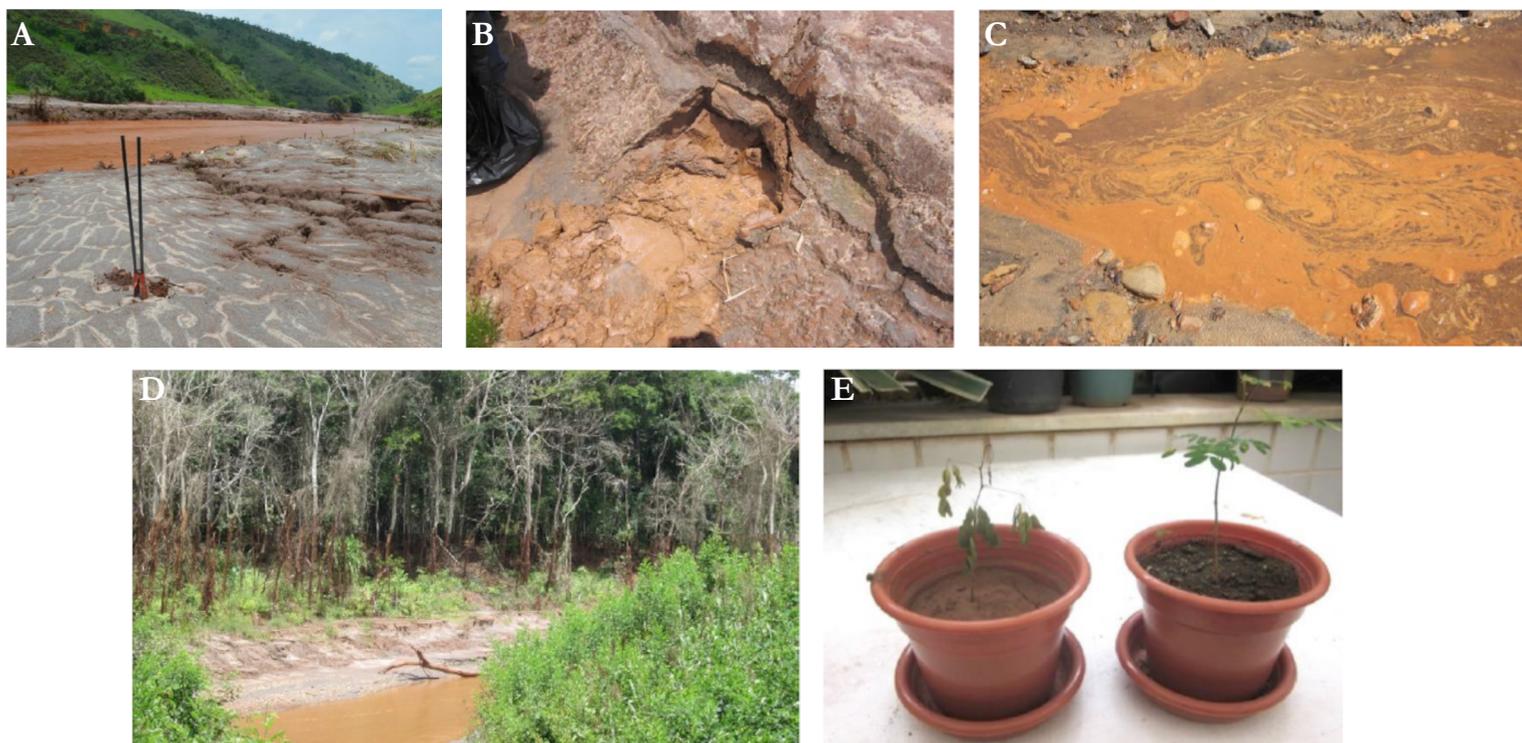


Figura 1. A, B. Aspecto do sedimento ressecado na parte superior e úmido internamente em 2016; 1C: Aspecto espumoso da água do Rio Gualaxo do Norte em 2016; Figura 1D: Grupo de árvores mortas em mata Ciliar atingida pelo rejeito; 1E: Seleção de plantas tolerantes ao rejeito (esquerda sobre sedimento e direita sobre solo de Mata Atlântica).

Fonte: Santos et al. (2019).

Na tabela 1 estão sumarizados os resultados das análises químicas obtidas por estes autores em relação aos fragmentos de áreas preservadas. Santos et al. (2019), mostraram também que o sedimento apresentou toxicidade para a microbiota (Tabela 1) e para a vegetação (Figura 1D) necessitando a implantação de procedimentos de remediação para éter-amina e sódio.

Tabela 1. Valores médios dos principais fatores impactantes presentes no sedimento. OM: organic matter; PS: preserved site; DS: degraded sites

Variáveis	PS	DS
pH	4,583	8,050
OM (%)	8,650	0,963
Na (mg/kg)	4,833	54,167
Eteramine (mg/kg)	0,000	6,113
Microbial biomass – C (nmol/g)	137,833	1,533

Fonte: Santos et al. (2019).

No período do inverno, com a evaporação da água retida no sedimento, ocorreu um acúmulo de sódio na superfície do mesmo, visível a olho nu (Figura 2A). Visando confirmar a presença do sódio na superfície do sedimento, em adição às análises quantitativas laboratoriais (SANTOS et al., 2019), foi feito o teste qualitativo do “Teste de Chama”, onde a presença do sódio pode ser evidenciada pela cor amarelo-alaranjada da chama após combustão. Para tanto, foram pesadas amostras de 13g de solo das áreas preservadas e do rejeito e cada amostra recebeu 5ml de metanol. Como controle foi usado o hidróxido de sódio puro. Após combustão verificamos os resultados apresentados na figura 2B. Somente a placa do hidróxido de sódio (1) e as amostras de rejeito (3 e 4) produziram a chama amarelo-alaranjada durante a combustão, contrastando com a amostra de solo preservado (2), onde a chama produzida teve coloração azul. Isso mostra que o sódio está presente nas amostras 1, 3 e 4, mas ausente na amostra 2. Dessa forma, fica confirmada a presença do sódio e a necessidade da sua remediação.

Os solos naturais apresentam um equilíbrio entre seus elementos físicos, químicos e bióticos cuja dinâmica é mantida através dos ciclos biogeoquímicos. A ruptura desse ciclo pode gerar perdas bióticas e abióticas em diferentes graus, culminando no processo de desertificação. A contaminação do solo, entendida como um excesso de qualquer elemento ou composto que resulte em toxicidade para a biota ou para o ser humano (ABRAHAMS, 2002; ADRIANO, 2001; VANGRONSVELD et al., 2009), pode causar desequilíbrio das relações bióticas e abióticas do solo, culminando na degradação do mesmo. A descontaminação ou remediação é o procedimento exigido nesses casos.

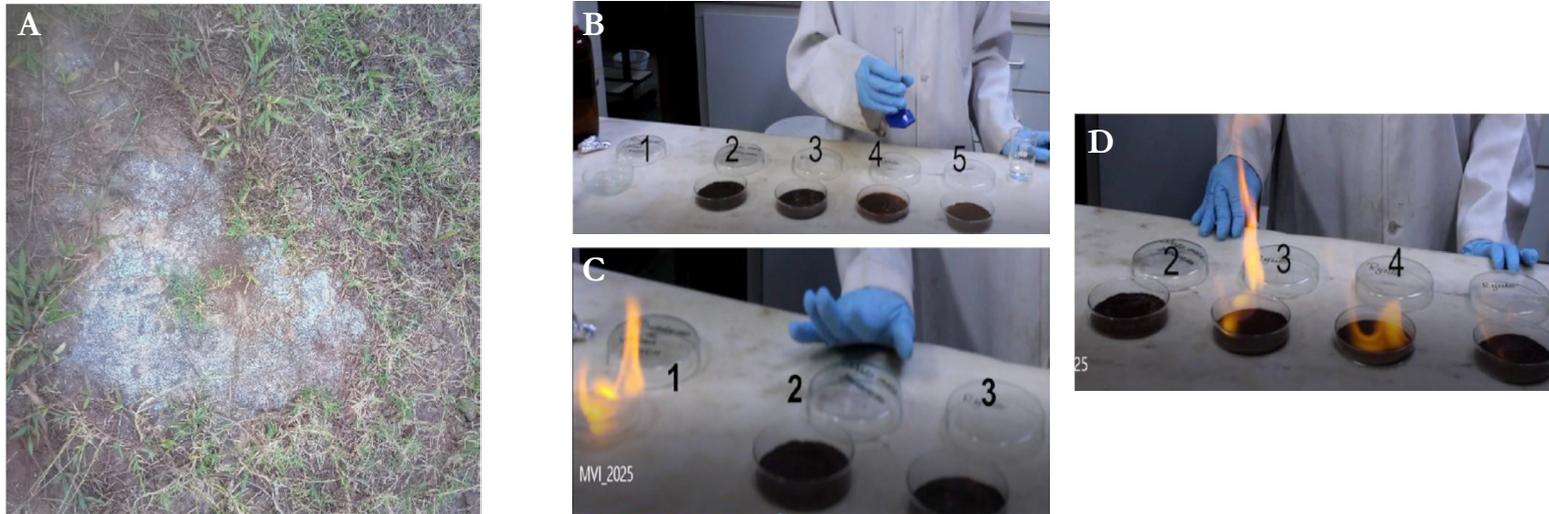


Figura 2. A - Manchas de sódio na superfície do sedimento em Paracatu de Baixo, com inibição do crescimento das plantas. B – teste de chama para confirmação da presença do sódio na superfície do sedimento. 1: Hidróxido de sódio, 2: Solo de área preservada, 3: Amostra 1 de Sedimento, 4: Amostra 2 de sedimento e 5: Amostra 3 de sedimento.

Fonte: Scotti et al. (2020).

Atualmente, a remediação é conduzida baseada em duas linhas de ação estratégicas: 1- Remoção do poluente aos menores níveis possíveis e 2- redução da mobilidade e disponibilidade dos poluentes. Ambas as linhas de ação utilizam diferentes técnicas para atingirem seu objetivo e a literatura nos apresenta uma gama de opções como métodos de remoção, tanto físico-químicos, como extração (FEDJE; SIERRA; GALLEGO, 2017), surfactantes (MAO et al., 2015), ligantes quelantes (BEIYUAN et al., 2018), ou bióticos, com emprego de plantas, denominado especificamente fitorremediação (GOMES et al., 2014; PINTO et al., 2015) ou com emprego de microrganismos aqui denominado biorremediação (BISWAS et al., 2015).

Tendo em vista o diagnóstico de impacto do rejeito da barragem descrito por Santos et al. (2019), que pode ser resumido como: pH muito elevado, infertilidade do sedimento, altas concentrações de sódio e de eteramina, este trabalho visou estudar a remediação dos mesmos sob condições de campo.

2 REMEDIAÇÃO DO IMPACTO

2.1 Espécies nativas da Mata Atlântica tolerantes aos contaminantes.

Plantas de diferentes espécies da Mata Atlântica foram cultivadas em vasos contendo sedimento coletado em 2016, contaminado com eteramina e sódio. Para efeito de comparação as mesmas plantas foram cultivadas em vasos contendo solos preservados da Mata Atlântica. As plantas foram selecionadas pelo grau de sobrevivência e diferentes graus de tolerância aos contaminantes (Figura 1E).

As espécies selecionadas foram submetidas a tratamentos químicos e biológicos para remediação do sódio e da éteramina (dados não mostrados) sob condições de laboratório. Uma vez determinados os tratamentos de remediação mais eficientes e as espécies mais tolerantes, foi estabelecido um experimento piloto sob condições de campo constituído de dois tratamentos: tratamento 1 (T1) inclui remediação química completa, física (raspagem superficial do solo) e fitorremediação. O tratamento 2 (T2) recebeu remediação química parcial e fitorremediação. As plantas do tratamento T1 apresentaram maior índice de sobrevivência e de crescimento do que as plantas do tratamento T2 (Tabela 2).

Tabela 2. Índice médio de sobrevivência e crescimento em altura das espécies aos 6 meses pós -plantio na área experimental sob 2 tratamentos: T1: com manejo do rejeito e T2: sem manejo do rejeito.

	Survival (%)	Mean height (m)
ES T1	84,3	2,0
ES T2	61,4	1,1

Fonte: Scotti et al. (2019).

Na Figura 3 apresentamos o resultado da remediação para o estabelecimento da floresta aos 8 meses e aos 12 meses pós-plantio. Este crescimento surpreendente das plantas em T1 era esperado como consequência dos procedimentos de remediação.



Figura 3. Floresta implanta sobre 1,5m de rejeito, utilizando diferentes tratamentos de remediação.

Fonte: Scotti et al. (2020).

Aos 6 meses pós plantio, foi registrado o declínio das concentrações de sódio e da éter-amina e um aumento significativo da fertilidade do solo especialmente do tratamento T1, quando comparado com as amostras de solo das áreas sem tratamento (dados não mostrados).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este registro de remediação com sucesso na implantação de espécies arbóreas da Mata Atlântica sobre o rejeito de Fundão é pioneiro. Com objetivo de remediar a toxicidade do sódio e éter-amina, selecionamos espécies tolerantes e capazes de crescer sobre o sedimento contaminado com altas concentrações de sódio além de diferentes tratamentos químicos. As espécies selecionadas capazes de crescer sobre o sedimento não apresentaram sintomas de toxicidade.

4 AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pró-reitora de Extensão da Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Extensão do ICB (CENEX). Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Docente (CAPES) e FAPEMIG pelas bolsas de estudo.

5 REFERÊNCIAS

- ABRAHAMSON, P. W. Soils: their implications to human health. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 291, p. 1, 32, 2002.
- ADRIANO, D. C. **Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risks of metals**. New York: Springer-Verlag, 2001.
- ARAÚJO, D. M. et al. Reciclagem de aminas na flotação de minério de ferro. **REM, Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, p. 455–460, 2008.
- BATISTELI, G. M. B. **Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- BEIYUAN, J. et al. Chelant-enhanced washing of CCA-contaminated soil: Coupled with selective dissolution or soil stabilization. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 612, p. 1463-1472, 2018.
- BISWAS, B. et al. Bioremediation of PAHs and VOCs: advances in clay mineral–microbial interaction. **Environment International**, New York, v. 85, p. 168-181, 2015.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997.

- FEDJE, K. K.; SIERRA, C.; GALLEGO, J. R. Enhanced soil washing for the remediation of a brownfield polluted by pyrite ash. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, Boca Raton, v. 26, p. 377-390, 2017.
- GEHRON, M. J.; WHITE, D. C. Sensitive assay of phospholipid glycerol in environmental samples. **Journal of Microbiological Methods**, Amsterdam, v. 1, p. 23–32, 1983.
- GOMES, M. P. et al. Arsenic root sequestration by a tropical woody legume as affected by arbuscular mycorrhizal fungi and organic matter: implications for land reclamation. **Water Air Soil Pollut**, Dordrecht, v. 225, p. 1919, 2014.
- LAX, A. et al. Reclamation of physical and chemical properties of a salinized soil by organic amendment. **Arid Soil Research and Rehabil**, Berlin, v. 8, p. 9- 18, 1994.
- MA, X.; MARQUES, M.; GONTIJO, C. Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of Vale iron ore. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 100, p. 179–183, 2011.
- MAO, R. et al. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: a review. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 285, p. 419–435, 2015.
- PINTO, A. P. et al. Phytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals: Techniques and Strategies. In: ANSARI, A. et al. (ed.). **Phytoremediation**. Cham: Springer, 2015.
- ROBBINS, C. W. Sodic Calcareous soil reclamation as affected by different amendments and crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, p. 916-920, 1986.
- SANTOS, O. S. H. et al. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 48, p. 439–449, 2019.
- SCOTTI, M. R. et al. First report of field remediation of contaminated tailings from the collapsed Fundão Dam in Brazil. In: WORLD CONGRESS ON NEW TECHNOLOGIES, 5., 2019 Lisboa. **Proceedings** [...]. Lisboa: (NewTech'19), 2019. (Paper nº ICEPR 163).

SCOTTI, M. R. et al. Remediation of a Riparian Site in the Brazilian Atlantic Forest Reached by Contaminated Tailings from the Collapsed Fundão Dam with Native Woody Species. **Integrated Environmental Assessment and Management**, Pensacola, p. 1-7, 2020.

SILVA, D. L.; FERREIRA, M. C.; SCOTTI, M. R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, Belo Horizonte, v. 24, n. 1/2, p. 136-158, 2015.

VANGRONSVELD, J. et al. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. **Environmental Science and Pollution Research**, Bordeaux, v. 16, p. 765-794, 2009.

COMO OS MICRORGANISMOS AUXILIAM NA REVEGETAÇÃO DE ÁREAS AFETADAS PELO DESASTRE DE MARIANA?

Paulo Prates Júnior¹
Marliane de Cássia Soares da Silva²
Isabelle Gonçalves de Oliveira Prado³
Helena Santiago Lima⁴
Cynthia Canêdo da Silva⁵
Maria Catarina Megumi Kasuya⁶

1 INTRODUÇÃO

Em fevereiro de 2016, três meses após o rompimento da barragem de Fundão da Samarco S.A., uma equipe do Departamento de Microbiologia (DMB) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) esteve nas proximidades de Paracatu de Baixo (Distrito de Mariana – MG), na tentativa de iniciar avaliações que pudessem indicar o estado de degradação das áreas

¹Biólogo, MSc. em Agroecologia, Dr. em Microbiologia Agrícola, Pós-doutorando em Microbiologia Agrícola, Laboratório de Associações Micorrízicas/BIOAGRO, Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa, 36570-900 – Viçosa, MG, Brasil. E-mail: ppratesjunior@gmail.com

²Bióloga, MSc. e Dr^a. em Microbiologia Agrícola, Pós-doutoranda em Microbiologia Agrícola Laboratório de Associações Micorrízicas/BIOAGRO, Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa, 36570-900 – Viçosa, MG, Brasil.

³Bióloga, Msc. em Microbiologia Agrícola, doutoranda em Microbiologia Agrícola, Laboratório de Associações Micorrízicas/BIOAGRO, Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa, 36570-900 - Viçosa, MG, Brasil.

⁴Agrônoma, MSc. em Microbiologia Agrícola, doutoranda em Microbiologia Agrícola, Laboratório de Microbiologia Ambiental Aplicada – LAMAP, Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa, 36570-900 - Viçosa, MG, Brasil.

⁵Bióloga, MSc. em Microbiologia Agrícola, Dr^a em Genética e Biologia Molecular, Laboratório de Microbiologia Ambiental Aplicada – LAMAP, Professora adjunta do Departamento de Microbiologia na Universidade Federal de Viçosa-MG

⁶Agrônoma, MSc. em Microbiologia Agrícola, Dr^a em Agricultura, Laboratório de Associações Micorrízicas/BIOAGRO, Professora titular do Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa, 36570-900 - Viçosa, MG, Brasil.

impactadas. Estes foram os primeiros passos do DMB-UFV para delinear algumas estratégias, visando auxiliar na revegetação e restauração das áreas direta e indiretamente impactadas pela lama, com rejeitos de minério de ferro.

Apesar do imenso impacto do desastre de Mariana em si, a bacia do rio Doce tem um histórico de intensa degradação ambiental ao longo de mais de 300 anos.

Neste capítulo convidamos os leitores a andarem pelos caminhos da microbiologia, momento em que apresentaremos as suas contribuições para a recuperação ambiental. A microbiologia estuda os microrganismos, os quais habitam nosso planeta há bilhões de anos e que representam oportunidades imensas, construídas em um microuniverso ainda pouco conhecido pela maioria das pessoas. Apostamos nas estratégias de utilização de microrganismos como força propulsora, para acelerar a solução de dificuldades na revegetação e restauração ambiental. Nossa pergunta central é: “Como os microrganismos auxiliam na revegetação de áreas afetadas pelo desastre de Mariana?”.

1.1 O que são microrganismos?

Os microrganismos são seres diminutos, de natureza unicelular ou multicelular, que podem formar colônias (agregado de muitas células), sendo divididos em bactérias, arqueias, protozoários, fungos (leveduras e filamentosos), algas unicelulares e vírus.

As bactérias são procariotos unicelulares, encontradas em formas individuais ou em colônias, apresentam metabolismo extremamente variado e ocupam todos os lugares possíveis do planeta. As arqueias são procariotos semelhantes às bactérias em vários aspectos morfológicos e fisiológicos, mas que apresentam história evolutiva distinta das bactérias. Os protozoários são eucariotos, em sua maioria unicelulares e heterotróficos. Os fungos são eucariotos e heterotróficos que atingiram um maior grau de complexidade organizacional que outros microrganismos, podendo apresentar corpos de frutificação facilmente visíveis no solo, a exemplo dos cogumelos. Enquanto os vírus são bastante simplificados, não têm estrutura celular, fugindo do conceito convencional de organismos vivos.

Os microrganismos somam a maioria dos organismos vivos do nosso planeta. O número de espécies cultivadas e descritas representa uma pequena fração (<0,1 a 1 %) da diversidade microbiana encontrada na natureza (MADIGAN et al.,

2016). Esses seres fascinantes habitaram e trabalharam durante mais de dois bilhões de anos antes que formas mais complexas de vida pudessem se desenvolver e evoluir no planeta Terra. São encontrados em praticamente todos os ambientes, até mesmo em lugares inóspitos como fontes termais e lagos congelados na Antártida (MADIGAN et al., 2016) e os habitats colonizados pelos microrganismos relacionam-se diretamente às diferentes vias metabólicas, associações e funções que desempenham no ambiente.

1.2 Quem são os microrganismos benéficos?

A ideia de classificar os microrganismos como benéficos depende do contexto em que estes são avaliados ou utilizados. Para o foco da recuperação da bacia do rio Doce, microrganismos benéficos são aqueles com potencial para (i) promover o crescimento de plantas, (ii) atuar como biocontroladores de pragas e patógenos, (iii) degradar compostos tóxicos no ambiente, (iv) melhorar as características físico-químicas do solo, (v) melhorar a qualidade da água, (vi) aumentar a disponibilidade de nutrientes, com destaque para os que realizam simbiose mutualista com plantas, tais como os fungos micorrízicos e as bactérias fixadoras de nitrogênio. Estes microrganismos benéficos podem ser considerados como probióticos de plantas.

A seguir destacaremos grupos funcionais importantes para o biomonitoramento e utilização para recuperação das áreas afetadas pelo desastre de Mariana, incluindo decompositores, fixadores de nitrogênio, solubilizadores de fosfato, produtores de hormônios vegetais e fungos micorrízicos arbusculares.

1.2.1 Microrganismos decompositores

As bactérias e os fungos saprofiticos têm grande importância na reciclagem da matéria orgânica. As bactérias destacam-se pela diversidade metabólica, sendo capazes de degradar diversos tipos de substratos, enquanto os fungos destacam-se pela maior biomassa, portanto, pela capacidade de mineralizar maior volume de material orgânico.

Os microrganismos decompositores nutrem-se da matéria orgânica e apresentam diferentes funções nos ecossistemas, devido a sua capacidade de produção de diferentes enzimas, como fosfatases, β -glicosidasas (lê-se “beta-glicosidase”) e

lignases. A reciclagem de nutrientes, particularmente nitrogênio e carbono, permite a mineralização e o uso por outros organismos (HATTENSCHWILER; TIUNOV; SCHEU, 2005), como as plantas. Fungos e suas enzimas lignocelulolíticas têm um papel chave nos ecossistemas florestais, por degradar polímeros da parede celular das plantas incluindo lignina de difícil decomposição (ROSALES-CASTILLO et al., 2018). Os fungos decompositores mais comuns em florestas são os Ascomycota e Basidiomycota (ROSALES-CASTILLO et al., 2018; VIEIRA et al., 2018), que podem formar estruturas visíveis como orelha de pau, bolores e cogumelos.

1.2.2 Bactérias fixadoras de nitrogênio

O nitrogênio (N) é um mineral essencial para o desenvolvimento das plantas, porém pode ocorrer em baixas concentrações no solo, na forma hidrossolúvel, que é como as plantas conseguem absorvê-lo. A maior concentração de N ocorre na forma de N_2 gasoso, na atmosfera, indisponível para as plantas. Fixação de N é o processo pelo qual o N gasoso é convertido em N orgânico⁷, forma que pode ser absorvida por plantas. Apenas os procariotos, bactérias e arqueias, podem realizar a fixação do N. As bactérias fixadoras de nitrogênio (BFN) também são conhecidas como bactérias diazotróficas, e podem ser classificadas em três grupos: de vida livre, associativas ou simbióticas mutualistas.

Dentre as BFN de vida livre estão *Azotobacter*, *Bacillus*, *Clostridium* e *Klebsiella* (POTTS, 2000). As bactérias associativas são encontradas na rizosfera e também na parte aérea de plantas (KENNEDY; CHOUDHURY; KECSKÉS, 2004). As bactérias mutualistas simbióticas têm seu desenvolvimento em íntima associação com a estrutura física da planta. Essas bactérias fixam o N, enquanto a planta fornece açúcares da fotossíntese (WAGNER, 2011). As simbioses mutualistas mais conhecidas, estudadas e com grande valor agregado são as que envolvem as BFN e plantas leguminosas (Fabaceae). As comunidades de BFN são extremamente importantes para a saúde do solo e mudanças na sua estrutura, composição e diversidade funcionam como bioindicadores.

⁷Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Fixação_de_nitrogênio.

1.2.3 Microrganismos solubilizadores de fosfato

Os microrganismos solubilizadores de fosfato, incluindo fungos e bactérias, são capazes de transformar o fósforo (P) de fontes indisponíveis em fontes solúveis, contribuindo para melhorar a nutrição fosfatada das plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Estes microrganismos promovem o crescimento de plantas devido a maior disponibilidade de fósforo e podem ser isolados em meio de cultura líquido contendo como fontes inorgânicas (ex. AlPO_4 e $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ou orgânicas de fosfato (ex. fitato e lecitina). Estes microrganismos têm grande importância em processos de restauração ambiental porque, em geral, os solos brasileiros apresentam baixo teor de P solúvel e prontamente disponível para as plantas.

1.2.4 Microrganismos promotores de crescimento de plantas

Existem microrganismos, incluindo bactérias e fungos capazes de produzir hormônios vegetais (fitormônios), mineralizar nutrientes, aumentar a absorção de água e nutrientes pelas raízes, estimulando o crescimento de plantas (MOREIRA et al., 2020, no prelo). Destacam-se as rizobactérias promotoras do crescimento de plantas (PGPR = *plant growth-promoting rhizobacteria*). Estas bactérias estimulam direta ou indiretamente o crescimento de plantas devido a sua capacidade de solubilizar fosfato, produzir ácido indol-acético (AIA), produzir sideróforos (um composto orgânico que atua na captação de ferro pelos organismos como bactérias, favorecendo a sua capacidade de competição⁸), fixar biologicamente o N atmosférico e/ou atuar no controle de pragas e patógenos. Existem grupos funcionais de fungos que toleram ambientes estressantes, tais como escassez hídrica e de nutrientes, salinidade, presença de metais pesados e que promovem o crescimento de plantas.

1.2.5 Fungos Micorrízicos Arbusculares

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA – filo Glomeromycota) são fungos que formam associações micorrízicas com diversas espécies de plantas (PARNISKE, 2008). São microrganismos que dependem das plantas para sua sobrevivência, que colonizam 85 % das plantas terrestres (BRUNDRETT; TEDERSOO, 2018).

⁸Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Sideróforo>.

Os FMA recebem fontes de carbono de seus hospedeiros e, em troca, fornecem inúmeros benefícios para as plantas, principalmente por melhorar a nutrição e o crescimento, proteção contra patógenos, maior resistência a estresses e a metais pesados (BONFANTE; ANCA, 2009; VERGARA et al., 2019). Esses fungos possuem hifas 10 vezes mais finas que as raízes, sendo o custo para o crescimento das hifas até 100 vezes menor que raízes da planta. Isso explica porque a simbiose mutualista beneficia tanto a planta quanto o fungo (HELGASON; FITTER, 2005), uma vez que as hifas desses fungos têm o papel de auxiliar as raízes, sendo menos custoso para as plantas.

Os FMA atuam no processo de fitorremediação, pois aumentam a área de contato com o solo e de absorção dos metais pesados pela planta (GÖHRE; PASZKOWSKI, 2006), produzem glomalina, uma substância que auxilia na agregação do solo, portanto têm amplo potencial de aplicação na recuperação de áreas degradadas.

2 MICRORGANISMOS COMO BIOINDICADORES

Devido a importantes e diversas funções no ecossistema, a recuperação da comunidade microbiana do solo é um passo crítico para alcançar a restauração e uso sustentável do solo. A vegetação e os atributos físico-químicos do solo tem sido os parâmetros mais utilizados para avaliar o processo de recuperação de áreas impactadas pela atividade de mineração (SANTOS et al., 2016). No entanto, alterações na comunidade microbiana precedem mudanças das propriedades físico-químicas do solo, desta forma, revelando situações de estresse ou recuperação do ambiente com maior eficiência e antecedência (JORDÃO, 2018; UPADHYAY et al., 2017). Por isso, a microbiota é um excelente bioindicador do estado de degradação ou recuperação ambiental. Parâmetros da microbiota utilizados como bioindicadores são respiração basal do solo, biomassa microbiana, e enzimas do solo, entre outros.

A respiração basal do solo é um processo fundamental no ecossistema que consiste no consumo de oxigênio (O_2) e produção de dióxido de carbono (CO_2) através da respiração realizada pelos organismos presentes no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Os microrganismos utilizam a respiração para transformar compostos orgânicos em componentes estruturais ou para obter energia durante seu crescimento. A respiração basal do solo é estimada a partir do dióxido de carbono liberado (CO_2) em amostras de solo de interesse. Áreas que sofreram impacto de mineração apresentam uma elevada

taxa de respiração basal do solo, porque o estresse implica em maior gasto de energia para manter funções vitais. Portanto, há uma relação entre o estresse ambiental e a demanda energética das células, que permite comparar áreas semelhantes. Os valores da respiração basal em conjunto com a biomassa microbiana do solo são utilizados para obter o quociente metabólico (qCO_2), que é um eficiente indicador de estresse nos ecossistemas.

A biomassa microbiana do solo indica funções-chave no solo, como a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica, ou transformações envolvendo nutrientes minerais. A biomassa microbiana do solo é a matéria orgânica do solo prontamente utilizável, pois tem uma elevada taxa de conversão entre os compartimentos biológicos, solo e atmosfera. Assim, a biomassa microbiana é uma medida mais sensível sobre o aumento ou decréscimo na quantidade total da matéria orgânica do solo, por isso pode ser aplicada como um indicador do funcionamento dos ecossistemas, permitindo a avaliação de possíveis distúrbios causados por eventos naturais ou ações antrópicas (SHEORAN et al., 2010).

Outro parâmetro microbiológico que pode ser utilizado como indicador de atividades do solo e de perturbações no ambiente são as enzimas do solo. Estas são produtos do metabolismo de organismos e desempenham um papel fundamental nos ecossistemas, tais como mineralização, decomposição da matéria orgânica, fixação biológica de nitrogênio e ciclagem de nutrientes. As enzimas do solo têm alta sensibilidade à multifuncionalidade dos ecossistemas, sendo utilizadas como indicadores das atividades e perturbações no solo, bem como no monitoramento da recuperação de ambientes naturais (LI et al., 2015). Existem três enzimas amplamente aplicadas no monitoramento e avaliação da recuperação de áreas impactadas: β -glicosidase, fosfatases ácidas e fosfatases alcalinas. Essas enzimas desempenham papel de grande importância nos ciclos do carbono e fósforo. A β -glicosidase está relacionada à degradação de celulose, para que os microrganismos possam utilizá-la como fonte de energia; as fosfatases estão relacionadas à mineralização de compostos fosfatados (ZHANG et al., 2015).

Nosso grupo de pesquisa avaliou alguns atributos microbiológicos do solo (fosfatase ácida e alcalina, β -glicosidase, carbono da biomassa microbiana e respiração basal do solo) no distrito de Paracatu de Baixo (CAVALCANTE, 2017). As coletas foram realizadas nas proximidades do distrito de Paracatu de Baixo, em 2017 e 2018. Amostramos duas áreas afetadas pela deposição de rejeito em diferentes estágios de revegetação (i) área afetada pela deposição de rejeito sem programa de revegetação em andamento, mas com presença de revegetação natural e (ii) área afetada, submetida a programa de revegetação,

(iii) fragmento florestal não afetado. O fragmento florestal (UND) apresentou maiores valores para todos os parâmetros mensurados em todas as amostras. A fosfatase ácida, β -glicosidase e carbono da biomassa microbiana foram os bioindicadores que mais distinguiram as três áreas avaliadas.

Houve aumento nos valores de todos os atributos microbiológicos do solo nas áreas afetadas, porém elas ainda estão distantes da área utilizada como referência. Interpretamos que as áreas afetadas pelo rejeito ainda sofrem os impactos da deposição de rejeito de minério, manifestada pela diminuição das atividades microbiológicas do solo.

Tecnologias de sequenciamento massivo, em que se estima o material genético (DNA) presente no solo, permitem acessar de forma eficiente e com baixo custo, a composição de comunidades microbianas residentes no solo. Tais tecnologias possibilitam, ainda, a inferência de funções ecológicas que foram afetadas ou estão sendo recuperadas (KUMAR et al., 2015). Pesquisas realizadas por nossa equipe mostram que a comunidade de bactérias, fungos totais, fungos micorrízicos arbusculares e enzimas do solo foram alteradas pelo processo de revegetação e podem ser usados como bioindicadores do processo de reabilitação (CAVALCANTE, 2017; JORDÃO, 2018; PRADO et al., 2019).

Os indicadores microbiológicos do solo mostram-se eficientes e rápidos para detecção de alterações na qualidade do solo. Isso ressalta a necessidade de utilizá-los como ferramentas para avaliar e monitorar a recuperação de áreas impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

3 MICRORGANISMOS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

Nas áreas com depósito de lama de minério de ferro, decorrente do rompimento da barragem de Fundão, as condições de desenvolvimento das plantas não são favoráveis, devido à estrutura física do tecnossolo (solo formado por atividade humana), além da baixa disponibilidade de nutrientes ou excesso de alguns compostos, diminuição da biomassa microbiana e consequente mortalidade de plantas (SANTOS et al., 2019). A revegetação emergencial com gramíneas e leguminosas, realizada em algumas áreas impactadas, favoreceu a microbiota local (CAVALCANTE, 2017; JORDÃO, 2018; LIMA, 2019; PRADO et al., 2019).

Fungos apresentam alta redundância funcional (PEAY; KENNEDY; TALBOT, 2016) e os FMA são utilizados em programas de reabilitação de áreas contaminadas (KIMURA; SCOTTI, 2016). Isto porque contribuem para o sucesso da revegetação ao aumentar a absorção de nutrientes, melhorar a capacidade competitiva e a diversidade de plantas (JASPER, 1994). Portanto, tem grande potencial como instrumento biotecnológico da restauração de áreas degradadas.

Os FMA são responsáveis por melhoria na agregação do solo, bem como um aumento na produção de ácido húmico no solo e glomalina (JORDÃO, 2018; KIMURA; SCOTTI, 2016). Trabalhos realizados na área de Mariana já mostraram que alterações nos parâmetros biológicos refletem diretamente na estruturação do solo, como a produção de glomalina pelos FMA (JORDÃO, 2018). Algumas espécies de FMA são de interesse devido à alta tolerância em ambientes perturbados, como espécies da família Glomeraceae (CHAGNON et al., 2013), sendo o gênero *Glomus* relacionado a ambiente com altas concentrações de Zn, Cu, Cd e Pb (LEAL et al., 2016). Estudos mostraram também, maior absorção de fósforo pela planta quando inoculada e colonizada por *Glomus intraradices* e o acúmulo de Cd pelo FMA (JANOUSKOVÁ; PAVLÍKOVÁ; VOSÁTKA, 2006), possibilitando a sua utilização para minimizar o efeito de metais pesados. A inoculação de fungos micorrízicos potencializam o crescimento da plântula, no aspecto nutricional de fosfato e nitrogênio e a resistência às condições ambientais, particularmente no campo, onde o choque de transplante é a primeira causa de mortalidade de mudas (LAHCEN et al., 2012).

Além dos fungos, no solo encontramos numerosos gêneros de bactérias, muitas das quais desempenham papéis importantes no ciclo de nutrientes e protegem as culturas contra doenças. A seleção e adaptação dessa comunidade microbiana a ambientes em situações de estresse auxiliam o processo de regeneração, como demonstrado em estudos sobre a composição da comunidade procariótica de áreas de mineração e áreas adjacentes (CAVALCANTE, 2017; FERNANDES et al., 2018; PAZETTO, 2018). As rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR) beneficiam o crescimento de plantas (MOREIRA et al., 2020, no prelo), por meio da produção de metabólitos secundários, disponibilização de nutrientes (como fósforo e nitrogênio), hormônios vegetais, competição patógenos de plantas (fitopatógenos) (HAYAT et al., 2010). Assim, configuram-se como uma excelente estratégia para a reabilitação de áreas degradadas.

A revegetação com uso de gramíneas e leguminosas, em áreas de mineração de ferro situadas no quadrilátero ferrífero, demonstrou que após 10 anos de revegetação, a diversidade de procariotos aumentou, incluindo grupos funcionais importantes,

a exemplo de fixadores de N e actinobactérias (CARDOSO, 2019). As actinobactérias têm papel importante na supressão de doenças e na tolerância ao estresse abiótico (MOREIRA et al., 2020, no prelo). As BFN são importantes bioindicadoras em áreas em reabilitação, devido à capacidade em absorver, oxidar, decompor e reduzir os poluentes (FERNANDES et al., 2018), abrindo possibilidades de uso na restauração de áreas impactadas pela barragem de Fundão.

A interação dos microrganismos com plantas é fundamental na reabilitação de áreas degradadas, sendo a revegetação alcançada com maior sucesso a partir do uso de microrganismos benéficos do solo, os quais funcionam como probióticos de plantas.

4 MICRORGANISMOS NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS PARA A REVEGETAÇÃO DE ÁREAS IMPACTADAS PELO DESASTRE DE MARIANA

A manipulação das comunidades microbianas associadas as plantas, em condições de viveiro ou mesmo em campo, permite melhorar a produção de mudas e melhorar as respostas destas mudas a condições de estresse biótico, (pragas e patógenos) e abióticos (escassez de água ou presença de contaminantes). A produção de inoculantes microbianos pode significar maior sucesso na produção de mudas de espécies florestais nativas, que tenham alta dependência simbiótica, a exemplo de *Dimorphandra wilsonii* Rizzini (FONSECA et al., 2012). Em uma visão mais holística é preciso reconhecer que plantas e microrganismos associados formam um metaorganismo (= holobionte), com interligações evolutivas e funcionais que permite explorar o ambiente, em conjunto.

A inoculação com microrganismos benéficos tende a acelerar o crescimento das plantas, diminuir o tempo de propagação e permitir maior aproveitamento da adubação (PRATES JÚNIOR, 2018). A utilização de consórcios microbianos para inoculação de plantas é uma tecnologia limpa, de amplo interesse comercial aos setores agrícola, florestal e minerário, uma vez que pode contribuir para a otimização do uso de insumos e a redução de custos de produção. Além disso, favorece a aclimatação das mudas em campo, diminuindo a mortalidade pós-plantio e, conseqüentemente a necessidade de replantio, minimizando gastos adicionais.

Está em fase de produção massal, em parceria com a Fundação Renova, substrato com FMA e microrganismos autóctones de fragmentos de mata, adjacentes a Paracatu de Baixo, em Mariana, visando a produção de mais de 100 mil mudas inoculadas. Estas mudas serão produzidas em parceria com viveiristas mobilizados pela Fundação Renova. O inóculo produzido em escala massal, sob orientação do nosso grupo de pesquisa, apresenta microrganismos benéficos tais como fungos micorrízicos arbusculares, bactérias fixadoras de nitrogênio, fungos e bactérias promotoras do crescimento de plantas (PGPF e PGPR, respectivamente).

O inóculo obtido no contexto do presente projeto viabilizou o crescimento de espécies florestais nativas, a exemplo de vinhático – *Plathyenia reticulata* Bentham (PRATES JÚNIOR, 2018), fedegoso – *Senna macranthera* (Collad.) H. S. Irwin & Barneby), (PEDROSA et al., 2019) e aldrago – *Pterocarpus violaceus* (SILVA et al., 2019). É reconhecido o papel de microrganismos benéficos na aclimação de mudas (MOREIRA et al., 2015) porque melhora o estado nutricional, acelera o crescimento e melhora o vigor das mesmas, em sua fase de formação.

Muitas espécies florestais nativas produzidas em viveiros apresentam dificuldades de aclimação após o transplântio para campo, principalmente em áreas com tecnossolo, formados com o desastre de Mariana, o que pode aumentar a mortalidade e, conseqüentemente, a necessidade de replântio, implicando em gastos adicionais. Em estudos preliminares, mudas de fedegoso (*S. macranthera*) e cássia rosa (*Cassia grandis* L. f.) cultivadas com adição de inóculo microbiano, mesmo após o transplântio em 100 % do rejeito, permanecem vivas e crescendo (DIOGO et al., 2018). Outro fator interessante é o da dispersão destes propágulos de FMA entre as diferentes áreas (PRADO et al., 2019), o que favorece a colonização de microrganismos benéficos a partir de áreas vizinhas. Assim, mudas inoculadas podem contribuir para minimizar o passivo ambiental da Bacia do rio Doce, auxiliando na recuperação de funções ecológicas fundamentais para a saúde dos ecossistemas.

O processo de revegetação é oneroso devido aos custos com instalação das mudas, necessidade de adubação pela baixa fertilidade de tecnossolos e replântio pela morte de mudas transplantadas, bem como outras limitações relacionadas a aspectos físico-químicos e biológicos do solo. Os rejeitos e os tecnossolos comprometem o crescimento de plantas devido a alterações nas características físicas que dificultam a penetração de raízes, o baixo nível de nutrientes e matéria orgânica, o pH extremo (> 7,5) e presença de metais pesados que podem estar em concentrações tóxicas para as plantas. Deste modo, em processos

convencionais de reabilitação de áreas degradadas é comum a adição de grandes quantidades de compostos orgânicos e altos gastos com adubação mineral fosfatada, acarretando em custos elevados, e nem sempre obtendo sucesso.

Após o plantio em campo, a inoculação pode aumentar o índice de efetividade da revegetação das áreas com depósitos de rejeitos, ao favorecer o enriquecimento com espécies florestais nativas associadas aos microrganismos benéficos. As mudas inoculadas podem favorecer a restauração ambiental e aumentar a resiliência ecossistêmica, uma vez que microrganismos têm papel-chave na ciclagem e aumento da disponibilidade de nutrientes, tais como nitrogênio e fósforo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os microrganismos ocupam diferentes habitats e apresentam as mais diversas funções no ambiente, o que os torna essenciais em processos de revegetação e restauração. Isto porque possibilitam a sobrevivência de plantas e outros organismos no campo, sobretudo em áreas afetadas por desastres ambientais, a exemplo de Mariana. Portanto, os microrganismos dinamizam a adoção de práticas de manejo e intervenções mais assertivas em áreas impactadas.

6 REFERÊNCIAS

- BONFANTE, P.; ANCA, L. A. Plants, mycorrhizal fungi, and bacteria: a network of interactions. **Annual Review of Microbiology**, Palo Alto, v. 63, p. 363–383, 2009.
- BRUNDRETT, M. C.; TEDERSOO, L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. **New Phytologist**, Cambridge, v. 220, p. 1108–1111, 2018.
- CARDOSO, E. B. **Diversidade da microbiota e aplicação de fungos micorrízicos arbusculares para a revegetação em sítio de pós-mineração de ferro**. 2019. 118 p. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

- CHAGNON, P. L. et al. A trait-based framework to understand life history of mycorrhizal fungi. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 18, n. 9, p. 484–491, 2013.
- CAVALCANTE, J. P. M. **Diversidade bacteriana e indicadores biológicos em áreas impactadas com rejeito de mineração, em Mariana-MG**. 2017. 79 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.
- DIOGO, N. V. et al. Can arbuscular mycorrhizal fungi increase cassia grandis to adapt in iron ore mining waste? In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MICROBIOLOGIA E BIOTECNOLOGIA (SIMB), 4., 2018, Viçosa-MG. **Anais [...]**. Viçosa, MG: UFV, 2018.
- FERNANDES, C. C. et al. Bacterial communities in mining soils and surrounding areas under regeneration process in a former ore mine. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 49, n. 3, p. 489–502, 2018.
- FONSECA, M. B. et al. Nodulation in *Dimorphandra wilsonii* Rizz. (Caesalpinioideae), a threatened species native to the Brazilian Cerrado. **PLoS One**, San Francisco, v. 7, n. 11, 2012.
- GÖHRE, V.; PASZKOWSKI, U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. **Planta**, Berlin, v. 223, p. 1115, 2006.
- HATTENSCHWILER, S.; TIUNOV, A.V.; SCHEU, S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 36, p. 191–218, 2005.
- HAYAT, R. et al. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A Review. **Annals of Microbiology**, London, v. 60, p. 579–598, 2010.
- HELGASON, T.; FITTER, A. H. The ecology and evolution of the arbuscular mycorrhizal fungi. **The Mycologist**, Cambridge, v. 19, p. 96-101, 2005.

- JANOUSKOVÁ, M.; PAVLÍKOVÁ, D.; VOSÁTKA, M. Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 65, p. 1959–1965, 2006.
- JASPER, D. A. Management of mycorrhizas in revegetation. In: ROBSON, A. D.; ABBOTT, L. K.; MALAJCZUK, N. (ed.). **Management of Mycorrhizas in Agriculture, Horticulture and Forestry**. Boston: Kluwer Academic, 1994. p. 211–219.
- JORDÃO, T. C. **Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e qualidade do solo em áreas atingidas pelos rejeitos da barragem de Fundão – Mariana, MG**. 2018. 50 p. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Universidade Federal de Viçosa, viçosa, MG, 2018.
- KENNEDY, I. R.; CHOUDHURY, A. T. M. A.; KECSKÉS, M. L. Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems: can their potential for plant growth promotion be better exploited? **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 36, p. 1229-1244, 2004.
- KIMURA, A. C.; SCOTTI, M. R. Soil aggregation and arbuscular mycorrhizal fungi as indicators of slope rehabilitation in the São Francisco River Basin (Brazil). **Soil and Water Research**, Praha, v. 11, n. 2, p. 114-123, Apr. 2016.
- KUMAR, S. et al. Metagenomics: retrospect and prospects in high throughput age. **Biotechnology Research International**, London, v. 12, n. 1, p.7-35, 2015.
- LAHCEN, O. et al. Inoculation of *Ceratonia siliqua* L. with native arbuscular mycorrhizal fungi mixture improves seedling establishment under greenhouse conditions. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 11, n. 98, p. 16422–16426, 2012.
- LEAL, P. et al. Enrichment of arbuscular mycorrhizal fungi in a contaminated soil after rehabilitation. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 47, n. 4, p. 853–862, 2016.
- LI, J. et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 87, p. 56–62, 2015.

- LIMA, H. S. **Monitoramento e reconhecimento de padrões na alteração da comunidade bacteriana e indicadores biológicos em áreas impactadas com rejeito de mineração em Mariana-MG**. 2009. 93 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.
- LINDERMAN, R. G. Mycorrhizal interactions with the rhizosphere microflora the mycorrhizosphere effect. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 78, n. 3, p. 366-371, 1988.
- MADIGAN, M. et al. **Microbiologia de Brock**. Porto Alegre: Artmed, 2016. 1032 p.
- MOREIRA, B. C. et al. Roots and beneficial interactions with soil microbes. In: OLIVEIRA, T. S.; BELL, R. W. (ed.). **Subsoil constraints for crop production**. New York: Springer, 2020. No prelo.
- MOREIRA, B. C. et al. The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Piriformospora indica* improves the growth and nutrient uptake in micropropagation-derived pineapple plantlets. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 197, p. 183-192, 2015.
- MOREIRA, F. M. S; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.
- PARNISKE, M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. **Nature Reviews Microbiology**, London, v. 6, p. 763–775, 2008.
- PAZETTO, B. C. **Isolamento, identificação e seleção de bactérias diazotróficas e actinobactérias em áreas afetadas pelo desastre em Mariana-MG**. 2018. 98p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.
- PEAY, K. G.; KENNEDY, P. G.; TALBOT, J. M. Dimensions of biodiversity in the Earth mycobiome. **Nature Publishing Group**, Berlin, v. 14, n. 7, p. 434–447, 2016.
- PEDROSA, B. G. et al. Production of *Senna macranthera* seedlings in substrates containing arbuscular mycorrhizal fungus AMF for revegetation of areas affected by iron ore mining waste (IOMW). In: FUNDÃO DAM RUPTURE ENVIRONMENTAL SCIENCE MEETING, Brasília, DF, 2019. **Anais [...]**.Brasília, DF: CAPES, 2019.

- POTTS, M. Nostoc. In: WHITTON, B. A.; POTTS, M. (ed.). **The ecology of Cyanobacteria: their diversity in time and space.** Netherlands: Kluwer Academic, 2000. p. 465–504.
- PRADO, I. G. O. et al. Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 141, p. 84-95, 2019.
- PRATES JUNIOR, P. **Plant soil feedback e inoculação de fungos micorrízicos em mudas de vinhático e braúna.** 2018. 118 p. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.
- ROSALES-CASTILLO, J. A. et al. Fungal community and ligninolytic enzyme activities in *Quercus deserticola* Trel. litter from forest fragments with increasing levels of disturbance. **Forests**, Gainesville, v. 9, 2018.
- SANTOS, J. V. et al. Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. **Environmental Science and Pollution Research**, Bordeaux, v. 23, n. 7, p. 6735-6748, 2016.
- SANTOS, O. S. H. et al. Understanding the environmental impact of a mine dam rupture in Brazil: prospects for remediation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 48, n. 2, p. 439-449, 2019.
- SILVA, R. S. et al. Inóculo de fungos micorrízicos arbusculares aumenta o crescimento de mudas de *Pterocarpus violaceus*, em diferentes substratos. SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RESTAURAÇÃO FLORESTAL, 4., 2019, Belo Horizonte-MG. **Anais [...]**. Belo Horizonte: SIF-UFV, 2019.
- UPADHYAY, N. et al. Tolerance and reduction of chromium (VI) by *Bacillus* sp. MNU16 isolated from contaminated coal mining soil. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, p. 778, 2017.
- VERGARA, C. et al. Plant-mycorrhizal fungi interaction and response to inoculation with different growth-promoting fungi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, p. e25140, 2019.
- VIEIRA, C. K. et al. Microbiome of a revegetated iron-mining site and pristine ecosystems from the Brazilian Cerrado. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 131, p. 55-65, Oct. 2018.
-

WAGNER, S. C. Biological Nitrogen Fixation. **Nature Education Knowledge**, Cambridge, v. 3, n. 10, p. 15, 2011.

ZHANG, L. et. al Changes in soil carbon and enzyme activity as a result of different long-term fertilization regimes in a greenhouse field. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 10, p.1–13, 2015.

COMO A TECNOLOGIA NUCLEAR PODE AUXILIAR NA SEGURANÇA DE BARRAGENS

Rafael Colombo Pimenta¹

Milena Jorge Rjeille²

Rubens Martins Moreira³

1 INTRODUÇÃO

Ainda nos dias de hoje, uma parcela da população associa a radioatividade com problemas de saúde e contaminação. Poucos sabem que as radiações estão presentes no nosso dia-a-dia, e que através das tecnologias nucleares, as radiações podem ser aplicadas em diversos estudos em benefício de um meio ambiente saudável, podendo também ser utilizadas em investigações visando a segurança de barragens.

As barragens são estruturas essenciais para a sociedade moderna. Através das barragens é realizado o armazenamento de água, a geração de energia hidrelétrica, a regularização de vazões de rios e a contenção de resíduos industriais, como os rejeitos provenientes das atividades de mineração.

Para garantir a segurança e a estabilidade das barragens, estas devem ser periodicamente inspecionadas em busca de quaisquer anomalias que possam representar riscos. Para isso são instalados nas barragens instrumentos capazes de verificar alterações nas condições esperadas dos barramentos.

¹Engenheiro geólogo, mestre em Técnicas Nucleares Aplicadas ao Meio Ambiente, Professor PUC Minas, Av. Brasil, 2023 - Funcionários, Belo Horizonte - MG, 30140-002, colombopimenta@gmail.com

²Doutor em engenharia química, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Campus da Universidade Federal de Avenida Presidente Antônio Carlos, Rua Mário Werneck, 6627 - S/N - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, rubens@cdtn.br

³Doutor em engenharia química, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Campus da Universidade Federal de Avenida Presidente Antônio Carlos, Rua Mário Werneck, 6627 - S/N - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901, rubens@cdtn.br

Após os desastres ocorridos pelo rompimento das barragens de rejeito de Fundão, em Mariana, e de Córrego do Feijão, em Brumadinho, verificou-se que as técnicas tradicionalmente utilizadas, principalmente no caso das barragens de rejeitos, não são capazes de garantir um monitoramento totalmente eficiente para a detecção de falhas e prevenção das rupturas. A sociedade vem desde então buscando por novas tecnologias que, juntamente com as técnicas tradicionalmente utilizadas, sejam capazes de auxiliar o monitoramento destas estruturas de engenharia, e que através das respostas obtidas por essas novas tecnologias, possam gerar maior conhecimento sobre as condições da saúde estrutural das barragens, contribuindo para garantir a segurança através da diminuição das incertezas nas análises de risco e para o gerenciamento destas construções.

Por intermédio da tecnologia nuclear, vem-se desenvolvendo em diversas partes do mundo estudos utilizando as técnicas dos traçadores para a detecção e monitoramento das condições do fluxo de água subterrânea nas barragens (PIMENTA et al., 2019a).

1.1 O que são os traçadores e como ajudam a detectar problemas nas barragens?

Os traçadores são substâncias químicas que quando presentes nas águas, podem gerar informações sobre o movimento destas nos diferentes ambientes. São considerados como marcadores ou rastreadores da água. Os traçadores podem estar presentes naturalmente nas águas, tais como os isótopos e as substâncias minerais dissolvidas. Podem também estar presentes devido a alterações no meio ambiente, como no caso dos poluentes, por exemplo (LEIBUNDGUT; MALOSZEWSKI; KULLS, 2009). Os traçadores que já estão presentes no ambiente são chamados de Traçadores Ambientais.

Também é possível que os traçadores sejam introduzidos na água intencionalmente, com o objetivo de se conhecer alguns parâmetros de escoamento da água, como a velocidade da água subterrânea (LEIBUNDGUT; MALOSZEWSKI; KULLS, 2009). Supondo, por exemplo, que alguma substância seja lançada no lago da barragem e que esta possa ser identificada nas nascentes próximas ao pé do barramento. Este teste pode mostrar propriedades do caminho realizado pela substância desde o seu lançamento, passando pela sua infiltração na barragem, chegando até a sua detecção nas águas da saída da barragem. Os traçadores introduzidos no ambiente com o intuito de se realizar o estudo são denominados Traçadores Intencionais. A Figura 1 apresenta o princípio de sistemas do método dos traçadores ambientais e intencionais.

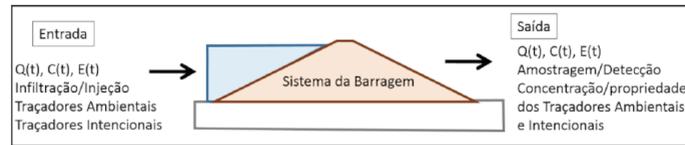


Figura 1. Abordagem de sistemas utilizada no uso de traçadores em barragens.

Fonte: Modificado de Leibundgut, Maloszewski e Kulls (2009).

Todas as barragens são projetadas para permitirem um pouco de percolação ou vazamentos de água, não existindo uma barragem totalmente estanque. Essas percolações podem ocorrer através do corpo da barragem, das rochas da fundação, dos terrenos geológicos das suas ombreiras ou dos contatos entre essas estruturas (BEDMAR; ARÁGUAS, 2002).

As percolações de água quando ocorrem em velocidades acima dos valores previstos no projeto de construção da barragem, podem deflagrar o processo de erosão interna no maciço, ou seja, vão se formando dutos subterrâneos no corpo da barragem, desestabilizando sua estrutura. Se este processo não for detectado e remediado a tempo, pode causar o colapso de toda a estrutura da barragem (WRIGHT, 1990). Os traçadores, juntamente com outras técnicas, podem caracterizar este processo, possibilitando a seleção de melhores ações de remediação e estabilização (BEDMAR; ARÁGUAS, 2002).

Entre as diversas técnicas que podem ser utilizadas na caracterização e no monitoramento do processo de fluxo de água subterrânea na área das barragens, além dos traçadores, está o monitoramento hidrométrico, que realiza medidas de níveis e vazões. Há também os modelos hidrogeológicos computacionais, que calibrados através de dados reais obtidos em campo, podem simular o comportamento da água ao percolar através do maciço do barramento, dos solos e das rochas do entorno. Os métodos geofísicos utilizam das propriedades físicas do meio, seja do solo, das rochas ou de outras estruturas, para gerar informações sobre a presença e sobre o fluxo de água na área das barragens, com destaque para os métodos geoeletricos. Todas essas técnicas devem ser utilizadas conjuntamente no monitoramento das barragens. Os traçadores auxiliam nesse monitoramento, gerando dados complementares aos procedimentos convencionalmente utilizados. As geotecnologias podem

ser empregadas também para complementar os estudos com traçadores em barragens, como a modelagem hidroquímica, a modelagem estatística, aerofotogrametria entre outros (PIMENTA et al, 2019b; PIMENTA; MOREIRA, 2018a, 2018b; SALIM et al. 2019).

2 OS TRAÇADORES E A TECNOLOGIA NUCLEAR

A tecnologia nuclear lida com as propriedades dos materiais, como a constituição atômica, radiações, isótopos, etc. Uma classe importante de traçadores são os de origem isotópica, tanto os isótopos estáveis quanto os radioativos. Entende-se daí a importância do domínio da tecnologia nuclear para o estudo das barragens pela técnica dos traçadores.

Nas últimas décadas, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), sediada em Viena na Áustria, vem financiando projetos e equipes especializadas em vários países para a investigação e melhorias de barragens através dos traçadores (PIMENTA et al., 2019).

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), localizado na cidade de Belo Horizonte, é uma Unidade de Pesquisa que desenvolve atividades nas áreas de radiações, minerais, saúde e meio ambiente. A divisão de meio ambiente do CDTN realiza pesquisas sobre métodos relacionados à Hidrologia Isotópica, especialmente investigações com uso dos traçadores ambientais e artificiais. Desde 2016 o CDTN vem desenvolvendo estudos utilizando traçadores para avaliação de barragens. Esta pesquisa é financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e também pela IAEA. Nossos resultados demonstram que estes marcadores constituem uma ferramenta eficiente e de baixo-custo para se entender a percolação de água por uma barragem. Estes métodos podem ser utilizados desde a fase de planejamento da construção do barramento, durante a execução da obra, por toda a vida útil da estrutura, e até mesmo durante o seu descomissionamento, que é quando a barragem é desativada.

O quadro 1 apresenta os diversos traçadores mais comumente utilizados em estudos ao redor do mundo (PIMENTA et al., 2019b). Os traçadores destacados são aqueles de origem isotópica e objeto de investigação da área nuclear.

Quadro 1. Principais traçadores com aplicações em barragens. Destaque (círculos) nos traçadores isotópicos.

Origem Traçador	Tipo Traçador	Parâmetros medidos
Ambiental	Isótopos Estáveis	Deutério
		¹⁸ O
		¹³ C
	Isótopos Radioativos	Tritio
		¹⁴ C
		²² Rn
	Parâmetros físico-químicos	Temperatura
		pH
		Condutividade Elétrica
		Análise Química (elementos maiores e menores)
	Poluentes (presentes no reservatório)	Sulfatos
		Compostos Radioativos
		Nitratos e Fosfatos
Cianetos		
Intencional	Isótopos Radioativos	Tritio
		¹³¹ I
		³² Br
		¹⁹⁸ Au
	Corantes Orgânicos Fluorescentes	Rodamina WT
		Fluoresceína
		Eosina
		Amidorodamina G
		Sulforodamina B
		Tinopal CBS-X
	Compostos Salinos	Cloretos
		Iodetos
		Brometos

Fonte: Extraído de Pimenta e Moreira (2018b).

3 OS TRAÇADORES AMBIENTAIS

Uma classe importante dos marcadores da água, são os Traçadores Ambientais, também chamados de traçadores naturais. São aquelas substâncias já existentes no ambiente em que se está realizando o estudo e que podem gerar informações sobre o ciclo da água neste local, mesmo que esses traçadores sejam poluentes de origem antrópica.

Dentre os traçadores ambientais mais comumente utilizados, se destacam os isótopos, entre eles os isótopos estáveis e os isótopos radioativos (BEDMAR; ARAGUÁS, 2002). Porém há também outros traçadores não isotópicos, como os relacionados com a química da água, entre eles o pH e os sais minerais dissolvidos na água.

3.1 Os Isótopos Estáveis

Dentre os traçadores do fluxo da água, há destaque para os isótopos estáveis ^2H (deutério) e ^{18}O (oxigênio-18), que são constituintes da molécula de água. Funcionam da seguinte forma: a molécula de água é constituída por dois átomos de hidrogênio e por um átomo de oxigênio, formando a molécula H_2O . A molécula que contiver os isótopos mais pesados do hidrogênio ou do oxigênio, como o deutério e o oxigênio-18 respectivamente, necessita de maior energia para a sua evaporação, fazendo com que uma água que sofre muita evaporação seja mais rica nas moléculas contendo esses isótopos mais pesados. Este processo de diferenciação das águas é denominado de Fracionamento Isotópico, e seu resultado é a Assinatura Isotópica característica de diferentes águas, variando de acordo com a história de evaporação, condensação e misturas entre as águas (CLARK; FRITZ, 1997; MOOK, 2000).

Devido a diferenças nas assinaturas isotópicas promovidas pelo processo de evaporação é possível determinar a origem das águas amostradas em surgências, poços e piezômetros, diferenciando-as como águas subterrâneas do aquífero, águas pluviais, águas subterrâneas provenientes do reservatório, ou mesmo determinar a fração da mistura entre estas águas (CLARK; FRITZ, 1997; SANTOS; PIMENTA; MOREIRA, 2019). A Figura 2 apresenta uma representação de cenário de aporte de águas de diferentes origens e de misturas de águas na área das barragens.

Os isótopos estáveis ^2H (deutério) e ^{18}O são convencionalmente reportados na forma da notação delta (δ), expressando os valores relativos em relação a um padrão de referência, e, devido a sua baixa concentração, são expressos em ‰ (partes por mil) (CLARK; FRITZ, 1997; MOOK, 2000). Atualmente, é aceito o padrão de referência VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), que representa a composição isotópica média da água dos oceanos (CLARK; FRITZ, 1997; MOOK, 2000).

A Figura 3 apresenta o momento de análise dos isótopos estáveis através do método Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS) em laboratório do CDTN. Este equipamento mede a assinatura isotópica da água com extrema precisão e sensibilidade.

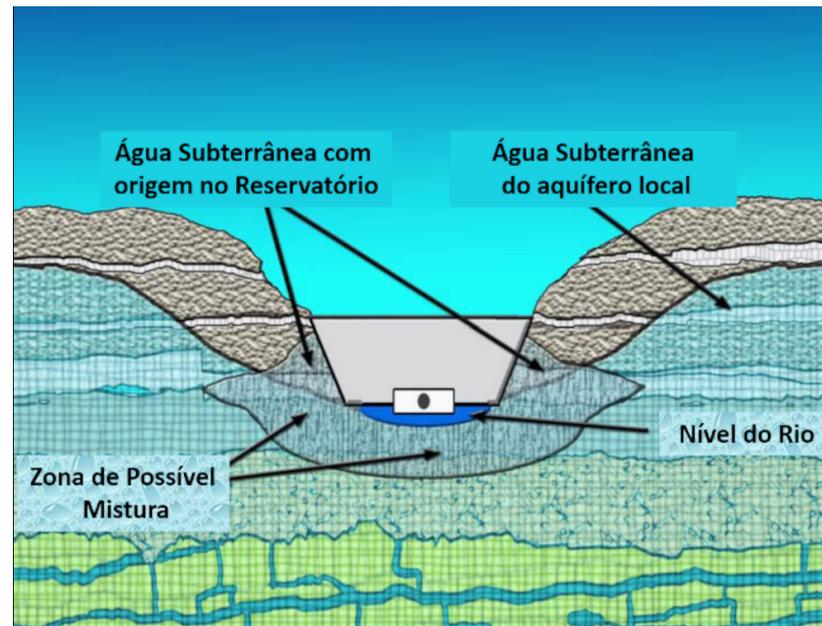


Figura 2. Vista de seção esquemática de jusante para montante de uma barragem mostrando um cenário de mistura entre a água subterrânea proveniente do reservatório e a água subterrânea do aquífero.

Fonte: Modificado de Craft (2005).



Figura 3. Análise de deutério e oxigênio-18 por IRMS em laboratório do CD'TN.

Fonte: Pimenta (2020a).

3.2 Os Isótopos radioativos ambientais

Alguns isótopos não tem o seu núcleo atômico estável, ou seja, ocorre o decaimento radioativo destas substâncias, emitindo neste processo energia ou partículas denominadas radiação. Cada substância radioativa decai no tempo de acordo com uma taxa caracterizada por sua meia-vida. Este é um processo natural presente em praticamente todos os materiais da Terra (CLARK; FRITZ, 1997; MOOK, 2000). Um exemplo do uso do decaimento radioativo está na datação dos fósseis através do carbono-14. Quando um animal morre, este interrompe a assimilação do carbono-14, e à medida que os anos passam, o carbono-14 vai se desintegrando através do decaimento radioativo. A datação do fóssil está na contagem do carbono-14 remanescente.

3.2.1 O trítio ambiental

Um importante traçador radioativo é o hidrogênio de massa atômica três (^3H), chamado trítio. Neste caso, o átomo do hidrogênio tem em seu núcleo um próton e dois nêutrons. Este átomo é radioativo, tendo uma meia-vida de cerca 12 anos. O trítio pode ser utilizado como um cronômetro natural, um marcador do tempo de percolação das águas subterrâneas

nos aquíferos (CLARK; FRITZ, 1997; MOOK, 2000), e essa informação pode ser muito importante na investigação do comportamento das águas subterrâneas na região de uma barragem em estudo.

O trítio presente no meio ambiente é constantemente formado nas altas camadas atmosféricas. Uma parte do trítio existente no ciclo hidrológico é devido à sua geração através dos testes nucleares realizados nas décadas de 1950 e 1960 (NOBLE; ANSARI, 2017). De acordo com Bedmar e Araguás (2002), a utilização do trítio como traçador no estudo de fugas de água em lagos, barragens e reservatórios pode ser, em muitos casos, similar à abordagem usada para os isótopos estáveis.

A Figura 4 apresenta o laboratório de Trítio Ambiental do CDTN. Devido às concentrações esperadas serem baixíssimas (ultra traços), é necessário que as amostras passem por processo de destilações e de enriquecimento eletrolítico, para então ocorrer a detecção da radiação beta do trítio já concentrado através do método da espectrometria de cintilação líquida, medida pelo equipamento Quantulus. Esse laboratório possui ainda uma blindagem contra a interferência de raios cósmicos, sendo uma referência latino-americana na medição do trítio ambiental.



Figura 4. Equipamento Quantulus localizado no Laboratório de Trítio Ambiental do CDTN.

Fonte: Pimenta (2020b).

3.2.2 O radônio-222

Outro traçador radioativo que merece destaque no estudo de barragens é o pouco conhecido radônio-222, de símbolo ^{222}Rn . O ^{222}Rn é um elemento da classe dos gases nobres, aqueles que não fazem ligações químicas com outros átomos. O radônio é gerado continuamente nas rochas, sendo um elemento filho da série de decaimento radioativo do urânio-235 (^{235}U). Este gás ao ser gerado na rocha pode migrar para a água subterrânea local, porém, as águas que estão na superfície, têm quase todo o conteúdo de radônio exalado para o ar atmosférico, modificando sua assinatura (CLARK; FRITZ, 1997). Desta forma a análise do radônio nas águas nas áreas dos barramentos pode evidenciar diferenças entre as águas subterrâneas provenientes do aquífero, com as águas provenientes da infiltração de ambientes superficiais, como reservatórios de barragens (RJEILLE et al., 2019; YI et al., 2018).

As medições de radônio-222 podem ser realizadas através de equipamentos portáteis, como o Rad7-H₂O, um detector de partículas alfa, como o apresentado na Figura 5. O procedimento consiste em extrair o radônio da água através do carreamento pela injeção de ar na amostra. O radônio é retido em um filtro e em seguida o equipamento realiza a medição da radiação alfa proveniente do polônio-218, isótopo radioativo gerado pelo decaimento do radônio-222.



Figura 5. Procedimento de análise de radônio-222. Pesquisador do CDTN Zildete Rocha comemorando o sucesso da campanha de amostragem em área de barragem.

Fonte: Pimenta (2020c).

4 TRAÇADORES INTENCIONAIS

Como já mencionado, os Traçadores Intencionais são aqueles injetados no meio ambiente com o objetivo de se estudar a dinâmica das águas. O uso de traçadores intencionais (ou artificiais) constituem ferramenta única na determinação de velocidades do fluxo de água no meio subterrâneo, na determinação de interconexões hidráulicas e na delimitação de porções com maiores vazamentos de água (LEIBUNDGUT; MALOSZEWSKI; KULLS, 2009).

De acordo com Leibundgut, Maloszewski e Kulls (2009) e Pimenta (2016), algumas características dos isótopos radioativos os tornam bons traçadores. Cada isótopo ao decair emite uma radiação característica, podendo ser detectada mesmo que este esteja muitíssimo diluído. Essa possibilidade de detecção em concentrações muito baixas é uma propriedade importante para o uso de isótopos radioativos como traçadores. Outra característica é a grande variedade de isótopos existentes, e a possibilidade do pesquisador selecionar o isótopo com as propriedades químicas desejáveis para cada estudo específico. O fato dos isótopos decaírem para outras formas mais estáveis e não poluentes também é uma vantagem destes traçadores. Estas propriedades colocam os isótopos radioativos como importantes traçadores e a tecnologia nuclear como conhecimento essencial para esta aplicação. Uma desvantagem do uso destes traçadores é a necessidade de autorização dos órgãos competentes para sua aplicação em campo (PIMENTA, 2016), exigindo vários documentos, o que pode ser um processo demasiado demorado, podendo inclusive impossibilitar a aplicação da técnica. No Brasil o órgão responsável é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

No geral, outras características são importantes para a seleção de um traçador: os traçadores devem ter boa solubilidade em água, e se comportarem identicamente a água do sistema pesquisado; os traçadores precisam ser inertes, ou seja, não devem interagir o solo local ou com outras substâncias presentes (exceto os traçadores reativos); os traçadores devem ser atóxicos para o ser humano, animais, vegetais e microrganismos, evitando que o meio seja contaminado; (KASS,1998; PIMENTA, 2016). O quadro 2 apresenta os principais isótopos radioativos utilizados como traçadores intencionais, assim como os tempos de meia-vida, os tipos de compostos químicos, as radiações emitidas e as reatividades químicas de cada isótopo.

Quadro 2. Principais traçadores radioativos utilizados em investigação de águas subterrâneas.

Nuclídeo Radioativo	T ^{1/2}	Composto Químico	Emissor	Propriedade Química
³ H	12,43 a	³ H ₂ O (água tritiada)	β	Quimicamente idêntica à água marcada
⁸² Br	36h	ânion Br	γ	Sorção muito baixa e quimicamente muito estável
¹³¹ I	8,05 d	ânion I	γ	Quimicamente instável, podendo ser sorvida por oxidação
²⁴ Na	15 h	cátion Na ⁺	γ	Sorção moderada, utilizada em canais e plantas de tratamento de esgoto
¹⁹⁸ Au	2,7 d	cátion Au ³⁺	γ	Sorção alta, usado como traçador “reativo”
Produtos Ativáveis				
⁸⁰ Br	17,6 min	Br - Ânion	γ	Sorção baixa
^{116m} In	54 min	EDTA - quelato	γ	Sorção baixa
Elementos Terras Raras		EDTA - quelato	γ	Sorção baixa

Fonte: Extraído de Pimenta (2016).

4.1 Testes com traçadores intencionais

Para o sucesso de um teste com traçadores, Nasseh et al. (2013) enfatizam a importância do planejamento dos pontos de injeção e amostragem em todos os projetos envolvendo uso de traçadores. Os traçadores podem ser injetados em furos de sonda, poços de monitoramento, ou em locais específicos dentro do reservatório (Figura 6). A fuga de água é detectada a jusante da barragem em poços, em surgências e em cursos d'água, com o uso de equipamentos de detecção apropriados para cada tipo de traçador

Através da Figura 6, Pimenta et al. (2019b) apresentaram alguns tipos de teste com traçadores em barragens de terra. Em ‘A’, o traçador é injetado na superfície da água do reservatório e é amostrado nos poços/piezômetros localizados no corpo da barragem e a jusante. Em ‘B’, o traçador é injetado em um poço localizado sobre a barragem e é detectado nos pontos de amostragem a jusante do barramento. E finalmente em ‘C’, o traçador é injetado no fundo do reservatório, próximo do pé de montante, e é detectado nas surgências a jusante da barragem.

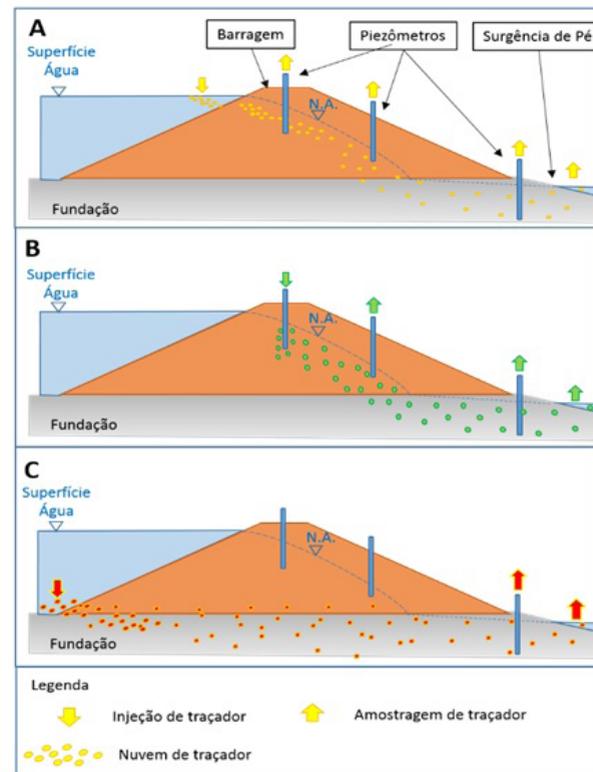


Figura 6. Tipos de teste com traçadores em barragens.

Fonte: Extraído de Pimenta et al. (2019b).

Os testes de fluxo horizontal e vertical em poço único (em inglês, single well test) também são bastante utilizados em áreas de barragens, havendo vários estudos de caso apresentados no trabalho de Bedmar e Araguás (2002). A técnica, ilustrada na Figura 7, compreende a marcação da coluna de água do poço por um determinado traçador através de uma mangueira e a posterior execução de medições de concentração do traçador na coluna de água do poço. A comparação entre os diversos perfis de concentração, no decorrer do tempo, indica zonas de entrada e saída de água do poço, sendo possível também a determinação das velocidades das águas nestes trechos, conforme apresentado por Bedmar e Araguás (2002), Jiansheng e Haizhou (2001) e por Pimenta (2016).

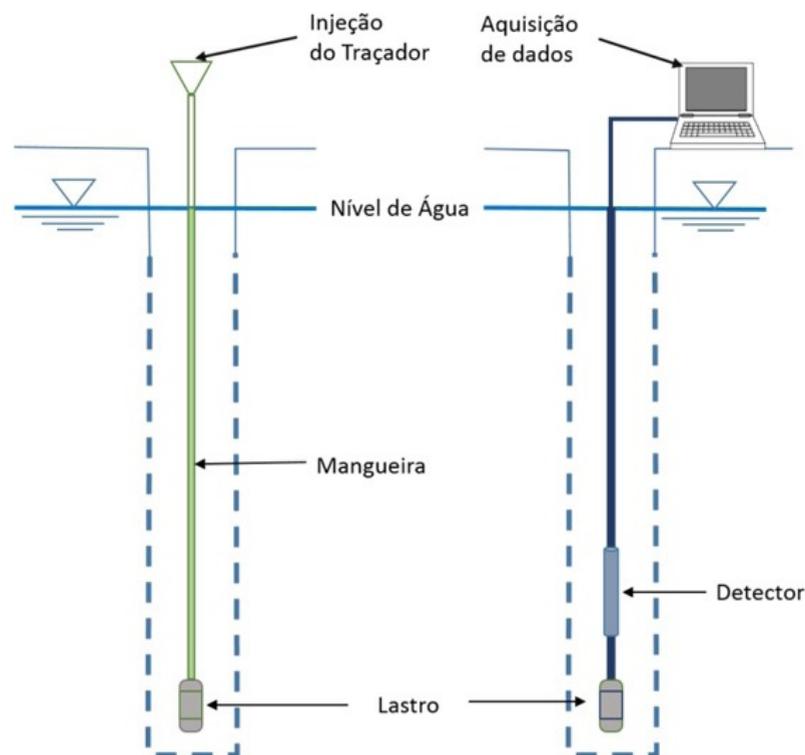


Figura 7. Marcação da coluna de água do poço utilizando mangueira para inserir o traçador e detecção da concentração de traçador através de perfilagens em sucessivos intervalos de tempo.

Fonte: Extraído de Pimenta et al. (2019b).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia nuclear, através das técnicas dos traçadores, vem se mostrando como uma ferramenta de grande valia quando o assunto é a segurança de barragens. As características dos traçadores isotópicos ambientais presentes na molécula de água permitem a diferenciação dos diferentes tipos de água, podendo determinar a origem daquela água em sendo originária do aquífero ou do reservatório da barragem.

Várias propriedades dos isótopos radioativos os tornam traçadores vantajosos no estudo de percolação de água em barragens, fazendo destes estudos uma especialidade pertencente à esfera da tecnologia nuclear.

Faz-se necessária a continuidade de pesquisas utilizando os isótopos na caracterização do fluxo de água na área de barragens. Estas estruturas de engenharia devem ser monitoradas com o máximo de rigor possível durante toda sua vida útil, utilizando de todas as técnicas disponíveis para que se evitem novos rompimentos causando danos irreparáveis ao meio ambiente, às vidas humanas e à sociedade como um todo.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEMIG (projeto 24556) e à IAEA pelo financiamento deste estudo. Agradecemos também ao CNPq pela concessão das bolsas, à CAPES e ao CDTN pela infraestrutura utilizada.

7 REFERÊNCIAS

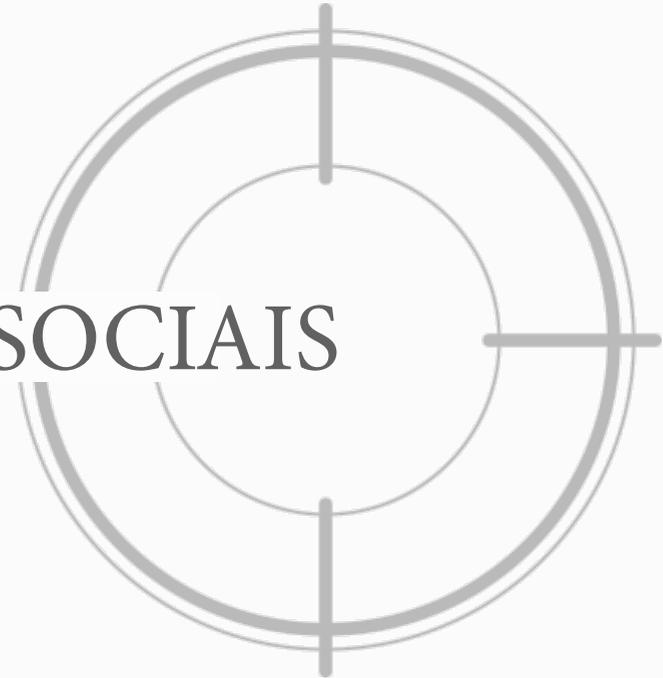
- BEDMAR, A. P.; ARÁGUAS, L. A. **Detection and prevention of leaks from dams**. Balkema Publishers, 2002.
- CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in the hydrogeology**. New York: Lewis Pub, 1997.
- CRAFT, D. **Seepage Chemistry Manual**, Dam Safety Technology Development Program, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, U. S. Department of the Interior, Denver.2005.
- JIANSHENG, C.; HAIZHOU, D. Study of fissured-rock seepage flow with isotope tracer method in single borehole. **Science in China**, Beijing, v. 44, p. 108, 2001.
- KASS, W. **Tracing techniques in geohydrology**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1998.
- LEIBUNDGUT, C.; MALOSZEWSKI, P.; KULLS, C. **Tracers in hydrology**. Chichester: Willey- Blackwell, 2009.
-

- MOOK, W. G. Introduction. In: MOOK, W. G. **Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications**. Paris: UNESCO, 2000. (Technical Documents in Hydrology, 39).
- NASSEH, S. et al. Investigation of Seepage Paths in Left Abutment of Bidvaz Dam Using Tracing Technique. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, Jaipur, v. 3, n. 4, p. 719-724, 2013.
- NOBLE, J.; ANSARI, M. D. A. Environmental isotope investigation for the identification of source of springs observed in the hillock on the left flank of Gollaleru Earthen Dam, Andhra Pradesh, India. **Journal Earth System Science**, Bangalore, v. 126, n. 5, p. 126-167, 2017.
- PIMENTA, R. C. **Análise de deutério e oxigênio-18 por IRMS em laboratório do CDTN**. 2020a. 1 fotografia.
- PIMENTA, R. C. **Equipamento Quantulus localizado no Laboratório de Trítio Ambiental do CDTN**. 2020b. 1 fotografia.
- PIMENTA, R. C. **Procedimento de análise de radônio-222. Pesquisador do CDTN Zildete Rocha comemorando o sucesso da campanha de amostragem em área de barragem**. 2020c. 1 fotografia.
- PIMENTA, R. C. et al. Avaliação do fluxo de água em barragens através dos traçadores ambientais e geotecnologias associadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PROFISSIONAIS DE GEOCIÊNCIAS, 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: PROGEO, 2019a. 1 CD-ROM.
- PIMENTA, R. C. et al. Estado da arte sobre traçadores aplicados na avaliação de fugas de água em barragens. **Periódico Tchê Química**, Porto Alegre, v. 16, n. 31, p. 571-597, 2019b.
- PIMENTA, R. C.; MOREIRA, R. M. Characterization and hydrochemical tracers analysis in an abandoned mine: Minas Gerais, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESSO N PLANNING FOR CLOSURE OF MINING OPERATIONS, 2., 2018, Santiago. **Proceedings [...]**. Santiago: [s. n.], 2018a. 1 CD-ROM.

- PIMENTA, R. C.; MOREIRA, R. M. **Como a tecnologia nuclear pode auxiliar para a segurança das barragens**. Apresentação Workshop Dia D do Rio Doce, Ouro Preto, 2018b. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329428431_Como_a_Tecnologia_Nuclear_Pode_Auxiliar_para_a_Seguranca_de_Barragens. Acesso em: 24 nov. 2019.
- PIMENTA, R. C. **Utilização de traçadores em estudos hidrogeológicos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio Ambiente) - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2016.
- RJEILLE, M. J. et al. O Radônio como traçador ambiental aplicado na caracterização do fluxo de água subterrânea em barragens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PROFISSIONAIS DE GEOCIÊNCIAS, 1., 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: PROGEO, 2019. 1 CD-ROM.
- SALIM, D. H. C. et al. **Mapeamento aerofotogramétrico no auxílio de vistoria geotécnica e estudos com traçadores em barragens de rejeitos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PROFISSIONAIS DE GEOCIÊNCIAS, 1., 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: PROGEO, 2019. 1 CD-ROM.
- SANTOS, A. R.; PIMENTA, R. C.; MOREIRA, R. M. O Uso de traçadores para avaliação do fluxo de água no corpo de barragens de rejeito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PROFISSIONAIS DE GEOCIÊNCIAS, 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: PROGEO, 2019.
- WRIGHT, D. E. **Training Aids for Dam Safety: Evaluation of Seepage Conditions**. Denver: Bureau of Reclamation, 1990.
- YI, P. et al. Detecting the leakage source of a reservoir using isotopes. **Journal of Environmental Radioactivity**, Oxford, v. 187, p. 106-114, 2018.

SEÇÃO 3

IMPACTOS SOCIAIS



ECOLOGIA DA SAÚDE: ABORDAGENS TRANSDISCIPLINARES PARA ENTENDER DOENÇAS EM CENÁRIOS ECOLÓGICOS DEPAUPERADOS, COM ENFOQUE NA BACIA DO RIO DOCE

Sérvio Pontes Ribeiro ^{1,3}
Camila de Paula Dias ^{1,3}
Josefa Clara Lafuente Monteiro³
Wendel Coura Vital ^{2,3}
Alexandre Barbosa Reis ^{2,3}

1 UMA BREVE HISTÓRIA SOBRE HOMENS E DOENÇAS: SÃO OS TRÓPICOS O PROBLEMA OU SOMOS NÓS?

Os trópicos podem ser implacáveis para sociedades baseadas na completa transformação da paisagem para a construção de suas bases civilizatórias. A maneira mais efetiva com que essa implacabilidade se dá é pelas doenças. No entanto, esse é um padrão não necessariamente relacionado à transformação da paisagem apenas, mas às migrações e invasões (DIAMOND, 1997). De fato, se olharmos as maiores pandemias sobre as quais há algum registro, são de regiões temperadas, muito frequentemente relacionadas à má gestão de recursos naturais como água (do consumo ao tratamento de esgoto) mas também ao adensamento populacional. Assim, a afirmação inicial, embora aparentemente convincente, não o é por ser baseada não nos fatos, mas na percepção dos mesmos.

¹Laboratório de Ecohealth, Ecologia de dosséis e sucessão natural, ICEB-UFOP

²Escola de Farmácia, UFOP

³Laboratório de Imunopatologia, Núcleo de Pesquisas em Ciências Biológicas, NUPEB-UFOP

Doenças sempre ocorreram e ocorrerão, mas os surtos que tanto nos assustam não estão relacionados apenas aos trópicos, mas a maneira como civilizações se agregam, e como tendemos a minar a diversidade genética por trás de nossos agrupamentos. Ao nos segregarmos em grupos matrimoniais, prática comum em diversas civilizações, diminuimos a diversidade genética que poderia resultar em um certo número de pessoas resistentes a uma determinada doença. Soma-se a essa tendência de homogeneização, o adensamento em condições precárias, e o resultado é o alastramento de doenças.

William Hamilton (2001), pai das teorias de aptidão abrangente e seleção de grupo, dito o maior Biólogo do Séc. XX, debruçou-se tardiamente na vida sobre esse tema. Mais especificamente, publicou poucos e impactantes estudos sobre a evolução do sexo como uma resposta a severa, e rapidamente mutante, pressão seletiva que as doenças causam nos organismos ditos hospedeiros. Em um artigo instigante, publicado no livro “*Evolution of Life: fossil, molecules and culture*” (OSAWA; HONJO, 1991); (republicado em 2001 na coletânea de seus trabalhos - *Narrow Road of Gene Land*, v. 2), descreveu como a endogamia entre famílias reais pode ter levado civilizações inteiras ao colapso desde o Egito até a Europa medieval. Hamilton (2001) discute que tais preciosismos para manter o poder no controle de poucos consanguíneos é até duradouro em regiões onde doenças não se alastram muito rapidamente. Aqui entram os trópicos, e dentre nossas mais eficientes adaptações aos riscos de adoecimento: o sexo poligâmico.

Note que, falando agora na perspectiva da sociedade dominadora europeia, os nativos tropicais não foram dizimados por suas próprias doenças. Os relatos históricos são das doenças europeias, para as quais eles nunca tiveram contato, serem a sentença de morte de civilizações tropicais (DIAMOND, 1997). O exemplo mais recente foi publicado na *Nature* e fala de 80% de extermínio de povos submissos aos Astecas, em Oaxaca, causado pela salmonella, entre 1545 e 1550 (VAGENE et al., 2017). Na história conhecida das civilizações tropicais (Maias, Astecas, Indus, ou as grandes civilizações orientais-africanas, da Etiópia ao Egito) são raros os relatos de dizimação causada por surtos de doenças. Até transformarmos os trópicos em réplicas da urbanização eutrófico-poluidora e baseada na agricultura intensiva similar ao observado na Europa, os mais diversos povos estavam relativamente protegidos de epidemias severas (CROSBY, 1986). Mesmo quando doenças endêmicas de regiões tropicais se tornam extremamente frequentes, como o caso da febre amarela, isso se dá dentro da estrutura civilizatória europeia (LÖWY, 2005).

Olhando então para o passado cultural dos povos tropicais, Hamilton (2001) descreve que a totalidade das culturas poligâmicas masculinas (ou seja, o homem é compartilhado por mais que uma mulher como esposo) ocorria em regiões onde ectoparasitismos predominavam. É importante essa associação, pois doenças mais terríveis que não manifestam na pele podem, em condições primitivas, serem causa mortis desconhecida culturalmente. Em geral, uma maior diversidade de doenças como um todo se correlaciona com maior diversidade de doenças ectoparasitárias. Ou seja, o sujeito mais vulnerável a parasitos visíveis tenderá a ser mais vulnerável a qualquer outra doença, em princípio. Um princípio similar faz com que caracteres secundários relacionados a saúde (vascularização periférica e coloração viva de pele e penas, plumagem iridescente, musculatura visivelmente avantajada, habilidades físicas extravagantes) indiquem às fêmeas o macho mais bem ajustado às rápidas pressões seletivas causadas por doenças. Acredita-se, por exemplo, que a existência do macaco Uacari da cara vermelha em regiões com endemismo de malária não seja uma coincidência, dado que nas raras regiões sem essa doença predomina o raro uacari da cara marrom. Há vantagem em mostrar um rosto sanguíneo no topo de uma árvore onde uma águia de quase 1,5 m de altura, chamada “águia caça-macaco” procura presas? A vantagem estaria em mostrar que é resistente à malária e esbanjar hemoglobina no rosto (uma hipótese nunca provada). Assim, com base nesse princípio, o melhor para as fêmeas seria dividirem os poucos machos saudáveis que ter um “perebento” só para você.

Dado, então, que o homem nativo dos trópicos não parecia ser vitimado por epidemias locais, precisamos enfatizar quais as doenças que aterrorizam o homem contemporâneo ocidental (ou ocidentalizado) e por quê os trópicos levam a culpa. Há na história recente da humanidade três padrões importantes de epidemias, algumas com potencial para pandemias: 1) doenças que seguem dinâmicas populacionais caóticas, como as viroses HiNi, com surgimento súbito e inesperado, como a Influenza; 2) doenças caóticas novas, ou seja, cujo patógeno invadiu recentemente o hospedeiro (no caso, nossa espécie ou de nossos animais domésticos); 3) doenças cíclicas, porém com longos intervalos entre um surto e outro.

O primeiro e segundo casos, doenças caóticas e caóticas invasoras de novos hospedeiros, são representados pelos eventos mais dramáticos de doenças do mundo moderno, ou seja, a Influenza e, mais recentemente, a AIDS e o Ebola. As taxas intrínsecas de incremento populacional de vírus dessas espécies fazem com que essas doenças se espalhem de forma aterrorizadora e com grande potencial para pandemias. Quase sempre esses padrões estão relacionados à uma colonização

recente a um novo hospedeiro, que então é expressado pela rápida expansão da doença por encontrar poucas defesas imunológicas. Exemplos são a recente invasão do vírus da AIDS nas populações humanas, e os casos mais antigos de Ebola e Influenza, que continuam causando grandes danos devido a um processo estocástico de longo prazo (ou seja, recorrentes surtos imprevisíveis no tempo).

Essas doenças se relacionam com questões ecológicas ou conservacionistas e, sim, várias são nativas de regiões tropicais. Na verdade, uma grande parte dessas novas doenças é oriunda dos distúrbios ambientais que causamos na paisagem, que então expõem a nós ou aos nossos animais domésticos a infecções antes distantes de nossa coexistência. O avanço da *Yersinia pestis*, a peste bubônica, muito provavelmente se deu pelo contato de marmotas com ratos, e esses conosco, na China e ao longo da Rota da Seda. A gripe aviária e a gripe suína são os casos típicos de salto entre hospedeiros que nos atingiu com elevadíssima virulência em tempos recentes (ZIEGLER, 2009).

Um fator essencial para que uma doença salte de maneira bem-sucedida de um hospedeiro para outro é a chance de encontrar um novo hospedeiro susceptível. Aqui entra nossa relativamente baixa variabilidade genética comparada com outras espécies de vertebrados, e nossa tendência de viver em grandes aglomerações. A epidemia de peste bubônica aconteceu em 1330 na China, época de explosão urbana e comercial, que levava diversos moradores para regiões aglomeradas. Os “caravanserais” construídos ao longo da Rota da Seda, que eram alojamentos pequenos e com nenhuma condição de higiene, fizeram o resto, auxiliando a disseminação da doença até a Europa (ZIEGLER, 2009). Mais recentemente, as novas gripes que nos afligem quase sempre surgem após o homem derrubar florestas e colocar sua criação próxima aos remanescentes do habitat natural perturbado.

Curioso que nas notícias de imprensa, é a aproximação com a floresta que facilita a transmissão. Pouco se fala do fato de que essa aproximação é na verdade uma apropriação, já que as fazendas substituem os habitats florestais, e assim animais como morcegos e roedores silvestres (em grande parte depositários de parasitismos em comunidades ecológicas tropicais) (DATILLO et al.,2020) passam a coexistir com as propriedades agrícolas. Esse é um cenário atual em toda a Ásia tropical. É importante notar que essa coexistência tende a estabilizar em antigas fazendas, e surtos param de ocorrer. Por exemplo, no sudeste brasileiro, fazendeiros convivem por décadas ou séculos com remanescentes florestais, morcegos nos telhados e não há registros de novas epidemias em tempos modernos (e surtos como o de raiva tendem a diminuir com a melhoria do

controle e vigilância). No entanto, o medo dos trópicos permanece nas histórias da colonização, e no geral, faz mais danos do que o risco real, já que induzem o desmatamento.

Já as doenças de ciclos longos, ressurgem após uma ou duas gerações de hospedeiros viverem sem a seleção natural imposta pela doença. Isso relaxa a proporção de indivíduos resistentes e facilita o espalhamento de um novo surto local. Esse é o padrão do ressurgimento da febre amarela, tanto em macacos quanto em humanos (LÖWY, 2005). Pouco se sabe sobre a ecologia desses ciclos, suas reais causas e, em especial, qual papel das populações dos insetos vetores nos mesmos. Esses ciclos, por si só, não precisam acontecer em função de distúrbios ambientais, como foi alegado em 2017, quando o surto da febre na Bacia do rio Doce foi associado ao desastre da Samarco. Por outro lado, como não temos registros de transmissão urbana na atualidade, claro que uma nova epidemia com origem na floresta se espalhará nas populações humanas apenas quando pessoas entram em contato com áreas verdes florestais. Reforçando assim nosso temor pelas florestas.

Uma doença tropical parasitária que, por sua vez, é fortemente afetada por distúrbios ambientais é a leishmaniose, em especial na sua forma visceral (LV), causada pela *Leishmania infantum* (VILELA et al., 2013) e outros autores têm demonstrado que essa doença tem se expandido em resposta ao aquecimento global, urbanização, e mesmo a outros distúrbios pontuais, como a construção de hidrelétricas. O principal vetor dessa doença no Sudeste é o mosquito pólvora, *Lutzomyia longipalpis* (Flebotominae), o qual embora tenha sua origem em florestas naturais, hoje ocorre em densidades muito mais elevadas em áreas urbanas. Por ser uma doença agravada por condições precárias de saúde e disseminada mais fortemente em locais de habitação precária, tem grande impacto social. A leishmaniose visceral, como a leishmaniose tegumentar, é endêmica em todo o Vale do rio Doce (MAGALHÃES et al., 1980), sendo que foi por muito tempo considerada controlada na região. Este suposto controle era tido como um exemplo de sucesso do tripé de ações preconizado pelo Programa de Controle e Profilaxia da LV do Ministério da Saúde (BRASIL, 2006). Vinte sete anos após Magalhães et al. (1980) mostrarem que o tratamento de casos humanos, combate intensificado aos vetores nos domicílios e Peri-domicílios e sacrifício em massa de cães soropositivos, havia controlado a LV na região do Vale do rio Doce, Malaquias et al. (2007) mostraram que a doença reemergiu nesta região, possivelmente por uma negligência das ações de controle interrompidas após o suposto sucesso da iniciativa descrita por Magalhães (1980).

Por diversas razões, muitas delas negligenciadas, essa pode ser uma das doenças de maior risco de expansão dentro da Bacia do rio Doce. Ao contrário da febre amarela, que ressurgiu por sua própria característica intrínseca, a leishmaniose pode de fato tirar proveito da má qualidade ambiental das matas ciliares ao longo da bacia, da proximidade humana, e dos rejeitos da Samarco para expandir seu território de ocorrência.

Dessa forma, está claro que a complexidade epidemiológica de doenças tropicais impede o completo entendimento de todas nuances relacionadas ao surgimento de novas doenças ou epidemias. Somado aos processos intrínsecos das interações parasita-hospedeiro, está a crise ambiental na qual a humanidade está entrando, o que nos demanda novos conceitos transdisciplinares para entender os avanços e prevalências das doenças. Na próxima seção, vamos desenvolver um pouco os conceitos contemporâneos de EcoHealth, enfatizando a debilidade do uso de conceitos ecológicos legítimos na construção desse novo paradigma, o qual nasce de áreas da saúde e não do meio ambiente. Na terceira seção, vamos explorar os riscos potenciais à saúde dentro da bacia do rio Doce, em especial enfocando a leishmaniose visceral como um modelo de doença tropical com resposta positiva ao aquecimento global e distúrbios antrópicos.

2 ECOHEALTH E UMA NOVA ABORDAGEM HOMEM-ECOSSISTEMA-SAÚDE

A EcoHealth é um termo cunhado por volta de 2002, representando um campo emergente que aborda as interações entre seres humanos, animais e o meio ambiente, visando avaliar as complexas relações que afetam a saúde em cada um desses compartimentos (CHARRON, 2012; LISITZA;WOLBRING, 2018; ROGER et al., 2016). É a partir do reconhecimento dos diferentes tipos de determinantes da saúde, suas origens no meio ambiente e nas interações com outras espécies, e da integração e interpretação antrópica desses fatores, que a EcoHealth consegue melhorar a saúde ecossistêmica, e com essa o bem-estar dos humanos e animais domésticos.

Afim de superar a compartimentalização atrelada aos problemas de saúde, a EcoHealth enfatiza o agrupamento de profissionais e pesquisadores de diferentes áreas para o enfrentamento/tratamento de problemas distintos de saúde. Assim, a Ecohealth se construiu sobre os três pilares metodológicos propostos por LEBEL (2004): transdisciplinaridade, participação e equidade. Mais tarde, em 2012, Charron propôs a expansão dos três pilares para seis princípios: pensamento sistêmico, pesquisa transdisciplinar, participação, sustentabilidade, gênero e equidade social e conhecimento em ação (CHARRON, 2012).

Ambos os pesquisadores viram a importância da pesquisa transdisciplinar como estratégia para uma visão mais abrangente dos problemas de saúde relacionados ao ecossistema/problemas ambientais. Assim como da participação, que busca a integração colaborativa da academia com a sociedade, tomadores de decisão e comunidade, ou seja, todos que vivenciam os problemas diariamente. Ao aproximar a academia da população, além da equidade que visa abordar as condições desiguais e injustas, atende-se a comunidade como um todo, sem distinção de etnia, gênero e padrão social.

Charron (2012) expandiu os princípios, trazendo o pensamento sistêmico, para que os componentes do sistema (humanos, animais e meio ambiente) não sejam entendidos separadamente. A sustentabilidade está diretamente relacionada a preocupação com os ambientes degradados e o que podem causar no sistema como um todo, não só à saúde, como também, ao bem-estar. Para finalizar, conhecimento em ação, propõe a aplicabilidade do conhecimento que emergir das pesquisas em EcoHealth para melhoria do manejo do meio ambiente, saúde e bem-estar humano e animal.

Ao analisar um problema pela perspectiva EcoHealth é necessário considerar as dimensões: ecológica, sociocultural, econômica e governamental. Esse pensamento sistêmico considera as relações entre esses elementos e interação com as pessoas, sendo essencial para a compreensão da complexidade do sistema. Logo, essa forma de visualizar um problema permite compreender os limites, a escala e a dinâmica de cada cenário de ecologia da saúde.

Os ecossistemas têm demonstrado sinais de incapacidade de fornecer os serviços necessários para suprir a demanda atual da humanidade (HASSAN; SHOLES; ASH, 2005). Problemas ambientais como mudanças climáticas, esgotamento de recursos, contaminação, desastres ambientais (naturais ou não), por exemplo, têm aumentado simultaneamente com os problemas de saúde. O crescimento populacional, estimado para nove bilhões em 2050, e crises globais, como as criadas pelos mercados financeiros e pela indústria da guerra, aumentam o distanciamento entre ricos e pobres e formam um cenário complexo e de difícil capilaridade para a promoção de bem-estar e saúde.

A EcoHealth aborda problemas não só locais, como também em escalas maiores, nacionais e globais. Globalmente, a intensificação das produções agrícolas e pecuárias, urbanização, desmatamento desenfreado, e sistemas econômicos promotores de desigualdades sociais são fatores que potencializam problemas ambientais globais, como aquecimento, mudança de regimes pluviométricos, contaminação de solo e ar. Todos esses fatores afetam a saúde humana. Localmente, os problemas de saúde

humana decorrentes de crises ambientais são relacionados a falta de água potável, saneamento básico ineficiente ou inexistente, fontes proximais de poluição e contaminação, riscos ocupacionais, gerenciamento inadequado de resíduos sólidos (PRÜSS-ÜSTÜN; CORVALÁN; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2006).

A EcoHealth considera além dos aspectos sociais e econômicos, as atividades das pessoas e os ecossistemas que utilizam e habitam. Por mais que seus princípios possam ser usados para sanar problemas locais, muitas iniciativas podem ser extrapoladas para outras escalas. A EcoHealth lida com a complexidade da doença em todos os seus aspectos, se esforçando não apenas para entender o que está acontecendo, mas também para identificar fatores distintos ou mecanismos despercebidos que possam ser usados para alcançar mudanças para a melhoria (CHARRON, 2012). A saúde humana nitidamente depende de ambientes saudáveis, a humanidade depende de pessoas saudáveis e de ecossistemas preservados e equilibrados. No entanto, a compartimentação da saúde, meio ambiente e políticas sociais contrariam esse paradigma (CHARRON, 2012), e dificultam a percepção integral do problema de adoecimento em escala ecossistêmica. Nesse contexto, as condições de pobreza de grande parte da população global são os determinantes principais de adoecimento ecossistêmico, em humanos e não humanos, e servem de ponto de partida para entendimentos integrados sobre conservação ecossistêmica e saúde.

Os altos índices de pobreza acabam marginalizando a população mais carente para ambientes degradados, com falta de infraestrutura, saneamento, expondo as pessoas a maiores riscos de contaminação. Esse fenômeno é conhecido hoje em dia como “racismo ambiental”. Soma-se que, muitas vezes, essas comunidades agravam a precariedade de sua existência por falta de informação ou treinamento, pois usam de forma inadequada os ecossistemas e acabam aumentando a exposição a substâncias tóxicas, organismos infecciosos, inundações, desmoronamentos e escassez hídrica. Há vários estudos de caso, necessários em uma ciência nascente, que devem auxiliar na construção de um paradigma geral de combate às doenças em escala ecossistêmica no futuro próximo. Citamos alguns casos, relacionados com expansão de doenças parasitárias e infecciosas transmitidas por invertebrados.

Monroy et al. (2012) estudaram a mobilização para a prevenção da doença de Chagas na área rural da Guatemala. Os pesquisadores apresentaram como conseguiram convencer o Ministério da Saúde guatemalteco a utilizar novas iniciativas regionais de saúde após situarem a ecologia da doença regionalmente. Com isso, desenvolveram intervenções locais aplicáveis

e com auxílio político ampliaram a escala das práticas utilizadas. Nesse estudo, a tensão entre conhecimentos acadêmicos/pesquisa e aplicabilidade foi superada e colocada em prática, respeitando o sexto princípio que é o conhecimento em ação.

As alterações na temperatura e precipitação podem gerar um aumento do surgimento de doenças. Exemplos disso são a malária e a dengue que possuem seus vetores (mosquitos dos gêneros *Anopheles* e *Aedes*, respectivamente) bem adaptados a altas temperaturas. Mudanças nos padrões climáticos sazonais permitem que eles ampliem o alcance para áreas anteriormente mais frias, enquanto, que em locais com chuvas mais pesadas que o normal, há um aumento da disponibilidade de água parada, proporcionando local adequado para a reprodução destes vetores (UNAHALEKHAKA et al., 2013).

Estudo da UFOP sob processo de publicação (PEDROSA et al., 2011.) monitorou a invasão de *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus* no município de Ouro Preto. Essas espécies estabeleceram populações viáveis na cidade a partir de 2007, quando se inicia um período de invernos mais quentes. Não coincidentemente, nesse mesmo período, os casos registrados de leishmaniose visceral em Valadares praticamente dobraram. Esse estudo aponta com clareza que os vetores de arboviroses invadem regiões originariamente mais frias a partir de períodos com anos contínuos de invernos mais quentes, independente da média anual de temperatura. Pedrosa et al. (2020) conseguiram demonstrar que foram precisos menos de 10 anos da invasão do *Aedes* para que a dengue se tornasse uma doença autóctone no município.

Assim, é fácil perceber que os efeitos ambientais sobre os padrões de ocorrência e intensidade de doenças humanas não podem ser investigados sem levar em consideração as mudanças climáticas em curso. As mudanças climáticas afetam a saúde humana e animal e podem proporcionar maior número de desastres naturais, por exemplo, tempestades e inundações que propiciam aumento da incidência de doenças transmitidas pela água. Devido a isso, doenças já controladas ou desaparecidas podem reaparecer. Sabe-se que outro fator que contribui para a disseminação de doenças é o fato de mais pessoas viajarem por diversas regiões, podendo transportar doenças de uma região para a outra, o que agora é catalisado pelo aquecimento global (UNAHALEKHAKA et al., 2013).

Desastres ambientais, como o rompimento de barragens, podem gerar alterações na paisagem capazes de criar habitats propícios a instalação de doenças ainda não encontradas em uma dada região. Insetos vetores adaptados aos habitats degradados das áreas urbanas poderiam facilmente se disseminar ao longo de trechos impactados por derramamento de rejeitos, por

exemplo. No entanto, embora seja uma hipótese plausível que vetores de doenças como dengue e leishmaniose tirem proveito da piora das condições ambientais de uma região, o efeito direto da degradação por eventos catastróficos sobre ocorrência de doenças nunca foi devidamente investigado à luz de conceitos ecológicos.

Um exemplo recente e dramático de desastre não natural foi o rompimento da barragem de Fundão, em Bento Rodrigues (Mariana-MG). Tal evento, ocasionou perda da flora e fauna local, matando as formas de vida ao longo do curso do rio que corta cerca de 230 cidades. O rejeito derramado no interior de Minas de Gerais percorreu centenas de quilômetros e chegou à foz do rio Doce, no Espírito Santo, adentrando mar a fora (FERNANDES et al., 2016; FERNANDES; RIBEIRO, 2017).

A EcoHealth, nesse caso, a partir de um grupo transdisciplinar, com o apoio de moradores e atingidos, e com uso de técnicas como a ciência cidadã, pode intensificar a vigilância para prevenir que doenças jamais vistas na região, ou que já desapareceram, ocorram devido a degradação ambiental ocasionada. Um caso emblemático de doença negligenciada, de efeitos devastadores é a leishmaniose visceral. Uma doença que atinge cães e pessoas, mas que é agravada em condições de pobreza, será explorada na última seção como um estudo de caso e potencial indicador das deteriorações ambientais na bacia do rio Doce.

3 UM OLHAR ECOLÓGICO SOBRE OS RISCOS DE EXPANSÃO DA LEISHMANIOSE AO LONGO DA BACIA DO RIO DOCE

A leishmaniose visceral (LV) é uma doença infecciosa parasitária, não contagiosa, que no Brasil é causada pelo protozoário *Leishmania infantum*, transmitida ao homem e a outros mamíferos através da picada de fêmeas de insetos hematófagos do gênero *Lutzomyia*, sendo a principal espécie vetor no Novo Mundo *L. longipalpis* (PIMENTA et al., 2012). *Lutzomyia longipalpis* é uma espécie nativa da América do Sul, supostamente evoluída em ambientes florestais. Assim, a LV no Brasil teve até a década de 80 um perfil epidemiológico rural, onde os casos se concentravam principalmente em regiões de fundo dos vales, locais chamados de “boqueirões” ou “pés-de-serra” (DEANE, 1956). Posteriormente, a doença se urbanizou, devido à boa adaptação do vetor ao ambiente doméstico e pela presença do cão, principal reservatório urbano da doença. A associação típica da leishmaniose visceral com animais domésticos e periurbanos, notadamente o cão e roedores, evidenciam uma longa

história evolutiva tanto do protozoário quanto dos seus vetores com os ecossistemas antropomorfizados (ANDRADE FILHO et al., 2017; SOUZA et al., 2015). A leishmaniose visceral é, portanto, uma doença tipicamente explicada e combatida dentro dos paradigmas da EcoHealth.

A leishmaniose visceral pode evoluir a óbito em mais de 90% dos casos quando há negligência no diagnóstico e tratamento (BRASIL, 2006). Sendo a leishmaniose visceral uma doença transmitida por um inseto vetor altamente adaptado às regiões peri-urbanas, normalmente relacionados a problemas sanitários (PINHEIRO, 2014), o padrão de expansão da doença sugere potencial para invasão do inseto vetor em áreas que antigamente eram mais frias e também em áreas com expansão urbana desordenada. Ou seja, é uma doença cuja expansão se dá claramente em resposta à degradação ambiental, migração, ocupação urbana não planejada, condições precárias de saneamento e habitação, concomitantemente com fenômenos relacionados com o aquecimento global.

A leishmaniose visceral é considerada pela Organização Mundial de Saúde uma das endemias de maior relevância no mundo, estando na lista de doenças tropicais negligenciadas (OPAS, 2019). Sabe-se que expansão geográfica da *L. longipalpis* está fortemente associada a áreas urbanas e periurbanas e a condições sanitárias e de saúde precárias. Ainda assim, diversos fatores são determinantes da situação emergente ou reemergente da doença, dentre eles podemos destacar aqueles ambientais-climatológicos. Os que mais contribuem para a transmissão da doença são altas temperaturas e elevada precipitação. Tais fatores configuram uma possibilidade de aumento da incidência da doença em um contexto de mudanças climáticas (FONSECA, 2017).

Sendo uma espécie bem adaptada a ambientes sob distúrbios dos mais diversos (SOUZA et al., 2015), é possível que ambientes favoráveis ao *L. longipalpis* estejam instalados nas margens de todo o rio Doce após o desastre da Samarco, dado o agravamento das características deterioradas das margens dos rios e de suas matas ciliares. As pesquisas FAPEMIG-CAPES sobre a bacia, financiadas após o desastre, evidenciaram que há um número reduzido de matas ciliares nas margens dos rios, mesmo antes do desastre. No entanto, a maioria dessas poucas áreas florestadas podem, facilmente, ser classificadas como “novos ecossistemas”, no sentido de que não existem ou funcionam isentas de forte pressão antrópica. Fora das áreas de preservação públicas, Reservas Legais são intensivamente utilizadas pelo gado e agricultores, retraindo pouco das características

originais de uma floresta típica das margens de um rio tropical. Esse novo ecossistema tem como característica a simplificação estrutural e diminuição de diversidade e estrutura trófica comparado com áreas preservadas, como nossas pesquisas em andamento têm demonstrado. Esse cenário rural pode, em grande extensão, favorecer a expansão de espécies de insetos vetores intimamente relacionadas aos agro-ecossistemas pastoris e também urbanos.

Em conclusão, se as margens do rio Doce e seus afluentes se tornarem habitat facilitador para a expansão do *L. longipalpis*, diante do cenário de aquecimento global, existe o risco potencial dessa espécie se instalar em municípios montanos, como Ouro Preto. Se invernos quentes se sucederem, a invasão poderia ser facilitada pelas margens degradadas e cidades ribeirinhas da bacia do rio Doce. As condições ecológicas minimamente necessárias para isso, no entanto, precisam ser investigadas. Alguns aspectos negligenciados sobre exigências ecológicas e adaptações de imaturos a certas condições de solo precisam ser elucidadas, para se entender a real capacidade do inseto instalar populações viáveis em cidades de altitude elevadas de Minas Gerais.

4 REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Guia de vigilância epidemiológica**. 6. ed. Brasília, DF, 2006. 816 p.
- CHARRON, D. F. **Ecohealth research in practice**: innovative applications of an ecosystem approach to health. Ottawa: Springer, 2012. 288 p.
- CROSBY, A. W. **Ecological imperialism**: the biological expansion of Europe, 900-1900. Cambridge: Cambridge University, 1986.
- DATILLO, W. et al. Species-level drivers of mammalian ectoparasite faunas. **Journal of Animal Ecology**, Oxford, p. 1-12, 2020.
- DEANE, L. M. **Leishmaniose visceral**: estudo sobre reservatórios e transmissores realizado no Estado do Ceará. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Endemia Sanitária, 1956.
- DIAMOND, J. **Guns, germs, and steel**: the fates of human societies. New York: Ed. W.W. Norton, 1997.
-

FERNANDES, G. W. et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, Curitiba, v.14, p. 35-45, 2016.

FERNANDES, G. W.; RIBEIRO, S. P. Deadly conflicts: mining, people, and conservation. **Perspectives in Ecology and Conservation**, São Paulo, v. 15, p. 141-144, 2017.

FONSECA, A. F. Q. **Vulnerabilidade socioambiental e de saúde da população dos municípios mineiros aos impactos das mudanças climáticas**. 2017. 244 p. Tese (Doutorado em Saúde Coletiva) - Centro de Pesquisas René Rachou, Belo Horizonte, 2017.

HAMILTON, W. D. **The narrow road of gene land**. Oxford: OUP Oxford, 2001. v. 3, p. 496.

HASSAN, R. M.; SHOLES, R.; ASH, N. **Ecosystems and human well-being: current state and trends**. Washington: Island, 2005. v. 1, p. 948.

LEBEL, J. Ecohealth and the Developing World. **EcoHealth**, Berlin, v.1, p. 325-326. 2004.

LÖWY, I. **Vírus, mosquitos e modernidade: a febre amarela no Brasil entre a ciência e a política**. Rio de Janeiro: Ed. Fiocruz, 2005.

MAGALHÃES, P. A. et al. Calazar na zona do Rio Doce-Minas Gerais. Resultados das medidas profiláticas. **Revista del Instituto de Medicina Tropical**, Asunción, v. 22, p. 197-202, 1980.

MALAQUIAS, L. C. C. et al. Serological screening confirms the re-emergence of canine leishmaniasis in urban and rural areas in Governador Valadares, Vale do Rio Doce, Minas Gerais, Brazil. **Parasitology Research**, Berlin, v. 100, p. 233-239, 2007.

MONROY, C. et al. An ecosystem approach for the prevention of chagas disease in rural Guatemala. In: CHARRON, D. **EcoHealth research in practice**. Insight and Innovation in International Development. New York: Springer, 2012. v. 1, p. 153- 162.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). **Doenças negligenciadas**. Disponível em: https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_joomlabook&view=topic&id=37&Itemid=232. Acesso em: 16 out. 2019.

- OSAWA, S.; HONJO, T. **Evolution of life: fossils, molecules, and culture**. Tokyo: Springer-Verlag, 1991. p. 460.
- PEDROSA, Michelle Cristine et al. Invasion of Tropical Montane Cities by *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) Depends on Continuous Warm Winters and Suitable Urban Biotopes. *Journal of Medical Entomology*, 2020.
- PIMENTA, P. et al. **Interação do Protozoário *Leishmania* com seus insetos vetores**. Belo Horizonte: Laboratório de Entomologia Médica, Centro de Pesquisas René Rachou - Fundação Oswaldo Cruz, FIOCRUZ-MG, 2012.
- PINHEIRO, A. C. **Distribuição espacial e características epidemiológicas da leishmaniose visceral em Governador Valadares—MG/ Aimara da Costa**. 2014. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - UNIVALE, Governador Valadares, 2014.
- PRÜSS-ÜSTÜN, A.; CORVALÁN, C. F.; WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Preventing disease through healthy environments: towards an estimate of the environmental burden of disease**. 2006. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43457>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- ROESIJADI, G. Metallothionein and its role in toxic metal regulation. *Aquatic Toxicology*, Amsterdam, v. 22, p. 81-114, 1992.
- ROGER, F. et al. One health and EcoHealth: the same wine in different bottles? **Infection Ecology & Epidemiology The One Health Journal**, Uppsala, v. 6, p. 30978, 2016.
- SOUZA, C. F. et al. The phlebotomine sand flies fauna in Parque Estadual do Rio Doce, Minas Gerais, Brazil. **Parasites & Vectors**, London, v. 8, p. 619, 2015.
- VILELA, M. L. et al. The phlebotomine fauna (Diptera: Psychodidae) of Guaraí, State of Tocantins, with an emphasis on the putative vectors of american cutaneous leishmaniasis in rural settlement and periurban areas. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, Rio de Janeiro, v. 5. p. 578-585, 2013.
- ZIEGLER, P. **The black death**. New York: Harper Perennial, 2009. p. 15-16.

ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO: REPERCUSSÕES SOBRE A COMUNIDADE ESCOLAR DE BENTO RODRIGUES E PARACATU DE BAIXO

Maria Isabel Antunes-Rocha¹

Marcelo Loures dos Santos²

Adriane Cristina de Melo Hunzicker³

Priscilla Bitencourt Freitas⁴

1 INTRODUÇÃO

Este artigo contempla resultados da pesquisa sobre a oferta escolar destinada aos povos do campo, desenvolvida no Município de Mariana após o rompimento da Barragem do Fundão. Para este trabalho, foram analisados dados relativos aos povoados de Bento Rodrigues e de Paracatu de Baixo, regiões em que as escolas foram diretamente atingidas. Os dados apresentados foram produzidos na Pesquisa “Impactos do rompimento da barragem do Fundão na identidade das escolas do campo: um estudo na perspectiva das representações sociais”⁵, realizada no período compreendido entre 2017 e 2019, no município de Mariana. Partimos da consideração de que o desastre, ao atingir as formas de produção e reprodução social da vida, afetou particularmente a oferta escolar destinada aos povos campestres. Sendo assim, as questões referentes ao tema assumem relevância no que diz respeito às ações de reparação/restauração e revitalização.

¹Professora no Departamento de Ciências Aplicadas à Educação (DECAE) na Faculdade de Educação (FaE) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

²Professor do Departamento de Educação do Instituto de Ciências Humanas e Sociais (ICHS) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

³Doutoranda em Educação na Faculdade de Educação na FaE/UFMG.

⁴Doutora em Sociologia Política e bolsista no projeto “Impactos do rompimento da Barragem do Fundão na identidade das escolas do campo: um estudo na perspectiva das representações sociais”.

⁵Pesquisa desenvolvida com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Dentre estas diferentes dimensões do rompimento da barragem de Fundão, nossos estudos focalizam os impactos para o funcionamento das escolas, visto que a instituição escolar ocupa lugar de centralidade na vida das comunidades do campo. A escola é o espaço de aulas, de reuniões, festividades e de referência espacial e identitária no contexto campestre (ANTUNES-ROCHA, 2010; BRANDÃO, 1983).

Diante da necessidade de compor um conjunto de ações para fazer frente aos desafios provocados pelo rompimento da barragem de Fundão, emergiu a necessidade de conhecer como a oferta escolar foi impactada. A pesquisa foi orientada nas construções teóricas e metodológicas da Educação do Campo (FERNANDES, 2006), e utilizou-se da entrevista narrativa (BAUER; JOVCHELOVITCH, 2013). A entrevista narrativa é considerada uma forma de entrevista de profundidade que é utilizada quando se pretende que os sujeitos possam narrar suas experiências com um determinado objeto, numa perspectiva temporal. Não se trata, no entanto, de uma sequência cronológica de eventos, mas da forma como o enredo construído pelo narrador dá sentido ao tema abordado, permitindo compreender como os vários acontecimentos se estruturam como uma história. No contexto desta pesquisa, as narrativas permitem compreender os sentidos atribuídos pelos sujeitos entre sua trajetória e o ocorrido, e também levantar as expectativas para uma situação futura. Sendo assim, fazer uso deste instrumento permitiu que os entrevistados falassem dos aspectos que estruturam a relação com a escola até então ofertada e também expressassem suas expectativas.

O referencial da Educação do Campo se contrapõe ao paradigma da Educação Rural, até então dominante na área educacional brasileira. Na perspectiva da Educação Rural, a escola atuou historicamente focalizada na desvalorização das formas de vida vinculadas ao contexto campestre, seja por meio de uma oferta marcada pela precariedade física e pedagógica dos estabelecimentos, seja pelas práticas, livros e materiais didáticos utilizados, seja pela fragilidade na formação e condição de trabalho dos professores. Com este formato, vem sendo construído um projeto de escola que incentiva o modelo societário onde os povos campestres não encontram lugar, isto é, devem ser extintos. Os dados educacionais evidenciam tal processo (WERLE, 2010).

Sendo assim, entendemos que a reconstrução das escolas do campo nas regiões atingidas pelo rompimento da barragem de Fundão exigirá dos gestores, professores, alunos, pais e comunidade em geral um envolvimento com a discussão sobre a

escola que existe e sobre qual escola demandam para o futuro. Isto porque estará em debate também o projeto de campo que desejam construir. Nessa perspectiva, compreendemos que conhecer o que pensam, sentem e fazem os professores, alunos e comunidade sobre a escola poderá contribuir para o planejamento de uma oferta escolar que esteja conectada com as demais ações a serem implementadas no âmbito de um projeto estratégico de garantir um modo de vida sustentável para a população que habita o território.

Portanto, indagamos sobre a reconstrução da oferta escolar nas áreas atingidas, buscando compreender se estão sendo mantidas as condições até então em funcionamento ou se a reconstrução está fortalecendo e ampliando as práticas que podem ser consideradas como pertinentes para um projeto de campo sustentável.

Para as reflexões aqui desenvolvidas, utilizamos os dados obtidos na Secretaria Municipal de Educação de Mariana, no EducaCenso no Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep/MEC) e QEdu⁶. Em termos qualitativos, buscamos referência nas entrevistas narrativas realizadas com professores que atuavam nas escolas, assim como nas entrevistas narrativas com pais, alunos e líderes comunitários.

2 SOBRE O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO: IMPACTOS NO ESPAÇO CAMPESINO

No dia 05 de novembro de 2015, rompeu-se uma das barragens de rejeitos do complexo minerário da Samarco Mineração S/A, localizada no município de Mariana, em Minas Gerais. O município foi o epicentro da ruptura da barragem e também recebeu, em sua área rural, o maior volume dos rejeitos.

Os rejeitos minerários, em forma de lama, foram sendo transportados no curso do Rio Gualaxo do Norte até o município de Barra Longa, que teve atingida sua área rural e também a urbana, propriedades particulares e aparelhos sociais da cidade. As águas contaminadas pela lama desceram o Rio Gualaxo do Norte, encontraram o curso do Rio do Carmo e, em seguida,

⁶Os dados da Secretaria Municipal de Educação foram obtidos em dois trabalhos de campo in loco, onde foram feitas rodas de conversa com a secretária de Educação e funcionários do quadro administrativo pedagógico da gestão municipal. O sistema EducaCenso consiste no levantamento de dados educacionais brasileiros, cadastrados anualmente por cada instituição de ensino (municipal e estadual) no Censo Escolar. Esses dados são analisados e divulgados na plataforma do INEP e na plataforma do QEdu (QEdu/INEP/MEC, 2018).

foram sendo transportadas pelo rio Doce até a foz no oceano Atlântico, na vila de Regência, município de Linhares, estado do Espírito Santo.

A escala Microrregional⁷ corresponde ao território que recebeu maior volume dos rejeitos entre a mineradora Samarco (em Mariana) até a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (no município de Rio Doce), território que sofreu os maiores impactos socioambientais (BRASIL, 2016). Assim, os camponeses que residiam em territórios próximos aos leitos dos rios, foram atingidos diretamente. Os distritos e subdistritos que tiveram prejuízos em Mariana foram Bento Rodrigues (comunidade localizada a aproximadamente 2,7 km a jusante do complexo das barragens da Samarco), Campinas, Paracatu de Baixo, Paracatu de Cima, Pedras, Borba e Bicas.

Os dados dos quadros 1 e 2, abaixo, indicam que as perdas no campo foram significativas. Informações colhidas em entrevista a um técnico da Empresa Mineira de Assistência Técnica e Assistência Rural – EMATER de Mariana (dezembro de 2017) confirmaram essa constatação e apontaram que a produção agropecuária era essencialmente familiar e relevante no município, indo além da subsistência, gerando renda e trabalho através dos seguintes produtos: leite, eucalipto, milho e cana-de-açúcar. Segundo ele, aproximadamente 90% da produção de leite de Mariana é vendida à empresa de laticínios Porto Alegre.

Ao longo dos trinta dias seguintes ao rompimento da barragem de Fundão, toda a produção nas áreas diretamente atingidas pela lama (muitas partes de propriedades produtivas, principalmente em Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo, mas em algumas outras áreas rurais também) foi interrompida. Nas localidades de Águas Claras e Cláudio Manoel, por conta da queda de uma ponte, não era possível escoar a produção. O leite, por exemplo, que é um produto perecível, sofreu fortes perdas, como cita o relatório da EMATER: “Os valores estimados são de 11.000 litros por dia em Mariana, 6.000 em Barra Longa e 4.000 em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado” (EMPRESA MINEIRA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E ASSISTÊNCIA RURAL - EMATER apud MINAS GERAIS, 2016. p. 39).

⁷A Microrregião é composta pelos municípios atingidos, localizados em Minas Gerais: Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado.

Quadro 1. Prejuízos causados pelo rompimento da barragem de Fundão em propriedades rurais dos municípios da Microrregião.

Item	Quantidade	Valor (R\$)
Número de propriedades atingidas	195	-
Número de pessoas residentes nas propriedades atingidas	295	-
Terras atingidas (ha)	1.270,50	15.576.089,58
Construções atingidas (unidades)	216	5.234.810,00
Cercas atingidas (metro linear)	161.571	977.000,00
Quantidade e valor das máquinas e Equipamentos atingidos	293	760.389,00
Quantidade e Valor dos Animais Perdidos	1.596	651.630,00
Número de Produtores e valor da dívida do crédito rural	34	3.395.506,85
Valor total de prejuízo estimado	-	26.595.425,43

Fonte: EMATER (apud MINAS GERAIS, 2016, p. 40).

Quadro 2. Prejuízos econômicos privados, causados pelo rompimento da barragem de Fundão aos camponeses nos municípios da escala Microrregional⁸.

Municípios	Agricultura (R\$)	Pecuária (R\$)
Mariana	878.340,00	6.273.210,50
Barra Longa	743.882,08	14.567.881,00
Rio Doce	256.000,00	414.000,00
Santa Cruz do Escalvado	100.000,00	110.000,00
Total	1.978.222,08	21.365.091,51

Fonte: EMATER (apud MINAS GERAIS, 2016, p. 37).

⁸Os valores de prejuízos na agricultura e pecuária para os municípios e Mariana, Barra Longa e Rio Doce foram calculados segundo levantamento da EMATER-MG. 1) Prejuízos relacionados à perda de plantação e máquinas e equipamentos (tratores, caminhões, entre outros); 2) Prejuízos relacionados à morte de animais e perda de infraestrutura de apoio (curral, galinheiro, pastagens, entre outros).

Fonte: EMATER (apud MINAS GERAIS, 2016, p. 37).

A merenda escolar em Mariana é fornecida por cerca de 70 agricultores, dos quais a maioria estava organizada por meio de Associações, dentre as quais conseguimos identificar: Associação Agricultores Familiares de Goiabeiras e Região; Associação de Cooperação Agrícola Cafundão; Associação dos Produtores de Leite de Águas Claras e Região, que recebe o leite produzido em Pedras, Borba, Ponte do Gama e Campinas; Associação de Hortigranjeiros de Bento Rodrigues (AHOBERO); e após o rompimento nasceu a Associação dos Atingidos pela Barragem do Fundão.

3 OFERTA ESCOLAR EM BENTO RODRIGUES E PARACATU DE BAIXO

Em Mariana, os rejeitos minerários da Samarco soterraram duas escolas – uma em Bento Rodrigues e uma em Paracatu de Baixo (Figuras 1 e 2). Os alunos, professores e funcionários da escola tiveram que ser realocados para novos espaços. Com a destruição das escolas, houve a interrupção temporária das atividades pedagógicas e, além disso, foi comprometida a rotina educacional após a realocação das comunidades escolares.



Figura 1. Escola Municipal Paracatu de Baixo, ainda com restos de lama.

Fonte: Hunzicker (2016).



Figura 2. Fachada da Escola Municipal Bento Rodrigues.

Fonte: Justiça Global (2015).

As duas escolas atendiam a alunos dos anos iniciais e finais do Ensino Fundamental desses subdistritos e também de localidades e sítios do entorno. Ambas as escolas foram remanejadas inicialmente para a Escola Municipal Dom Luciano Mendes de Almeida, no bairro Rosário em Mariana, para finalização do ano letivo de 2015. As circunstâncias vivenciadas pelos alunos, professores e funcionários das duas instituições foram complexas, principalmente devido ao processo de inserção repentina dos discentes oriundos de duas escolas do campo para a cidade. Podemos destacar alguns dos desafios: o fato da Escola Dom Luciano ter uma infraestrutura grande e uma rotina escolar diferente das duas escolas que foram destruídas; distanciamento da convivência dos vizinhos e das relações família/escola; mudanças na rotina familiar, já que houve interrupção dos modos de produção e reprodução da vida, principalmente porque muitos dos atingidos (as) (dentre adultos e jovens) trabalham em atividades ligadas à agropecuária familiar; e ainda, o fato da comunidade escolar de Bento Rodrigues estar em luto naquele momento, pois dois alunos da escola vieram a óbito com a ruptura da barragem.

Na sequência a Escola Municipal de Paracatu de Baixo foi instalada provisoriamente em dois lugares diferentes: o início do ano letivo de 2016 até agosto de 2018, a escola funcionou na estrutura de uma escola que estava desativada no bairro Morro Santana; contudo, a comunidade escolar reivindicou que a Fundação Renova alugasse uma infraestrutura mais próxima à área central da cidade, e atualmente a escola está instalada a poucos metros da prefeitura municipal de Mariana, na Avenida Manoel Leandro Correia (Figura 3).



Figura 3. Estrutura temporária da escola Municipal de Paracatu de Baixo.

Fonte: Ribeiro (2018).

Já a Escola Municipal Bento Rodrigues funcionou na infraestrutura da Escola Dom Luciano até maio de 2017 e, após essa data, a instituição foi transferida para a estrutura de uma residência no bairro Vila do Carmo, próximo ao centro da cidade de Mariana (Figura 4), onde está até atualmente.



Figura 4. Estrutura temporária da Escola Municipal Bento Rodrigues

Fonte: Freitas (2018).

Após o rompimento a comunidade destas duas escolas vivenciam uma sucessiva alteração em suas práticas cotidianas. Voluntários, grupos religiosos, órgãos governamentais e não governamentais, passaram a frequentar a escola com oferta de atividades artísticas (teatro, dança, música), doação de roupas, brinquedos e alimentos, e desenvolvimento de atividades pedagógicas, para citar algumas (Figura 5). Em que pese a relevância destas atividades para a superação das dificuldades financeiras, emocionais e práticas nos meses iniciais após o rompimento, observa-se que, a médio e longo prazo a persistência destes procedimentos sem o acompanhamento de um debate mais consistente sobre o lugar da escola no processo de revitalização da Bacia do rio Doce vem provocando o distanciamento da mesma como produtora e socialização de conhecimentos que podem ser fundamentais para a realização deste desafio.



Figura 5. Alunos de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo na escola Dom Luciano.

Fonte: Hunzicker (2015).

4 VIVENCIANDO A ESCOLA NO PÓS ROMPIMENTO

Ao longo da pesquisa conversamos com professores, pais, estudantes, técnicos educacionais e lideranças das comunidades atingidas. Para este texto selecionamos cinco narrativas. A entrevistada A, é uma líder comunitária de Paracatu de Baixo; a entrevistada B, uma jovem moradora de Bento Rodrigues que estudava na escola em 2015; a entrevistada C, era moradora de Paracatu de Baixo e leciona na escola; a entrevistada D, é professora da escola de Bento Rodrigues; e a entrevistada E, era funcionária da escola de Bento Rodrigues e também mãe de alunos.

A rotina escolar foi completamente alterada após o deslocamento das comunidades escolares de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo para o contexto urbano. O processo de (re)adaptação das escolas do campo na cidade de Mariana acarretou em insatisfação por parte dos membros da comunidade escolar (pais, professores, alunos, funcionários da escola e líderes comunitários), como demonstra a narrativa:

[...] os pais que são mais agarrados aos filhos querem os filhos mais seguros mesmo, não quer o filho longe, ainda mais aquela escola do Rosário, porque para mim aquela escola é horrorosa [...], para mim aquilo ali parece um presídio. E a escola de Paracatu era belíssima, muito maravilhosa, os meninos tinham internet, os meninos tinham lazer, tinham atividades extra, fazia coroação, tinha futebol, tinha a ginástica lá na praça com equipamentos... até as mulheres usavam o espaço da escola. (Entrevistada A).

A narrativa da entrevistada A demonstra a comparação da escola que existia em Paracatu com a escola provisória do Rosário, ou seja, a nova escola é estranha “parece um presídio”. A referência a uma escola “não familiar”, também foi relatada pela professora (entrevistada D), em relação a instituição provisória de Bento Rodrigues na escola do bairro Rosário: “aí a gente ficou durante um ano e onze meses, que foi em abril que a gente saiu de lá, então a gente ficou lá naquela situação todo mundo junto, tudo muito ruim, é como se você tivesse na casa de um parente e você não pudesse abrir a geladeira [...]”

O distanciamento geográfico das famílias alocadas em bairros distantes da escola dificultou as relações cotidianas entre família/escola, como relata a professora de Bento Rodrigues (entrevistada D) sobre a presença dos pais na escola, antes e após a ruptura da barragem. “[...] a gente conseguia buscar, mandar chamar, aquela coisa toda, agora não tem mais isso, cada um mora em um canto da cidade, então fica difícil e eu acho que até a presença dos pais diminuiu, a gente não tem mais esse contato [...]”. A entrevistada B, mãe de alunos de Bento Rodrigues também relata sobre a ausência na participação dos pais em festividades da escola.

[...] eu fui lá na escola, na festa da família que foi sábado passado, nossa, um clima muito estranho sabe... [...] eu ia na festa da escola lá no Bento, festa da família no Bento, eu até chorava vendo os meninos apresentaram, lindo que era, sabe, e era muita gente, aquela união entre as famílias. Lá os meninos apresentam a festa da família

que comemora o dia das mães, um monte de coisa, aqui foi aquele tiquinho de gente, uma coisa assim, não é que tava mal organizada é que tava sem graça. (Entrevistada B.).

Por outro lado, mesmo havendo esse distanciamento nas relações família/escola, e mesmo que em locais provisórios, as duas escolas são os únicos lugares que crianças e jovens (alunos do Ensino Fundamental) das comunidades de Bento Rodrigues e Paracatu ainda mantém a convivência cotidiana. Fato evidenciado pela professora de Paracatu de Baixo, entrevistada C.

[...] a gente tinha um grupo de jovens lá em Paracatu, já tinha 4 anos que estava funcionando e aqui a gente não conseguiu, também a gente não consegue manter, o jovem sumiu. [...] A princípio eu pensei muito nisso, nessa questão de interesse, eu pensei muito na questão do que a cidade oferece, esse monte de coisa, a disputa é muito grande, mas também depois eu pensando eu cheguei a conclusão do seguinte: uma comunidade só existe enquanto ela está junta em um determinado lugar; como é que vai se manter uma comunidade cada um em um bairro? Não existe essa comunidade, não existe por conta desse distanciamento, a comunidade de Paracatu ela não existe, ela faz um esforço, mas a comunidade da escola existe, a comunidade escolar existe porque a gente tá ali, [...] nosso território está ali, mas a comunidade de Paracatu que era comunidade religiosa, a comunidade de jovens, ela não existe mais. (Entrevistada C.).

Quando a professora, entrevistada C, afirma que a escola é o único lugar que ainda se estabelecem as convivências sociais entre os antigos moradores, refletimos sobre a complexidade vivenciada pelos demais moradores que não estão em idade escolar, até o nono ano do ensino fundamental. Tal como demonstram as entrevistadas A e B a respeito dos jovens que estão cursando ou deveriam cursar o Ensino Médio. “[...] a escola [alunos do Ensino Médio de Paracatu] tem uns aqui [em Mariana], um tanto foi para lá, Águas Claras, outros se dividiram por outras escolas... Por que não fez uma escola nova e juntou todo mundo e botou todo mundo no mesmo lugar?” (entrevista A). Tanto a escola municipal de Bento Rodrigues, quanto a de Paracatu de Baixo só ofertavam ensino até o nono ano do Ensino Fundamental. Para cursar o Ensino Médio, os alunos eram transportados para escolas polo (no caso de Bento, os alunos estudavam o Ensino Médio no distrito Santa Rita, e os de Paracatu de Baixo na escola de Águas Claras). Com o rompimento da barragem, o projeto de vida desses jovens foi

completamente alterado e muitos desistiram de estudar, principalmente porque não lhes foi ofertado o Ensino Médio em uma única escola, para que se mantivessem juntos, como afirma a jovem que estudava no nono na escola de Bento Rodrigues em 2015.

[...] eu gostava do Bento porque lá, se eu tivesse lá hoje eu tinha continuado a estudar e aqui em Mariana não dá né, uma porque a gente tem que deslocar para outra escola que não é igual a de Bento [...] Lá a gente tinha a nossa rotina, eu estudava no Bento, mas já tava pensando em Santa Rita, mas eu ia conviver com os alunos que estavam comigo que era do Bento, ia ser aquilo lá. Hoje não, já tá tudo separado, não é só eu, vários alunos que eu conheço que estudavam comigo em 2015, do dia que aconteceu isso não está estudando mais, se tiver estudando parece que são dois ou três de nove alunos, dois ou três estão estudando, o resto tudo parou. Porque teve que separar todo mundo né.” (Entrevistada B).

Os professores também passaram por tensionamentos, já que lecionam para alunos que perderam posses materiais e vínculos afetivos. Além de sofrerem mudanças no ambiente profissional, alguns professores também eram moradores das comunidades atingidas. Como prosseguir a rotina escolar em um novo contexto social, econômico e cultural? Ademais, tinham que lidar com tantas perdas.

2016 foi muito complicado e mesmo eu custei para achar o meu centro de professora, eu falo que em 2017 eu comecei a me sentir novamente professora e consegui pensar em conteúdo, de conseguir pensar em plano de aula, sabe, de retomar ali com os alunos [...]” (Entrevistada C).

A dificuldade para prosseguir com as atividades pedagógicas no pós-rompimento está relacionada ao sofrimento em relação às perdas (materiais, imateriais e, principalmente, afetivas), fato também vivenciado pelas crianças, como evidencia a narrativa da professora de Paracatu de Baixo.

Eles eram do quinto ano, aproximadamente 10 anos, então eles queriam saber tudo, eles tinham muita preocupação, pode parecer que não né, mas o maior medo deles era a Samarco falir e não reconstruir as

casas, então era muito difícil para eles entender [...] naquele começo era isso e muita revolta pelas mortes, principalmente pela morte das crianças, que morreram duas crianças, né, do Bento [...]. (Entrevistada C).

Outras dificuldades vivenciadas pelos discentes dizem respeito às discriminações sofridas no período que os alunos das duas escolas compartilharam o espaço com os alunos da escola do Rosário, como relata a professora:

Paracatu saiu primeiro que a gente, no ano seguinte, eles já conseguiram espaço para eles, aí a gente continuou lá, e era terrível, os meninos sofreram muito preconceito, eles não conseguiam interagir com as crianças do Rosário de jeito nenhum. Às vezes, a gente até tentava fazer alguma coisa, alguma recreação para ver se juntava, mas não dava certo, [...] os meninos discriminavam mesmo, falavam ‘você é do Bento vai para trás da fila’, jogava os meninos para trás, mandava os meninos irem para trás, os meninos sofriam essas coisas. (entrevistada D).

A entrevistada E, relatou que foram hostilizados quando compartilhavam a estrutura da escola Dom Luciano, como afirma: “[...] o pessoal ficava chamando a gente de ‘pé de lama’, ficava xingando a gente já nos primeiros dias: crianças, adultos, os funcionários da escola tudo xingava, depois que a gente veio para essa aqui (escola instalada na residência), estamos no céu em vista do Rosário.” A professora explicou sobre o possível motivo desses preconceitos:

[...] mesmo o povo do Bento passando por tudo que eles passaram ninguém imagina, ninguém estava ali, ninguém sofreu aquilo, então eu achava que eles ficavam imaginando assim: agora eles estão na vida boa, eles estão recebendo, eles têm um cartão, eles têm um dinheirinho para sobreviver, tem tudo né? Que nem isso eles do Rosário não tem, lá no Rosário tem gente muito carente, então eu acho que era um ciúmes e aí o que acontecia, todo mundo nessa hora quer aparecer na mídia quer aparecer, aparecia muitas pessoas levando presentes, doando as coisas para gente, livro para escola, material para escola, gerou até ciúmes dos funcionários da escola Rosário, por que a prefeitura não tem muita coisa né, prefeitura não manda muito material para escola [...] agora a gente tá na escola [na casa alugada para a instalação da escola], a gente tem um espaço só para gente. Nossa! É outra coisa, até os meninos já mudaram, você vê todo mundo feliz, correndo para lá e para cá, porque no Rosário, recreio era tudo sentadinho, assim não misturavam. (entrevistada D).

Perguntado à professora (entrevistada D) sobre o que se espera da escola que será reconstruída no reassentamento de Bento Rodrigues, ela responde:

Eu estou meio sem esperança para te falar a verdade, mas eu fico pensando assim, eu fico pensando em uma escola igual a nossa lá do Bento. [...] Nossa escola era enorme, com muito espaço, porque agora a gente está numa casa [...] é pequenininha [...] a gente sente falta daquela escola enorme. [...] A gente quer que seja como ... como era lá, os pais bem presentes na escola, a gente poder ir na casa deles porque é todo mundo bem pertinho, a gente vai tendo muito mais contato, trazer eles de volta para a escola, né?

As narrativas evidenciam que a forma de organização da oferta escolar para as comunidades de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo não considerou as condições mínimas para evitar excesso de estranhamentos por parte das crianças e jovens. Ainda que tenha sido a escola um dos principais espaços que possibilitaram o encontro entre as pessoas e a troca de informações entre membros da comunidade sem a presença ostensiva das pessoas, instituições e organizações sociais que se mobilizaram para o apoio à população por meio da vivência escolar. Neste novo cenário, a escola, ainda que distinta daquela da qual se recordavam, apresentavam-se como a principal referência comum a ambas as comunidades para tal construção.

Da mesma forma, a comunidade da Escola Dom Luciano também não foi respeitada ou orientada quando da decisão de realocar as escolas de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo. Os tensionamentos ocorreram por parte de ambos os grupos, sendo que os Atingidos (incluindo discentes e docentes), em função da fragilidade em que se encontravam, demandavam apoio para que a situação fosse equacionada por parte dos gestores.

O estranhamento diante do novo contexto escolar, reforçado pelo vivo sentimento de luto de professoras, pais e alunos, além de uma diáspora vivida e sentida, impôs-lhes a dura realidade de pensar no futuro, sem poder prenderem-se às referências anteriores.

5 PARA CONTINUAR A DISCUSSÃO

Os rejeitos minerários alteraram a vida das comunidades de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo como um todo e a rotina escolar. Houve impacto nas relações família/escola, no processo de ensino aprendizagem dos alunos e no trabalho discente. A comunidade escolar vivenciou perdas individuais e coletivas, o óbito das duas crianças que estudavam na escola de Bento Rodrigues e também perderam o local de trabalho, as escolas que lecionavam; seus alunos foram desterritorializados e algumas professoras também perderam suas próprias casas.

As narrativas dos professores, alunos, pais, técnicos e lideranças trazem à tona as tensões advindas das mudanças abruptas vivenciadas pela comunidade escolar após o rompimento. A descrição de uma forma escolar vinculada a modos de vida específicos do campo, ainda que marcados pela precariedade, deixa ver o impacto doloroso vivenciado nos aspectos sinalizadores de uma identidade fraturada. A relação família/escola/comunidade, marcada pela convivência próxima e imediata, vê-se regulada pelas temporalidades e espacialidades dos modos de vida cidade. A escola como um bem da comunidade não existe mais, pois a escola urbana é impessoal, não se vincula a sentimentos de pertencimento.

São estas expressões que nos levam a considerar que o rompimento da Barragem do Fundão impactou em Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo formas de produzir e reproduzir a vida que pode ser caracterizada como campesina. O trabalho agropecuário, a pesca, o artesanato, as práticas culturais, religiosas, sociais, escolares e de lazer tiveram rupturas. Em alguns minutos as comunidades presenciaram suas existências serem soterradas pela lama. Resta-lhes o árduo e difícil caminho da reconstrução. Recompôr os modos de vida vai exigir mudanças nas formas de pensar, sentir e agir. Reconstruir pode significar tentativas para reativar o que se vivia, mas também ser uma possibilidade para refletir dado que o rompimento foi provocado exatamente pelas formas como se praticavam a vida.

No que diz respeito a escola este desafio assume algumas especificidades. As escolas se configuravam como escolas situadas no campo. Traziam as características desta inserção. Por outro lado, se vinculavam de forma indissociável ao modo de produzir a vida em contexto minerário. Com mais presença na Escola de Bento Rodrigues é possível ver as marcas da relação entre escola e empresa mineradora, aspecto que exige estudos posteriores, mas que numa aproximação inicial é possível

identificar o “silêncio pedagógico” com relação a prática mineradora e seus efeitos na vida das pessoas e do ambiente na prática curricular.

Ao considerar o apoio às escolas como ação compensatória o Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta – TTAC (2016) deixa encoberto o papel estruturante da ação educacional na construção e consolidação de um modo histórico de fazer a prática minerária. Nesta perspectiva é possível perguntar se o “silêncio pedagógico” se manterá ou se será possível dar voz e textura a mineração, em toda a sua complexidade política, econômica, social e cultural, no cotidiano das escolas.

Estamos em um processo de pesquisa em andamento, mas algumas questões já se evidenciam:

- a) As formas de vida imediatamente atingidas dizem respeito às populações camponesas (agricultores familiares, artesãos, pescadores, indígenas, assentados, quilombolas, para citar alguns).
- b) A oferta escolar nestes contextos vivencia historicamente a precariedade física e pedagógica. E nas últimas décadas o fechamento de escolas tem inviabilizado o direito à educação por parte das populações camponesas.
- c) Temas como a questão agrária, a prática minerária, a monocultura para exportação, o uso indiscriminado de agrotóxicos, a violência contra a população camponesa, dentre outros, tem se constituído como um campo que denominamos “silêncio pedagógico” na prática escolar.
- d) O rompimento da Barragem do Fundão e do Córrego do Feijão evidenciam a relação empresa/escola no sentido de sustentar e manter o “silêncio pedagógico”.
- e) É preciso discutir o lugar da escola neste contexto, tendo em vista compreender seu papel no processo que produz uma prática que resulta em desastres, dentre os quais podemos citar o rompimento de barragens.
- f) Atualizando para o rompimento da Barragem do Fundão ainda é preciso discutir se a condição compensatória, projetada pelo Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta, não partiu de uma referência que destituiu a escola do seu papel estruturante na organização e manutenção da estrutura e dinâmica social.
- g) Sendo assim, é possível discutir se a escola, como ação compensatória, não mantém seu lugar de “silêncio pedagógico” com relação as questões centrais que produzem e reproduzem a vida no contexto da prática minerária.

Com estas questões sinalizamos para a necessidade da busca de produção de conhecimentos visando compreender as relações que as práticas minerárias, produtores dos rompimentos barragens, estabelecem com a escola, notadamente com àquelas que atendem as crianças, jovens e adultos que produzem e reproduzem suas vidas no contexto campestre.

6 REFERÊNCIAS

- ANTUNES-ROCHA, M. I.; HAGE, S. M. (org.). **Escola de direito: reinventando a escola multisseriada**. Belo Horizonte: Autêntica Editora, 2010. (Coleção Caminhos da Educação do Campo, 2).
- BAUER, M.; JOVCHELOVITCH, S. A entrevista narrativa. In: GASKELL, G.; BAUER, M. W. **Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático** 11. ed. Petrópolis: Vozes, 2013.
- BRANDÃO, C. R. **Casa de escola**. Campinas: Papyrus, 1983.
- BRASIL. Ministério Público Federal. **Procuradoria da República nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo – Força Tarefa Rio Doce**. Autos nº 60017-58.2015.4.01.3800 e 69758.61-2015.4.01.3400. 2016. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/docs/acp-samarco>. Acesso em: mar. 2019.
- FERNANDES, B. M. Os campos da pesquisa em educação do campo: espaço e território como categorias essenciais. In: MOLINA, M. C. (org.). **Educação do campo e pesquisa: questões para reflexão**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2006. 154 p.
- FREITAS, P. B. **Estrutura temporária da Escola Municipal Bento Rodrigues**. 2018. 1 Fotografia.
- HUNZICKER, A. C. M. **Alunos de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo na escola Dom Luciano**. 2015. 1 Fotografia.
- HUNZICKER, A. C. M. **Escola Municipal Paracatu de Baixo, ainda com restos de lama**. 2016. 1 Fotografia.

JUSTIÇA GLOBAL. Vale de lama: rompimento da barragem de rejeitos da Samarco (Vale/BHP). 2015. Fachada da Escola Municipal Bento Rodrigues. 2 fotografia. Disponível em: <http://www.global.org.br/blog/vale-de-lama-rompimento-da-barragem-de-rejeitos-da-samarco-valebhp-provoca-destruicao-em-mariana/>. Acesso em: 19 maio 2019.

MINAS GERAIS. Relatório: avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Belo Horizonte/MG, fev. 2016. Disponível em: http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5min.pdf. Acesso em: 10 mar. 2019.

QEdU/INEP/MEC. Dados do Censo Escolar 2018. Disponível em: http://www.qedu.org.br/brasil/censo-escolar?year=2017&dependence=0&localization=0&education_stage=0&item=. Acesso em: 12 maio 2018.

RIBEIRO, F. Educação: resultado da nossa luta. Reinauguração da escola de Paracatu de Baixo. Estrutura temporária da escola Municipal de Paracatu de Baixo. 1 Fotografia. Disponível em: <http://jornalasirene.com.br/educacao/2018/09/19/resultado-da-nossa-luta>. Acesso em: 22 jul. 2019.

TERMO DE TRANSAÇÃO E DE AJUSTAMENTO DE CONDUTA (TTAC). 2016. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/ttac/cif-ttac-completo.pdf>. Acesso em: 19 maio 2019.

WERLE, F. O. C. (org.). **Educação rural**: práticas civilizadoras e institucionalização da formação de professores. São Leopoldo: Oikos; Brasília, DF: Líber livros, 2010. 240 p.

O ASSOMBRO DO DESASTRE: REFLEXÃO SOBRE AS QUESTÕES JURÍDICAS, SOCIAIS, ECONÔMICAS E PSICOSSOCIAIS DO DESASTRE LIGADAS A UMA PERCEPTIVA DA HISTÓRIA AMBIENTAL

Haruf Salmen Espindola ^{1*}

Mauro Augusto dos Santos²

Eunice Sueli Nodari³

Lissandra Lopes Coelho Rocha⁴

Diego Jeangregório Martins Guimarães⁵

Iesmy Elisa Gomes Mifarreg⁶

1 INTRODUÇÃO

Um rio nunca é só água corrente e recurso hídrico. O rio é um complexo ecossistema fluvial dinâmico composto de elementos bióticos e abióticos, do qual depende a qualidade de vida. Os rios, no entanto, são tratados como recursos hídricos

Esse texto é parte dos projetos de pesquisas Fapemig: APQ-00525-16 e Univale: SHA 048910-17.

¹Haruf Espindola, professor titular da Universidade Vale do Rio Doce (Univale), vinculado ao curso de Direito e ao Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Gestão Integrada do Território, Governador Valadares, MG. haruf@univale.br <https://orcid.org/0000-0003-4609-288X>.

²Mauro Augusto dos Santos é professor adjunto da Univale, vinculado ao curso de Ciências Contábeis e ao Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Gestão Integrada do Território, Governador Valadares, MG. mauroasantos@gmail.com <http://orcid.org/0000-0001-8746-2176>.

³Eunice Nodari é professora titular da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), vinculada ao Departamento de História e aos programas de pós-graduação de História e de Ciências Humanas, Florianópolis, SC. eunice.nodari@ufsc.br <https://orcid.org/0000-0001-5953-649X>.

⁴Lissandra Coelho Rocha é professor adjunta da Univale, vinculado ao curso de Direito, e doutoranda do DINTER Univale/UFSC, Governador Valadares, MG;

⁵Diego Guimarães é professor assistente da Univale, vinculado ao curso de Direito e ao Observatório Interdisciplinar do Território – OBIT, Governador Valadares, MG.

e assim são estudados, em abordagens hidrológicas com fins econômicos.⁸ O uso humano se impõe como centralidade dominante, mas é preciso ressaltar o uso econômico que no Brasil representa a geração de energia e o transporte de polpa de minério por tubulação. Outro aspecto ainda mais secundarizado, ou mesmo negligenciado, é o fato dos rios serem culturas, religiões, vidas, histórias e tantas outras dimensões materiais e imateriais, algumas muito difíceis ou impossíveis de serem mensuradas. Nosso ponto de partida é o reconhecimento da importância dos rios para a história da vida no nosso planeta e, igualmente, para a história humana. Assim, todos nós, humanos e não-humanos, que coabitamos os muitos habitats que sustentam nossas heterogeneidades e multiplicidades de hábitos, ao longo do tempo, dependemos da terra e água, sendo os rios essenciais à nossa existência conjunta.

O rio Doce sintetiza toda uma história natural de milhões de anos. Nessa história a ocupação humana é muito recente, mesmo se comparada a outras regiões do estado de Minas Gerais.⁹ Os achados arqueológicos encontrados em suas margens tem data inferior a mil anos do presente; os povos de língua Macro-Jê, dos quais descendem os Krenak e Nac-nanuk são posteriores à saída dos Tupi; os colonizadores brancos com seus escravos negros chegaram a bacia do rio Doce não mais do que há 330 anos do presente; nas terras do vale do rio Doce, propriamente dito, a ocupação somente ocorreu, de fato, no século XX. Antes, portanto, dos humanos, o rio Doce foi colonizado pela Mata Atlântica e sua rica fauna. O rio moldou a paisagem e corre sobre uma geologia do Arqueano (3,85 a 2,5 bilhões de anos atrás) e Proterozoico (2,5 bilhões e 542 milhões de anos).

O rio Doce foi protagonista das aventuras de Fernão Dias em busca da Serra das Esmeraldas e da corrida do ouro, que deram origem as Minas Gerais no século XVIII. Entretanto, foi no decorrer do século XX que a bacia do rio Doce foi intensivamente ocupada e modificada em seus ecossistemas. Das grandes unidades de exploração minerária das terras altas a Oeste, passando pelas lavouras de cana-de-açúcar, café, cacau, arroz, feijão, milho e muitas outras; pelas extensas pastagens de criação extensiva de gado bovino; pelas múltiplas explorações minerárias (mica, gemas, granito); até grandes siderúrgicas, as indústrias de celulose e as extensas plantações de floresta de eucaliptos.

⁸Para uma visão sobre os ecossistemas fluviais veja Rodrigues (2009).

⁹O fóssil de Luzia, encontrado no município de Pedro Leopoldo, a noroeste de Belo Horizonte, bacia do rio São Francisco, tem cerca de 13.000 anos. A presença no rio Doce essa associada a povos Tupi, cujo material arqueológico encontrado tem data de cerca de 1.300 anos antes do presente (AP), sendo que o material próximo às margens do rio tem data de cerca de 750 anos AP. Confira a dissertação de Alexandre Pinto Coelho de Almeida, orientando da Profª. Dra. Loredana Marise Ricardo Ribeiro e coorientando do renomado arqueólogo Prof. Dr. André Prous. A Ocupação Tupi na Região do Médio Rio Doce/Mg: análise de material lítico e espacialidade do sítio arqueológico Florestal I. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

O rio Doce, que tem uma complexa biodiversidade e é berço de 80 espécies nativas da ictiofauna, dentre as quais 12 são endêmicas, é o Watu que dá vida e é parte da espiritualidade do povo Krenak. O rio nunca foi nem é somente um recurso hídrico; também não é o rio Lethe (Lete) da mitologia grega, capaz de suprimir o passado e fazer esquecer. Entre as muitas coisas que não podem ser esquecidas, uma é particularmente importante: esse rio é parte intrínseca da história da mineração no Brasil.

O rio e a mineração estão na poesia de Carlos Drummond de Andrade, desde muito antes da criação da Companhia Vale do Rio Doce. Em 1930 o poeta de Itabira disse: “Cada um de nós tem seu pedaço no pico do Cauê”. Entretanto, quatro décadas depois, em 1974, Drummond constata melancólico: Do rude Cauê,/a TNT aplainado,/resta o postal/na gaveta saudosista... (Canto Mineral). No poema de 1984 ele constata definitivo: “O maior trem do mundo/ leva minha terra/ para a Alemanha/ leva minha terra/ para o Canadá/ leva minha terra/ para o Japão (...) leva meu tempo, minha infância, minha vida/ triturada em 163 vagões de minério e destruição...” (O Maior Trem do Mundo). No final das contas, o poeta se pergunta: O Rio? É doce./ A Vale? Amarga./ Ai, antes fosse/ Mais leve a carga...¹⁰ O que ficou? Hoje Itabira não tem o Cauê nem o “progresso” prometido e sonhado, pelo contrário, Itabira vive o medo da maior barragem de todas, cujo sufixo -açu (Tupi) é bem apropriado: Itabiruçu, com seus 223 milhões de metros cúbicos de rejeitos (cinco vezes mais do que tinha na barragem de Fundão; cerca de 20 vezes mais do que a barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho).

Barragem de rejeito de mineração era um assunto/questão completamente distante da opinião pública até 5 de novembro de 2015, quando se deu o rompimento da barragem de Fundão da Mina de Germano, pertencente à Vale/BHP/Samarco. O cenário imediato ao rompimento foi marcado por imagens de destruição, desespero e morte.¹¹ Entretanto, três anos e dois meses depois, essas imagens foram ofuscadas pelas novas que surgiram das dezenas de mortes soterradas pela lama de rejeitos da barragem do Córrego do Feijão que se rompeu na mina da Vale, em Brumadinho (25 de janeiro de 2019). A posição tímida dos técnicos, agentes públicos, setores da imprensa, entre outros, em relação às barragens de mineração, e a relativização do perigo que representavam, deixaram de ser razoável depois de Brumadinho. Definitivamente as barragens de mineração entraram para a

¹⁰Lira Itabirana, publicado em 1984 no jornal Cometa Itabirano.

¹¹Em menos de 30 minutos a lama destruiu o povoado de Bento Rodrigues. Também foram drasticamente atingidas as localidades de Paracatu de Baixo, Gesteira e Barra Longa. 19 pessoas morreram, vítimas do desastre.

pauta das discussões da sociedade e dos agentes públicos, bem como para o noticiário e as mídias sociais. Se depois do primeiro rompimento, em Mariana, as populações dos locais próximos às barragens não se assustaram, depois de janeiro de 2019 tudo mudou: os moradores que residem próximo a essas estruturas passaram a viver o medo de um próximo rompimento.

O impacto provocado pelo número de mortes humanas, em Brumadinho, tirou ou reduziu a atenção dispensada aos danos provocados aos ecossistemas e às vidas de outras criaturas. A antropocentrização do desastre ficou mais ressaltada, pois a preocupação com o rio, nos dois casos, se concentrou no risco para o abastecimento humano e nas consequências econômicas. Essa centralidade antrópica precisa ser desconstruída. Os rios formam ecossistema complexo repleto de vidas, constituindo-se em sistema com outros cursos d'água interligados (bacia hidrográfica), contendo múltiplos habitats constituídos pela interconexão de terra e água, com seus coabitantes diversos que dependem desse meio para sustentar suas vidas e diferentes hábitos. Portanto, os desastres minerários além de atingir as pessoas (perdas de vida e perdas econômicas, sociais, culturais e subjetivas), atingem igualmente muitos espécimes da fauna e flora, que coabitam os diversos habitats que constituem a bacia hidrográfica. Assim, as pesquisas e ações de enfrentamento dos desastres devem ter como premissa uma atitude de recusa da hierarquização antropocêntrica, que coloca os humanos no centro e, ao mesmo tempo, concebe o valor a partir da utilidade por esta ótica, seja para o presente ou para as gerações futuras.

2 O DESASTRE NA ESFERA POLÍTICO-JURÍDICA

Os diferentes impactos provocados pelo desastre minerário e a situação dos afetados, bem como as controvérsias, tensões e conflitos que emergem do mesmo podem ser observados nas esferas político-jurídicas. Isso não significa que tudo que foi atingido e a totalidade dos afetados tiveram empoderamento suficiente para tornar suas necessidades demandas e, mais ainda, para manifestá-la publicamente e submetê-la a justiça. Tem até mesmo aqueles que não sabem que foram atingidos ou que não se reconhecem como tal. Ao Ministério Público cabe a tarefa de agir em nome de todos esses, mesmo daqueles que supostamente acham que não foram atingidos. Fazendo essas ressalvas, pode-se afirmar que a esfera político-jurídica é o desagudouro de demandas que surgiram do desastre e, por isso, fornece as pistas sobre os diferentes impactos e afetações, sejam elas sociais, econômicos, culturais, psicossociais ou ambientais.

O próprio campo político-jurídico sofre impacto do desastre em função das controvérsias que se instalam no interior das instituições do Estado. A primeira grande controvérsia surgiu do Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC), celebrado entre a União, Minas Gerais, Espírito Santo e as empresas Vale/BHP/Samarco, em março de 2016. O TTAC foi questionado pelos Ministérios Públicos de Minas Gerais, do Espírito Santo e o Federal, sob a alegação de que não traria efetiva reparação aos danos nem priorizava o interesse dos atingidos. A atuação da força tarefa do Ministério Público de Minas Gerais (MPMG), que havia assumido um relevante protagonismo na questão, sofreu mudanças depois da nomeação pelo Governador Pimentel do novo procurador-geral de Justiça de Minas Gerais, Antônio Sérgio Tonet, em 19 de novembro de 2016. O seu primeiro ato depois da posse, em 5 de dezembro, foi substituir os promotores mais atuantes na questão do desastre, Carlos Eduardo Pinto (coordenador da força-tarefa), Mauro da Fonseca Ellovitch e Marcos Paulo de Souza Miranda.¹²

O Ministério Público Federal (MPF) questionou a forma como foi definido o valor da reparação (aporte anual de 2 bilhões de reais, durante 10 anos), já que não se realizou estudos para a medição dos danos causados. E se fossem necessários mais que 10 anos para realizar a efetiva reparação? E se o valor necessário fosse maior que 2 bilhões de reais por ano? Deste ponto, o que se observou foi o surgimento de uma “colcha de retalhos”. Foram sendo elaborados diversos aditivos complementares ao TTAC, na tentativa de garantir a efetiva proteção dos direitos dos atingidos e do meio ambiente. Importante mencionar outro foco de intensa controvérsia surgido do TTAC: a criação do Comitê Interfederativo (CIF), formado pela União e pelos dois estados membros, e da Fundação Renova, de direito privado e controlada pelas empresas. A ausência dos atingidos nas instâncias decisórias das duas instituições responsáveis pela compensação, reparação e restauração¹³, se tornou motivo de forte embate com os Ministérios Públicos (Federal e os dois estaduais – MG e ES) e de críticas generalizadas da sociedade civil.

¹²Cf. Agência Brasil. Promotores do MP de Minas que investigavam tragédia em Mariana são substituídos. Publicado em 7/12/2016 Por Léo Rodrigues - Correspondente da Agência Brasil Belo Horizonte. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-12/promotores-do-mp-de-minas-que-investigavam-tragedia-em-mariana-sao>. Veja também Jornal Estado de Minas. Após dissolver força-tarefa de Mariana, MP garante que acompanhamento vai continuar. Novo procurador-geral manda de volta às comarcas alguns dos mais atuantes integrantes do grupo que investigava pior desastre do país. Publicado em 7/12/2016 por Gustavo Werneck no em.com.br. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/12/07/interna_gerais,830557/apos-dissolver-forca-tarefa-de-mariana-mp-garante-acompanhamento.shtml.

¹³As ações de compensação, reparação e restauração foram organizadas em 42 programas, sendo a Fundação Renova responsável pela execução e o CIF pelas diretrizes e fiscalização. Para conhecer os 42 programas visite a página da Fundação Renova. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/conheca-os-programas/>.

Com a intenção de tornar o acordo celebrado entre união, estados e empresas mais efetivo, em novembro de 2017, o MPF celebrou um Termo Aditivo Preliminar (TAP) ao TTAC, que estabeleceu um fórum de observadores e incluiu a obrigatoriedade de realização de audiências públicas e consultas prévias a população, bem como a contratação de assessorias técnicas para os atingidos. Finalmente, no dia 25 de junho de 2018, foi celebrado o Termo de Ajustamento de Conduta com as empresas e esferas públicas (TAC Governança ou TAC-GOV), homologado pela 12ª Vara da Justiça Federal, em 8 de agosto.¹⁴ De imediato surgiram mais controvérsias, devido as inesperadas ressalvas judiciais (“fica expressamente vedada”) do juiz federal Mario de Paula Franco Júnior, que estabeleceram vetos expressos de pessoas e entidades participarem das assessorias técnicas de auxílio às comissões de atingidos.

Para garantir a defesa de interesses difusos, coletivos e individuais homogêneos, bem como para responsabilizar criminalmente os culpados pelo rompimento da barragem de Fundão, o MPF ajuizou duas ações, respectivamente uma ação civil pública e uma ação criminal, contra as empresas Vale/BHP/Samarco.¹⁵ Na primeira pleiteou R\$ 155 bilhões de reais para reparação aos danos causados pelo desastre, incluindo-se tanto os direitos individuais de indenização quanto a reparação ambiental e atribuiu responsabilidade pelo desastre também ao poder público, por falha na fiscalização.¹⁶ Na ação criminal, denunciou 21 pessoas por homicídio qualificado, pelas 19 mortes ocorridas em virtude do rompimento da barragem; denunciou as empresas por crimes ambientais; além da empresa VOGBR e um de seus engenheiros por emissão de laudo

¹⁴O TAC Governança foi celebrado pela Vale/BHP-Samarco, BHP, os Ministérios Públicos dos três entes federativos (Federal, do Espírito Santo e de Minas Gerais); as Defensorias Públicas e Advocacias Públicas, também dos três entes; e outros órgãos governamentais.

¹⁵Cf. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF) denúncia 26 por tragédia em Mariana (MG). Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/noticias-mg/mpf-denuncia-26-por-tragedia-em-mariana-mg>; Veja também MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL. Denúncia - Samarco. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/docs/denuncia-samarco/view>.

¹⁶A controvérsias aumentam, à medida que não são julgadas as ações de indenização. Cf. G1. Julgamento de indenizações da Samarco é adiado novamente. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/vales-mg/noticia/2019/05/21/julgamento-de-indenizacoes-da-samarco-e-adiado-novamente.ghml>.

contendo informações falsas. Além dessas ações coletivas propostas pelo MPF, o judiciário está sendo movimentado, desde o final de 2015, com dezenas de milhares de ações individuais¹⁷, com pedido de indenização contra a Samarco.¹⁸ Somente em Governador Valadares correm mais de 70 mil ações.¹⁹

A pedido da mineradora Samarco, foi instaurado um Incidente de Resolução de Demandas Repetitivas (IRDR), a fim de julgar 50 mil ações pendentes. Houve um primeiro julgamento do IRDR no dia 22 de abril de 2019, e havia sido marcada uma segunda sessão para o dia 6 de maio. Ocorre que a data foi adiada para o dia 20 de maio de 2019 e depois adiado novamente, desta vez, sem data definitiva.²⁰ O que se procura ressaltar aqui é a complexidade das questões que emergem dos desastres, podendo se verificar na esfera político-jurídica a extensão e intensidade das afetações sobre pessoas, patrimônios, atividades econômicas, ecossistemas etc. Além de permitir verificar as afetações nas múltiplas dimensões humanas e não-humanas, é possível examinar as relações de poder que se estabelecem e de como elas moldam os diferentes cenários.

Entretanto é preciso ressaltar, mesmo que pareça irônico, que alguns ganham com o desastre. Desde a assinatura do TTAC a Fundação Renova gerou milhares de empregos; foram gastos milhões de reais em financiamento de pesquisa e apoio a Universidades; teses e dissertações permitiram titular doutores e mestres; comércio foi movimentado pelos recursos repassados a atingidos; honorários e empregos para advogados; novas contratações de servidores e

¹⁷ Cf. ESTADO DE MINAS. TJMG suspende mais de 50 mil ações relacionadas ao rompimento em mariana. Disponível em: [tj-mg suspende mais de 50 mil ações relacionadas ao rompimento em mariana](http://tj-mg.suspende-mais-de-50-mil-acoes-relacionadas-ao-rompimento-em-mariana). Veja também ESTADÃO. TJMG julga processo com mais de 50 mil ações ligadas a rompimento em mariana. Disponível em: <https://brasil.estadao.com.br/noticias/geral,tjmg-suspende-mais-de-50-mil-acoes-relacionadas-ao-rompimento-em-mariana,70002800995>.

¹⁸ Além das ações movidas no Brasil, o escritório anglo-americano SPG Law ingressou com uma ação na corte da Inglaterra e do País de Gales, contra a empresa BHP Billiton, em favor dos atingidos. O escritório firmou parceria com advogados brasileiros para realizar o levantamento dos danos. Cerca de 200 mil pessoas que aderiram ao processo. Cf. ESTADO DE MINAS. Ação internacional pela tragédia de mariana tem 200 mil adesões. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2018/10/31/interna_gerais,1001754/acao-internacional-pela-tragedia-de-mariana-tem-200-mil-adesoes.shtml; veja também ESTADO DE MINAS. Ação judicial no reino unido pela tragédia de mariana tem 240 mil adesões. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2018/11/06/interna_gerais,1003290/acao-no-reino-unido-pela-tragedia-de-mariana-tem-240-mil-adesoes.shtml.

¹⁹ Cf. TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Governador Valadares inaugura posto para conciliação. Disponível em: http://www.tjmg.jus.br/portal-tjmg/noticias/governador-valadares-inaugura-posto-para-conciliacao.htm#.xp_s4xzkjcs. Foi realizado um termo de cooperação técnica entre o Tribunal de Justiça de Minas Gerais (TJMG) e a Renova, que culminou na inauguração de um Posto Avançado de Autocomposição (PAA), para ser utilizado exclusivamente para realização de audiências e atos processuais relacionados aos processos envolvendo a Samarco. Cf. TRIBUNAL DE JUSTIÇA DE MINAS GERAIS. Termo de colaboração. Disponível em: <http://www.tjmg.jus.br/data/files/52/63/16/80/a781c510495681c5480808a8/image2017-03-28-153458.pdf>. Logo após a sua criação, um grupo de advogados realizaram uma manifestação contra o acordo firmado entre o TJ e a Renova. De acordo com eles, “É lamentável que uma ré se torne parceira da justiça na solução de problemas que ela mesma gerou”, disse Aloísio Padilha Gusmão. Cf. OLHAR SOBRE A CIDADE. Advogados protestam contra parceria entre TJ e Fundação Renova. Disponível em: <https://oolhar.com.br/advogados-protestam-contra-parceria-entre-tj-e-fundacao-renova/>.

²⁰ Cf. TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Julgamento de IRDR da Samarco é adiado. Disponível em: <https://www.tjmg.jus.br/portal-tjmg/noticias/julgamento-de-irdr-da-samarco-e-adiado.htm>.

estagiários; contratações de assessoria de imprensa e comunicação, de serviços de consultorias e assessoria de especialistas e de laudos; gastos de milhões de reais em compras de equipamentos, construções, infraestrutura, aluguel de imóveis, material de consumo, entre outros. Nos últimos três anos surgiu uma verdadeira e movimentada economia do desastre.

Sobre isso manifestou-se o cacique Toninho dos Comboios, professor indígena e atingido do território Tupiniquim e Guarani, localizado ao sul da foz do rio Doce, município de Aracruz, ES.²¹ Ele denunciou os impactos negativos sobre o ambiente do território indígena e sobre seu povo; lamentou pelo rio Doce, pelo mar e pela natureza, que perderam muito e continuam a perder. Com tristeza disse que alguns ganhavam com o desastre, mencionando as muitas teses e dissertações defendidas, sem retorno, pelo menos para agradecer; o dinheiro para as pesquisas que movimentam as Universidades; os empregos gerados pela Renova etc., porém queria saber em qual momento o rio, o mar, o povo e o ambiente também iriam receber o efetivo cuidado.

3 AS CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS: COMO ENTENDER OS DESASTRES TECNOLÓGICOS

Colocadas todas essas observações iniciais e apontando a centralidade que elas ganham na esfera político-jurídica, pode-se afirmar com grande certeza a necessidade do engajamento das Ciências Humanas e Sociais no enfrentamento dos desastres, particularmente dos desastres minerários. Esse texto procura contribuir para esse engajamento, com a inclusão da Filosofia, Ciências Humanas e Ciências Sociais Aplicadas no escopo das ciências que até o presente receberam atenção especial nos editais públicos e nas práticas discursivas “competentes”²², particularmente daqueles com poder de definir qual pauta de pesquisa será viabilizada. Também espera construir uma problemática relacional capaz de fundamentar a criação de uma rede de pesquisa interdisciplinar, com eixo nos estudos humanísticos e sociais, integrada com as ciências de outras áreas de conhecimento.

A tendência, identificada em diferentes sociedades que passaram por desastre de origem natural ou tecnológica, é supervalorizar a resposta tecnológica e, ao mesmo tempo, reduzir os estudos humanísticos e sociais a um pequeno espaço ou, simplesmente, negligenciá-los. Essa tendência está relacionada à ideia de que a resposta aos desastres deve ser “técnica” e que

²¹Ele se manifestou no 1º Fórum de Educação para Revitalização da Bacia do Rio Doce, organizado pelo Comitê Interfederativo na cidade de Colatina, ES, nos dias 17 e 18/10/2018. Essa constatação sobre a economia do desastre devo a fala do cacique Toninho dos Comboios, que anotei e muitas reflexões provocaram (Anotado por Haruf Salmen Espindola).

²²O discurso competente é parte das relações de poder no campo simbólico, no sentido dado por Bourdieu (1985, p. 113): “lutas pelo monopólio de fazer ver e fazer crer, de dar a conhecer e de fazer reconhecer...” Conforme Marilena Chauí (1993) é o discurso autorizado, que dispõe de veículo de difusão, encontra audiência aberta a ouvir e a aceitação como legítimo e verdadeiro.

somente mais PD&I pode evitá-los ou lidar com seus impactos. Trata-se de uma concepção sociopolítica associada à cultura científica dominante, que relativiza o estatuto epistemológico das Ciências Humanas e Sociais (BUTTON, 2010).

Isso pode ser visto no caso do desastre da Vale/BHP/Samarco. Os dois editais abertos pelas agências de fomento à pesquisa, em que associaram as agências federais e as estaduais, refletem essa concepção da C&T e de PD&I: estão focados na ideia de que a pesquisa dará respostas para a “recuperação da bacia hidrográfica do rio Doce”. Um dos projetos aprovados no segundo edital tem um título que é significativo dessa mentalidade: “restauração com ciência...”²³ Em relação ao segundo edital, houve maior abertura para diferentes áreas de conhecimento, porém a relação dos 16 projetos aprovados indica a mesma tendência utilitária da ciência, ao praticamente deixar de fora as Ciências Humanas e Sociais. O termo recuperação (solo, água, biota) aparece em oito projetos aprovados, mas se deve acrescentar o projeto que utiliza o termo restauração (solo). É interessante destacar que nove são de diagnóstico, desenvolvimento ou aplicação de tecnologia, sendo que um deles (o único da área social) é de aplicação “de tecnologia social de governança participativa para políticas públicas de recuperação da bacia do rio Doce no Espírito Santo”.²⁴

Ao examinar os editais constata-se que a concepção de fundo entende o desastre de modo fragmentado, promovendo uma dissociação que suprime arbitrariamente a sua totalidade e complexidade. No Espírito Santo, pesquisadores da UFES conseguiram articular apoio de pesquisadores de diferentes Universidades brasileiras para formar uma rede com dezenas de pesquisadores, cujo objetivo foi receber milhões de recursos em financiamento de pesquisa da Fundação Renova.²⁵ Segundo um dos articuladores da Rede²⁶ a intensão seria produzir conhecimento em apoio ao poder público, para que esse possa atuar

²³FAPEMIG: Chamada 04/2016 - Tecnologias para a Recuperação da Bacia do Rio Doce; CAPES-FAPEMIG-FAPES-CNPq-ANA: Chamada nº 6/2016 - Apoio a Redes de Pesquisa para Recuperação da Bacia do Rio Doce. O resultado do primeiro edital está disponível em: <http://www.fapemig.br/arquivos/site/chamadas/resultado/2016-04-rio-doce-aprovados.pdf>; o resultado do segundo edital se encontra disponível em: <http://www.fapemig.br/arquivos/site/chamadas/resultado/2017-97-redes-de-pesquisa-rio-doce-aprovados.pdf>.

²⁴Os cinco projetos financiados pela FAPEMIG, dentro da chamada conjunta pela CAPES-FAPEMIG-FAPES-CNPq-ANA Nº 6/2016, são ilustrativos da concepção de que mais C&T resolverá problemas causados por desastres tecnológicos: 1) Caracterização espectral, diagnóstico e modelos de recuperação edafoambiental; 2) Restauração com ciência do rio Doce: da dimensão edáfica ao sensoriamento remoto; 3) Aplicação de tecnologias baseadas em nanomateriais para recuperação das Águas; 4) Aplicação de tecnologias para aproveitamento econômico dos rejeitos dragados da barragem de Candonga; 5) Estudo de genética da conservação de espécies animais bioindicadoras da recuperação ecológica.

²⁵A coordenação da “Rede Rio Doce Mar” é da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). A Renova, fundação criada para reparar os danos do desastre ambiental, repassou R\$ 120 milhões para a pesquisa. Publicado em 15/10/2018, por Mario Bonella, da TV Gazeta, no site do G1-Espírito Santo. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/noticia/2018/10/15/pesquisadores-de-24-universidades-estudam-impactos-da-lama-da-samarco.ghtml>.

²⁶Cf. Matéria de capa do site ESHOJE. Rio Doce ganha mais um reforço na tentativa de recuperá-lo. Publicado em 6 de julho de 2017, pela Redação Multimídia ESHOJE. Disponível em: <http://eshoje.com.br/rio-doce-ganha-mais-um-reforco-na-tentativa-de-recupera-lo/>.

na recuperação dos impactos provocados pelo “acidente”.²⁷ Essa parece ser uma tendência dominante, como bem observou Anderson et al. (2008, p. 99):

Los ciclos tradicionales de financiamiento y las estructuras administrativas de la investigación favorecen regularmente indicadores de éxito de corto plazo y específicos a la disciplina. Por ejemplo, índices de citación como ISI69, no reflejan el valor ni recompensan adecuadamente trabajos interdisciplinarios a largo plazo cuyos beneficios se acumulan en el tiempo y no pueden ser detectados únicamente con tales índices disciplinarios.

É preciso que se reafirme sempre que o evento de 5 de novembro de 2015, desencadeador da sucessão de outros eventos desastrosos, não foi acidente nem uma ocorrência natural. Foi um desastre tecnológico (no qual existem responsabilidades de natureza criminal)²⁸, tendo em vista que resultou de decisões de engenharia, gestão técnica e política sobre a disposição dos rejeitos, aumentados significativamente em função da adoção de tecnologias mais poderosas; das respostas ao regime de mercado; e das práticas corporativas (POEMAS, 2015, p. 5-7). Esses fatores foram intensificadores dos riscos socioambientais e sociotécnicos inerentes à atividade mineradora.

A economia minerária industrial do ferro depende de dispositivos capazes de extrair, processar, transportar e embarcar essa *commodity*. Dessa forma, o complexo minerário é uma totalidade constituída pelos sistemas tecnológicos, sistemas ambientais, sistemas normativos e governança (privada e pública). O conceito de *envirotechnical system* (PRITCHARD, 2011) se presta para se entender o complexo minerário como essa totalidade, pois a autora denomina assim os sistemas capazes de organizar o espaço pela combinação e articulação operativa de artefatos, práticas, normas, instituições, pessoas, geologias e ecologias.²⁹

²⁷Aqui se retorna a uma controvérsia que se instalou no primeiro ano após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana. Empresas e seus partidários teimavam em designar o desastre como acidente e os atingidos nomeavam o evento como crime. Interessante que na UFES se encontra pesquisadores partidários da nomeação de acidente.

²⁸A expressão desastre tecnológico ambiental se refere aos processos disruptivos em sistemas sociotécnicos desencadeados por causa de fatores humanos: opções de atores determinados, quase sempre mediadas por escolhas técnicas e por lógicas empresariais associadas a conveniências políticas; prevalência de determinados regimes em detrimento de outros: lucratividade no lugar de segurança, arrecadação tributária no lugar de fiscalização, tecnologias impactantes no lugar de apropriadas, entre outros.

²⁹Nas palavras de Sarah Pritchard (2011, p. 19): “Eu escolhi ‘enviro’ (forma abreviada para ‘environment’) no lugar de ‘eco (de ‘ecossistema’) por dois motivos. ‘Environment’ tem um sentido mais amplo, não se limitando aos recursos ‘naturais’. Como sugere este ponto, uso o ambiente para enfatizar que as sociedades humanas moldam a grande maioria dos ecossistemas, direta ou indiretamente. (...) O uso do termo ‘technical’ (abreviatura para ‘technological’) segue os recentes estudos sócio-históricos sobre tecnologia, que postula uma definição abrangente: conhecimento, habilidades e ferramentas de marketing ou ação - uma definição mais alinhada ao pensamento francês, que combina conhecimento técnico, práticas e objetos, do que à noção de tecnologia anglo-americana, centrada em artefatos.” (Tradução livre do original.)

O complexo minerário (território da mineração) se constituiu por sobreposição discreta aos múltiplos territórios, sem considerar as suas territorialidades próprias e historicamente constituídas, porém sem se deixar perceber para além das áreas mais próximas aos centros de extração. Nessas áreas, as relações com os municípios e comunidades eram assistenciais e, ao mesmo tempo, de silenciamento dos poucos focos de contestação. Com base no conceito de *envirotechnical system* e considerando o que foi dito acima, pode se afirmar que o desastre substituiu de forma abrupta a discricção, com a qual o território da mineração existiu historicamente, pela presença insidiosa e diária. O resultado do rompimento é a imediata conexão desastrosa dos múltiplos territórios ao território da mineração. Desastrosa em dois sentidos: primeiro pela afetação negativa que o desastre minerário causa nos habitats, hábitos e coabitantes desses múltiplos territórios; segundo, porque a resposta do complexo minerário tem sido estender sua ação a todos esses territórios, aumentando o controle e as relações de dependência.

Nesse sentido, o desastre da Vale/BHP/Samarco deve ser entendido como totalidade, isto é, um evento cuja presença possui extensão, duração, incidência, escala e regime. A maior parte das pesquisas e ações em curso diz respeito às consequências do desastre, num processo gradativo de naturalização do mesmo e esquecimento sobre sua origem e fatores motivadores, que o caracterizam como desastre tecnológico e denuncia a “nova cultura do capitalismo”, na qual investidores dotados de um poder que não tinham no passado exigem resultados de curto prazo e, para isso, exercem enorme pressão sobre as empresas (SENNETT, 2006, p. 43-44).

Essa questão que está na origem do desastre da Vale/BHP/Samarco caminhava rápido para o esquecimento, quando o desastre da Vale, em Brumadinho, trouxe novamente à pauta. Entretanto, mesmo assim não se abriu uma discussão a respeito nem se verifica muita pesquisa e ações nesse campo das causas. É prioritário estudar o fato gerador, que não é único, mas uma combinação de variáveis em diferentes dimensões: econômica, administrativa, jurídica, sociocultural, política e técnica.

Desastre tecnológico é um fenômeno disruptivo no *envirotechnical system* que desarticula operativamente artefatos, práticas, normas, instituições, pessoas e ecologias. Portanto, desastres tecnológicos não se sujeitam a abordagens de causa e consequência, pois são conjuntos de fenômenos complexos colocados em movimentos por determinada situação extrema, desencadeada pela combinação de diferentes variáveis. É possível decompor o desastre para fins de análise: recortar, delimitar e isolar, porém não se pode perder de vista que esse é uma unidade e, como tal, não é a simples soma de suas partes.

Para o nascimento do desastre, os múltiplos fatores acoplados se configuram como um processo social causador que precisa ser esmiuçado, tendo em vista a constatação do enorme potencial destrutivo sobre humanos e não-humanos que a disrupção no interior do *envirotechnical system* minerário pode provocar. O ponto inicial da força disruptiva é o evento gerador de muitos outros eventos em cadeia ou isolados, que extravasam os limites do complexo minerário e da própria economia minerária, atingindo direta e indiretamente coabitantes, seus habitats e hábitos de fora do território minerário. Assim, esse território termina por englobar em si todos os múltiplos territórios pré-existentes a eles e que estavam discretamente em contato com ele.

O desastre também se desdobra em diferentes escalas (local, regional, nacional e global), conforme a dimensão social considerada (político-tributária; econômica, social, cultural e jurídica) e a dimensão ecológica, ao ponto de se poder afirmar ser o desastre uma manifestação do Antropoceno localmente.³⁰ Na dimensão local e regional se dá uma confluência de temporalidades que potencializa o desastre e reduz as condições de sucesso no seu enfrentamento.³¹ Isso ocorre porque os eventos associados a disrupção do *envirotechnical system* minerário se associam aos eventos desastrosos anteriores (surgidos na média e longa duração), tais como o uso e ocupação de solo; assoreamento dos cursos d'água; supressão da fauna e flora; restrição da fauna e flora nativa às poucas áreas onde funcionam parques naturais e áreas de proteção, entre outros.

O modo como determinada sociedade lida com o desastre tecnológico na sua origem e na calamidade que se desdobra da disrupção inicial é condicionado social e culturalmente pela forma como as instituições e o poder funcionam nas relações sociais e nas relações com o espaço. A dimensão sociopolítica é um dos enfrentamentos mais complicados, tanto por parte dos atores atingidos, da sociedade como um todo e dos atores engajados, como por parte dos pesquisadores, grupo no qual

³⁰Paul Crutzen (Nobel de Química de 1995) reforçou a teoria do biólogo Eugene Stoermer de que o planeta entrou em nova era geológica denominada de Antropoceno. Essa substitui o Holoceno, no qual a Terra se encontrava há cerca de 10.000 anos, segundo os geólogos. Não é uma simples mudança de número, mas a constatação de que a atividade humana passou a interferir e moldar o planeta, particularmente com a “grande aceleração”, a partir de 1950. O Antropoceno apresenta indicadores catastróficos, com destaque para o aquecimento global. Para uma visão breve de como o Antropoceno pode ser estudado localmente, recomenda-se ver o projeto “Mississippi. An Anthropocene River. A research project on the novel epistemic, aesthetic, and educational challenges of the Anthropocene: 2018–2019”. Esse projeto integra o “Ano da Amizade Alemã-Americana”, como iniciativa da Haus der Kulturen der Welt, o Instituto Max Planck de História da Ciência, associado à Universidade de Drexel (Filadélfia) e Universidade da Califórnia Irvine (UCI). Veja uma experiência de trabalho de campo como Antropoceno cotidiano: Fortun, Kim e Knowles. Tactics for quotidian anthropocenes. A Field Campus Report. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333677621_Tactics_for_Quotidian_Anthropocenes_A_Field_Campus_Report.

³¹Relatório Temático produzido pelo Painel do Rio Doce/UICN (Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão: o caminho para uma mitigação sustentável e resiliente) chamam muito a atenção para esse ponto, ao afirmar que se a bacia hidrográfica não for considerada no seu todo nem se levar em conta os processos cumulativos de degradação, ao longo do tempo, podem ser nulos os esforços de restauração, remediação, ou compensação, impedindo que os programas atinjam suas metas (SÁNCHEZ et al., 2018, p. 20-21).

se encontra desde os que se engajam completamente aos que procuram evitar refletir a respeito. Esse enfrentamento também é condicionado pelo tecido institucional, capital social e capital cultural disponíveis nos múltiplos territórios sobrepostos pelo território da mineração, bem como pela questão política nacional, estadual e municipal.

Daí a negligência das Ciências Humanas e Sociais ser um problema substantivo, pois desastre e sentimento de incerteza são fenômenos marcados por relações de poder, não dissociadas da maneira como funciona determinada sociedade, suas instituições e a territorialidade que a molda (sendo o próprio território uma instituição), bem como dependente de como os atores sociais e as pessoas em geral imaginam e se relacionam com o espaço e os ecossistemas.

4 AS CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS NO ENFRENTAMENTO DOS DESASTRES MINERÁRIOS.

Os componentes econômicos, sociais, culturais, político-jurídicos, éticos, ideológicos e de poder que envolvem os desastres requerem um papel ativo dos estudos humanísticos e sociais, especialmente no viés interdisciplinar. Essas duas grandes áreas do conhecimento devem ser convocadas, juntamente com a Filosofia, pois como afirma Frodeman (2008, p. 110): “Por cierto, nuestros problemas ambientales requieren un mínimo de filosofía, pero mucha más de la que actualmente obtienen”. O filósofo se refere a necessidade de se desdisciplinar o conhecimento, num processo que demanda o campo da filosofia pelo auxílio na construção e compreensão dos conceitos que podem alinhar uma efetiva troca interdisciplinar e ensinar a lidar com os desastres na sua totalidade.

Segundo Frodeman (2008, p. 106, 109), uma “filosofia desdisciplinar” teria três tarefas a cumprir: descrever os aspectos filosóficos dos problemas socioambientais (de natureza ética, estética, epistemológica, ontológica, metafísica e teológica); oferecer uma visão de síntese das diferentes disciplinas e das relações entre elas, dando um sentido de todo, tal como existe entre hidrologia, química, geologia, políticas públicas, economia, no sentido de fornecer indicativos de como cooperar para resolver problemas; por último, “los filósofos deberían buscar escenarios institucionales y lugares en el mundo real para desarrollar los primeros dos puntos”. Ele chega a falar da necessidade da incorporação do filósofo às instituições encarregadas da ação ou fiscalização, uma espécie de “filósofo-burocrata”, porque estaria inserido nas estruturas institucionais, tais como empresa de água e saneamento, agências ambientais, escritórios regionais de serviços

públicos diversos relacionados ao meio ambiente e, particularmente nas esferas nas quais as decisões políticas são tomadas e as políticas são estabelecidas.

A importância das Ciências Humanas e Sociais, com auxílio da Filosofia, se prestaria para contextualizar, interpretar, decidir e agir sobre os desastres. Isso é ainda mais importante se considerarmos o que afirma Button (2010) sobre os efeitos da incerteza e o quadro pós-traumático que decorre dos múltiplos eventos desencadeados pelos desastres. O assombro que abate sobre as pessoas atingidas e o sentimento de incerteza que passa a imperar são componentes negligenciados, como se os impactos fossem somente materiais e objetivos. O desastre também altera a percepção individual e coletiva sobre a natureza, ambiente e paisagem, estabelecendo o corte entre um antes e depois. Esse fenômeno se manifesta integralmente no desastre da Vale/BHP/Samarco, como indica as matérias jornalísticas sobre os dois anos, pois o segundo assunto mais abordado foram os problemas de depressão vividos pelas pessoas das comunidades atingidas.³²

A multidimensionalidade existencial de cada pessoa e de sua coletividade territorial e as dimensões subjetivas e simbólicas dos territórios, em última instância, é o cerne afetado pelo desastre. A violação do sentimento de pertencimento das pessoas e coletividades territoriais precisa ser considerada na reflexão, bem como as práticas políticas prevalecentes, particularmente se afetam a construção da cidadania e participação efetiva dos atingidos (REIGOTA, 2001). Não é uma questão de se restringir ao social, porém o inverso não deixa de ser um reducionismo, ou seja, colocar a preocupação sobre a dimensão econômica, que a separa da cultura e da subjetividade, tratando-a como objeto; ou colocar a ênfase no ambiente, como se esse fosse algo separado do humano (sujeito), reduzindo o biótico e abiótico a objeto.

Outra questão que se pretende destacar aqui pode ser formulada como premissa: a interação humano-ambiente que cria os múltiplos territórios não se restringe ao campo utilitário do uso dos recursos ou da simples localização dos assentamentos e empreendimentos humanos, mas está presente sempre uma relação íntima, subjetiva e afetiva com o espaço. A percepção consciente e a afetividade são componentes fundamentais a serem considerados na relação entre o humano e o ambiente,

³²Como exemplo, veja a manchete do jornal mineiro “O Tempo”, de 5/11/2017: “Após tragédia, tentativas de suicídio têm salto de 67%”. A reportagem associa o aumento do número de suicídio ao crescimento de 300% do número de casos de depressão e ao preconceito que os atingidos enfrentam. Destaca depoimentos, como do morador de Bento Rodrigues, que vive em Mariana: “Antônio Augusto não conseguiu se acostumar com o apartamento de 60 m². ‘A vontade era de ficar chorando, chorando, chorando... Qualquer coisinha era motivo’, diz com a caixa de antidepressivo em mãos”. Disponível em: <http://www.otempo.com.br/cidades/ap%C3%B3s-trag%C3%A9dia-tentativas-de-suic%C3%ADdio-t%C3%AAm-salto-de-67-1.1539051>.

pois essa relação é mediada pelas sensações dadas pelos órgãos sensoriais e, principalmente, pelo significado atribuído. A percepção ambiental inclui a percepção sensorial, afetiva e cognição. É o conhecimento e o entendimento que os seres humanos possuem do meio em que vivem, com a influência dos fatores sociais e culturais (WHYTE, 1977).

Como algo sempre inerente a toda atividade humana, os mecanismos da percepção consciente são guiados pelas pré-noções, sentimentos, valores e crenças espirituais fortemente determinados pelo *Zeitgeist* (tempo em que se vive; atmosfera/clima sociocultural prevalecente). Na relação do ser humano com o ambiente, considerar os elementos psicológicos e afetivos pode permitir uma melhor compreensão das interações e construções mentais existentes, bem como avaliar com mais objetividade os impactos simbólicos provocados pelos desastres, as perdas ocorridas e a vivência pós-traumática.

O conceito de imagem pública, entendido como a representação mental que os habitantes fazem de suas cidades, pode ser usado para se compreender os impactos provocados por desastres, ao afetarem a percepção e criarem uma imagem do antes e do depois (LYNCH, 1988). O sentimento de perda provocado pelo desastre faz emergir a consciência do vivido territorial e, dessa forma, esse emerge nas narrativas dos residentes, que podem, então, expressar seu vínculo produtivo e existencial com seu território e as numerosas relações que mantêm com as partes que compõem seus lugares existenciais, sempre como imagem impregnada de significações ou ressignificações.

Em Tuan (1983), encontram-se os conceitos de topofilia, topofobia e lugares valorizados, que oferecem chaves de leituras significativas para se abordar as questões aqui propostas. O autor destaca a importância da noção de lugar para a afetividade humana, contrastando com a noção de espaço que se apresenta como indiferenciado, aberto e em movimento. Lugar é pausa e segurança. Os seres humanos dependem de ambos porque suas vidas se processam num movimento que exige segurança e, ao mesmo tempo, liberdade de movimento. O habitat humano é lugar de sentido criado pela relação de intimidade que se instaura, ou seja, por meio da dimensão afetiva que lhe atribui gradativamente valor e significado. Portanto, no lugar estão indissociavelmente interligados habitat, hábito e coabitantes.

Se o lugar se origina do sentimento de topofilia – o amor humano ao lugar, o desastre tecnológico pode desencadear um sentimento de topofobia – aversão humana ao lugar. O sentimento de perda do lugar, que assim se torna espaço: o desconhecido, o aberto e o incerto, que pode levar à aversão, aquilo que produz a imagem de medo. Daí o conceito de

paisagem do medo (TUAN, 2005, p. 7) se apresenta útil para avaliar o assombro em que vivem as populações ao longo do rio Doce depois do desastre da Vale/BHP/Samarco: “medos são experimentados por indivíduos e, nesse sentido, são subjetivos; alguns, no entanto, são, sem dúvida, produzidos por um meio ambiente ameaçador...”. Ligados ao medo estão presentes a ansiedade e o sinal de alarme, que podem levar a vontade de migrar/refugiar. Logo, os aspectos emocionais e subjetivos interferem de forma direta, particularmente a imaginação, pois essa faz aumentar “imensuravelmente os tipos e a intensidade de medo no mundo dos homens” (TUAN, 2005, p. 11). Para o autor a paisagem do medo “diz respeito tanto aos estados psicológicos como ao meio ambiente real” (TUAN, 2005, p. 12).

O desastre da Vale/BHP/Samarco é um desastre tecnológico que criou uma paisagem do medo, um medo da água persistente, principalmente o medo da doença. Como “em nenhuma parte do mundo as pessoas aceitam a doença e a morte como uma coisa perfeitamente natural”; como todos nós temos na integridade do corpo “o alicerce da nossa sensação de ordem e completude” (TUAN, 2005, p. 139), o medo do corpo adoecer se apresenta igualmente como o adoecer do mundo, no qual desaparece a qualidade de vida.

Os estudos sobre desastres têm obtido resultados surpreendentes a partir do referencial teórico das Ciências Humanas e Sociais, com ajuda da Filosofia, especialmente os estudos com as populações atingidas que vivenciaram o trauma do primeiro impacto do desastre e continuam a vivenciar as incertezas pós-traumáticas. Não mobilizar as Ciências Humanas e Sociais é correr o risco de se perder na fragmentação dos estudos científicos; de anular a totalidade e facilitar que as partes sucumbam às relações de poder; de omitir dimensões fundamentais da interação sistêmica entre humano e não-humano, entre sociedade e ambiente; é desconhecer que se trata do impacto sobre coabitantes, que tem seus habitats e hábitos afetados direta ou indiretamente.

O filósofo Baird Callicott (2017), que se dedica à filosofia ambiental e ética, fundamenta sua reflexão no pressuposto de que a “diversidade cultural é um reflexo e depende da diversidade biológica”. As ações antrópicas homogeneizadoras da paisagem igualmente reduzem a diversidade cultural, homogeneizando-a. Esse processo se inicia com a implantação dos dispositivos que atendem a lógica externa da economia global, por sobreposição aos múltiplos territórios e ecossistemas pré-existentes. Mais do que a implantação do “moderno paradigma ocidental, métodos industriais, agrícolas e florestais, modos mecânicos de transporte e distribuição” etc., se introduz uma nova visão de mundo que se torna hegemônica alterando os

hábitos e estilos pré-existentes. Assim, gradativamente, ocorre a “erosão das crenças e valores” locais e, concomitantemente, se dá a “extirpação e extinção de espécies nativas”.

O filósofo se apoia nos estudos que demonstram a correlação entre a conservação das comunidades bióticas locais e a presença de ações e atitudes de resistência das comunidades locais “às pressões externas de desenvolvimento”. Na citação que segue, apesar de longa, podemos compreender a importância da ética, na forma que é colocada por Baird Callicott (2017, p. 69), para os estudos que pretendem superar visões dicotômicas entre as ciências.

De esta manera, se puede imaginar una sola ética ambiental intercultural, basada en la ecología y la nueva física y expresada en la lengua franca cognitiva de la ciencia contemporánea. También se puede imaginar el renacer de una multiplicidad de éticas ambientales tradicionales, que estén en consonancia con una ética ambiental internacional y fundamentada científicamente, y que ayuden a articularla. Así, podemos tener una cosmovisión y una ética ambiental asociada que corresponda a la realidad contemporánea de que habitamos un mismo planeta, que pertenecemos a una especie biológica, y que nuestra crisis ambiental cada vez más profunda es global y nos afecta a todos. También podemos tener una pluralidad de cosmovisiones tradicionales revividas, con sus éticas ambientales asociadas que correspondan a la realidad histórica de que nuestra especie incluye a muchos pueblos que habitan en muchas biorregiones diversas, que son aprehendidas por muchos y diversos lentes culturales. Pero esta unidad y diversidad, lo uno y lo múltiple, no están en discordia. Cada una de las cosmovisiones de mundo y sus éticas ambientales asociadas pueden ser una faceta de una consciencia ambiental global emergente, expresada en la lengua vernácula de una tradición cultural local particular.

Neste ponto é importante introduzir o conceito de ética biocultural, que parte da premissa de que “todos os seres vivos têm um bem-estar e, portanto, são moralmente relevantes”. Isso exige considerar igualmente e estabelecer o mesmo peso para perdas sofridas por seres humanos e por seres não humanos, sem distinção de qualquer natureza: ambos devem ser considerados conjuntamente. É preciso ter claro que se trata de uma outra ética e não apenas uma parte do que se considera como ética no ocidente. Como afirma Rozzi (2013, p. 9-10): “Não é simplesmente uma extensão da ética utilitarista ou deontológica incluir animais, plantas e outros seres vivos na comunidade de seres moralmente relevantes, mas é uma ética que

envolve relações interespecíficas”. Na perspectiva da ética biocultural uma abordagem coerente do desastre minerário precisa partir da premissa da indissociabilidade das perdas humanas e não-humanas causadas, pois ambos são criaturas que coabitam espaços comuns e, igualmente, tem seus habitats e hábitos afetados. Portanto, na perspectiva da ética biocultural o ambiente traz implícito consigo o humano, e vice-versa.

Finalmente, é preciso recorrer a História Ambiental para ampliarmos o olhar e a maneira de ver o desastre, no qual o rompimento da barragem é a ponta de um iceberg que denuncia uma realidade mais complexa e profunda, cuja temporalidade se situa para além do desastre ou, até mesmo, é anterior à introdução da mineração industrial e prossegue a partir dela. A realidade socioambiental da bacia do rio Doce foi diagnosticada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), em 2014, como a que se encontra em pior situação no estado de Minas Gerais. A manchete do jornal Estado de Minas foi expressiva: “Rio Doce, que começa a correr quase morto, tem a bacia mais degradada de Minas”.³³ Portanto, processos sociais de ocupação da bacia do rio Doce acumulou no tempo situações que resultaram num quadro de desastre socioambiental ao qual se associou o desastre de 5 de novembro de 2015. A diferença está na duração: entre fatores cumulativos ao longo de décadas e a violência dos impactos em curto prazo provocados pelo rompimento da barragem de mineração. A História nos ajuda a incluir o desastre minerário numa duração mais longa, na qual tem papel crucial a entrada dos grandes investimentos de capital, particularmente na mineração, siderurgia e celulose.

Podemos finalizar, a partir da ótica da História Ambiental, reafirmando a importância das Ciências Humanas e Sociais, com o devido auxílio da Filosofia, para o enfrentamento dos desastres tecnológicos. Afinal, os desastres tecnológicos são processos sociais marcados de forma indelével por relações de poder, abrangendo múltiplas dimensões da realidade (material, técnica, econômica, social, política, cultural e subjetiva), com distintas durações, amplitudes, escalas, regimes e incidências. Portanto, precisam ser compreendidos na indissociabilidade e interdisciplinaridade da relação entre cultura (humano) e ambiente (biótico e abiótico).

³³Matéria postada no site do jornal Estado de Minas (em.com.br), em 8/4/2014. Cf. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/especiais/nascentes/2014/04/08/noticias-internas-nascentes,516596/rio-doce-que-comeca-a-correr-quase-morto-tem-a-bacia-mais-degradada.shtml>.

5 REFERÊNCIAS

- ANDERSON, C. B. et al. Integrando la ciencia y la sociedad a través de la investigación socio-ecológica de largo plazo. **Environmental Ethics**, Denton, v. 30, n. S3, p. 99, outono 2008.
- BUTTON, G. **Disaster culture**: Knowledge and uncertainty in the wake of human and environmental catastrophe. Walnut Creek: Left Coast, 2010.
- CALLICOTT, J. B. **Cosmovisiones de la tierra**: un estudio multicultural de éticas ecológicas desde la cuenca del Mediterráneo hasta el desierto australiano. México: Plaza y Valdés, 2017.
- FRODEMAN, R. Filosofia no confinada: pensamento ambiental al fin del mundo. In. ROZZI, R.; ARMESTO, J.; FRODEMAN, R. Integrating ecological sciences and environmental ethics into biocultural conservation in South American Temperate Sub-Antarctic Ecosystems. **Environmental Ethics**, Denton, v. 30, n. 3S, p. 101-114, outono de 2008.
- LYNCH, K. **A Imagem da cidade**. Lisboa: Edições 70, 1988.
- POEMAS. Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG). 2015. Disponível em: <http://www.ufff.br/poemas/files/2014/07/PoEMAS-2015-Antes-fosse-mais-leve-a-carga-vers%C3%A3o-final.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2018.*
- PRITCHARD, S. B. **Confluence**: the nature of technology and the remaking of the Rhône. Cambridge: Harvard University, 2011.
- REIGOTA, M. *O que é educação ambiental*. São Paulo: Brasiliense, 2001.
- RODRIGUES, A. S. L. *Uma visão holística sobre os ecossistemas fluviais*. **Revista de Biologia**, São Paulo, v. 2, p. 8-11, jun. 2009.
- SÁNCHEZ, L. E. et al. **Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão**: o caminho para uma mitigação sustentável e resiliente. Gland, Suíça: UICN, 2018. (Relatório Temático nº 1 do Painel do Rio Doce).

SENNETT, R. **A cultura do novo capitalismo**. Rio de Janeiro: Record, 2006.

TUAN, Y. F. **Espaço e lugar**: a perspectiva da experiência. São Paulo: DIFEL, 1983.

TUAN, Y. F. **Paisagem do medo**. São Paulo: Ed. Unesp, 2005.

WHYTE, A. V. T. **Guidelines for field studies in environmental perception**. Paris: Unesco, 1977. (Technical Notes, 5).

SEÇÃO 4

CIÊNCIA E SOCIEDADE



CIÊNCIA CIDADÃ: APROXIMANDO PESSOAS, TRANSFORMANDO REALIDADES

Carolina Schneider Comandulli¹
Eduardo Roberto Alexandrino²

INTRODUÇÃO

Ciência cidadã é o processo pelo qual

o público participa voluntariamente na produção científica, abordando problemas concretos, podendo incluir sua participação na formulação de perguntas de pesquisa, condução de experimentos científicos, coleta e análise de dados, interpretação de resultados, novas descobertas, desenvolvimento de tecnologias e aplicações, e resolução de problemas complexos (HOLDREN, 2015, tradução livre).

O termo ciência cidadã passou a ser utilizado como tal somente no final dos anos 80 (HAKLAY, 2015), mas a prática em si tem uma tradição anterior, com um histórico de longa data, por exemplo, na observação de pássaros por amadores (BONNEY, 1996, BONNEY et al., 2009). No Brasil, o engajamento de atores da comunidade não-científica na produção de conhecimento ainda é incipiente, mas vem atraindo crescente interesse de pesquisadores.

Com o desenvolvimento e popularização de tecnologias de comunicação – como computadores, *tablets*, *smartphones* e a internet - o potencial da prática da ciência cidadã tem se ampliado. Atualmente, existem diversas plataformas virtuais com projetos de ciência cidadã que podem ser acessadas por qualquer um e que permitem o engajamento em projetos de diversas

¹University College London

²Instituto Nacional da Mata Atlântica, Universidade de São Paulo

naturezas, desde pesquisas no campo da astronomia e da biologia, até investigações que requerem monitoramento ambiental. Internacionalmente, plataformas muito conhecidas são, por exemplo a Zooniverse³ e a eBird⁴. Além disso, projetos de ciência cidadã já fazem parte do Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira – SiBBR⁵ e podem ser acessados pelo público em geral.

As vantagens de se realizar um trabalho de pesquisa com o apoio de cidadãos são muitas, bem como há desafios que devem ser considerados ao se adotar a prática (ALEXANDRINO et al., 2019a; HECKER et al., 2018). Dentre as vantagens, estão uma maior produtividade na pesquisa, a possibilidade de se abordar problemas política e socialmente relevantes, a facilidade de se estender o impacto e importância da pesquisa e de contar com membros da sociedade como multiplicadores de um determinado conhecimento. Os desafios estão relacionados com as eventuais dificuldades para se estabelecer relações de confiança entre pesquisadores e cidadãos e a complexidade de se obter uma boa qualidade na comunicação entre as partes (ALEXANDRINO et al., 2019a). Além disso, os resultados advindos de pesquisas de ciência cidadã ainda podem esbarrar nas limitações para se integrar, efetivamente, ciência, sociedade e políticas públicas – o que é uma meta desejável nesse tipo de abordagem científica, mas nem sempre realizável, a depender de cada país e de cada contexto político.

2 NÍVEIS DE ENVOLVIMENTO: DO ‘CROWDSOURCING’ À CIÊNCIA CIDADÃ EXTREMA

A ciência cidadã pode ser aplicada de diferentes formas e em diferentes contextos de pesquisa. Um de seus principais aspectos está relacionado ao grau de participação e envolvimento dos cidadãos nos projetos científicos. Haklay (2013) definiu quatro níveis de engajamento dos atores sociais.

O primeiro nível, com menor grau de participação, é aquele em que os cidadãos participam como coletores de dados, sem a necessidade de um conhecimento do projeto de pesquisa, nem o envolvimento em outras etapas do projeto. Nesse nível, pode-se ter a participação de milhares de pessoas, que coletam informações e as enviam a uma base de dados comum

³Disponível em: <https://www.zooniverse.org/>

⁴Disponível em: <https://ebird.org/home>

⁵Disponível em: <http://www.sibbr.gov.br/cienciacidadada/>

(e.g. INATURALIST, 2019; WIKIAVES, 2019). Por essa característica, este nível é conhecido como ‘*crowdsourcing*’, palavra de origem inglesa que em português designa algo como ‘fonte coletiva’. O segundo nível é chamado ‘*inteligência distribuída*’ (*Distributed intelligence*), em que os cidadãos recebem treinamento para realizar a interpretação básica de dados e contribuir com o levantamento de informações de uma pesquisa (e.g., *EarthWatch Institute*). O terceiro é a ‘*ciência participativa*’ (*Participatory science*), em que os cidadãos se envolvem na proposição da problemática e na coleta de dados, mas precisam contar com especialistas para a etapa de análise e interpretação das informações, comum em casos de pesquisa sobre justiça ambiental (por exemplo, monitoramento da qualidade do ar, da água e do solo a partir de demandas locais). Finalmente, o nível de maior engajamento é a ‘*ciência colaborativa*’, ou ‘*ciência cidadã extrema*’ (Extreme Citizen Science – ExCiteS), no qual os cidadãos estão envolvidos em todas as etapas de pesquisa, desde a formulação do projeto e coleta de dados até sua interpretação e discussão.

O conceito de Ciência Cidadã Extrema⁶ originou-se a partir de um grupo de pesquisa interdisciplinar criado em 2011, na University College London, Reino Unido, com a finalidade de avançar na investigação das práticas da ciência cidadã, assumindo a seguinte identidade:

O grupo denomina seu trabalho de “extremo” porque procura ampliar os limites da ciência cidadã através do desenvolvimento e implementação de metodologias e ferramentas inovadoras. A ideia é permitir que qualquer comunidade, em qualquer lugar do mundo – desde grupos marginalizados que vivem nas periferias de áreas urbanas até grupos de caçadores e coletores da floresta amazônica –, comece um projeto de ciência cidadã para lidar com suas próprias questões” (COMANDULLI et al., 2016, p. 36).

A abordagem do ExCiteS busca suplantar os obstáculos identificados nas demais abordagens participativas para tornar as iniciativas verdadeiramente inclusivas, com ênfase na busca de soluções para problemas enfrentados localmente. Procura também superar as barreiras de comunicação entre as comunidades locais e os atores externos por meio de uma metodologia específica que compreende:

⁶Disponível em: <https://www.geog.ucl.ac.uk/research/research-centres/excites>.

- a) Um processo detalhado de **consentimento livre, prévio e informado** (CLPI) “a fim de garantir que as atividades do projeto e suas prováveis consequências sejam plenamente entendidas pela maioria dos participantes da comunidade antes que sejam implementadas” (LEWIS, 2012, p. 155). O CLPI envolve informar e discutir com os participantes os potenciais benefícios, objetivos e riscos dos projetos (e como lidar com eles), a fim de se obter o consentimento da comunidade para sua implementação. Neste processo, as formas de tomada de decisão e o tempo das comunidades para tal deve ser respeitado.
- b) O **desenvolvimento participativo de software**, no qual as comunidades locais colaboram com a equipe do ExCiteS e outros atores do projeto no planejamento e criação de ferramentas de coleta de dados baseados na plataforma adaptável de software “Sapelli”, descrita abaixo.
- c) A construção de **protocolos comunitários** (PCs) em relação ao projeto em si e aos atores envolvidos que tenham responsabilidades na iniciativa (p. ex. ONGs, empresas, governos). A ideia é “fortalecer a organização política e a participação das comunidades” (LEWIS, 2012, p. 155), com a definição de quais recursos estarão em jogo e qual será a sua destinação, quais os papéis e as responsabilidades de cada um, quem terá acesso às informações levantadas e como elas serão utilizadas etc.

Tanto o CLPI, quanto o software e os PCs devem ser flexíveis o bastante para serem alterados e adaptados caso seja necessário durante o projeto. O consentimento e os protocolos devem ser registrados, idealmente, em um formato acessível a todas as partes (p. ex. em um vídeo). Essas estratégias são uma forma de promover o consenso entre os atores e de garantir que as comunidades participantes entendam os potenciais riscos e benefícios do projeto. Os protocolos também oferecem um formato para o desenvolvimento de acordos claros sobre os papéis e responsabilidades de cada um dos atores, assegurando o respeito aos processos de organização e de tomada de decisões das comunidades.

Uma das principais ferramentas que está em desenvolvimento para facilitar esse processo é o software Sapelli⁷ – uma plataforma de coleta e compartilhamento de dados projetada para usuários não letrados ou não alfabetizados, que possuem pouco ou nenhum conhecimento prévio ou experiência no uso de tecnologias digitais de comunicação e informação. Esta tecnologia pretende ser adaptável a contextos específicos e ser resistente ao uso tanto em ambientes “extremos” – como

⁷Disponível em: <http://www.sapelli.org/about/>.

florestas tropicais ou regiões polares – quanto em áreas urbanas. O software Sapelli busca superar as limitações de acesso que usuários provenientes de sociedades sem escrita ou não alfabetizados enfrentam no uso de ferramentas tecnológicas digitais, como o entendimento de números, a habilidade para ler mapas, a familiaridade com a tecnologia digital, a falta de conectividade de rede e a falta de eletricidade.

As ferramentas e metodologias da abordagem ExCiteS, considerando seus pilares metodológico e tecnológico, permite a consolidação de uma rede de parceiros trabalhando juntos, e busca o equilíbrio nas relações de poder entre os diferentes atores ao facilitar às comunidades a representação de seus posicionamentos frente aos demais. Organizações de base comunitária, institutos de pesquisa, organizações governamentais e não-governamentais podem trabalhar em parceria em um esforço de produção colaborativa de conhecimento.

3 CIÊNCIA CIDADÃ NA PRÁTICA: O EXEMPLO DO PROJETO “EU VI UMA AVE USANDO PULSEIRAS?!” E AS LIÇÕES APRENDIDAS

A aplicação de um projeto de ciência cidadã requer extremo cuidado, mesmo quando todos os fatores iniciais parecem indicar grandes chances de prosperidade. Um caso que enfrentou este cenário é o projeto “Eu vi uma ave usando pulseiras!?”, um projeto de abrangência local idealizado como crowdsourcing que obteve êxito somente após ajustes de erros detectados no seu início.

Em 2016, este projeto foi iniciado na região rural de Piracicaba, Rio Claro e Corumbataí, interior do estado de São Paulo, cujo objetivo era monitorar aves marcadas com anilhas coloridas (cada ave individualmente recebia uma sequência própria de até três anilhas) em pequenos remanescentes florestais contando com a participação de praticantes de observação de aves. Como este público era bastante numeroso nesta região do estado (ALEXANDRINO et al., 2018) esperava-se um grande engajamento. Embora o projeto tenha recebido a inscrição de mais de 150 voluntários capacitados e residentes nas áreas próximas das áreas de estudo, em um ano de projeto apenas 10 voluntários foram a campo, e apenas uma vez. Essa ínfima participação gerou pouquíssimos dados almejados pelos pesquisadores (isto é, dados sobre a movimentação das aves dentro e no entorno dos remanescentes florestais), prejudicando o andamento das investigações que dependiam destes dados

(ALEXANDRINO et al., 2019a). Numa autocrítica, os autores do projeto reconheceram que embora o mesmo chamasse a atenção do público alvo, o local onde o projeto era executado não supria as expectativas dos observadores. Os remanescentes florestais eram degradados, não possuíam uma ampla diversidade de aves, e visualizar as aves nesse ambiente era bastante trabalhoso. Tudo isso dificultava a captura de boas fotografias de aves, algo valorizado pelos observadores (SLATER et al., 2019). Além disso, não houve a preocupação por parte dos pesquisadores em estabelecer um canal de entrega dos registros feitos pelos voluntários que também permitisse que os mesmos visualizassem de forma rápida a importância dos dados que eles mesmos coletavam, como, por exemplo, saber a distância que a ave observada estava do local onde ela foi capturada e marcada, ou a que distância a ave estava do último registro feito por outro voluntário. Portanto, não se estabeleceu uma moeda de troca com os voluntários, fazendo com que eles se sentissem fora da investigação científica proposta. Essas falhas prejudicaram uma propagação positiva sobre o projeto entre os voluntários inscritos e ocasionaram o seu fracasso inicial (ALEXANDRINO et al., 2019a).

Com as lições aprendidas nesta primeira tentativa, este mesmo projeto foi aplicado em 2018 numa área urbana de Piracicaba, no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Neste caso, uma seriema (*Cariama cristata*) foi a espécie escolhida como alvo de um monitoramento participativo. A seriema é uma ave terrestre de grande porte, facilmente reconhecida por qualquer pessoa e que não depende de áreas florestais. O contexto da investigação era entender porque alguns indivíduos de seriemas estavam ocorrendo, desde anos anteriores, tão intensamente nas áreas urbanas deste campus universitário, um comportamento bastante atípico para a espécie. Para isso era necessário saber por onde elas andavam, quais os fatores que as atraíam ao ambiente urbano e quais eram os perigos que sofriam neste ambiente. Assim, um filhote com aproximadamente um mês de idade foi marcado com anilhas em 05 de novembro de 2018. Este filhote pertencia a uma família composta pelo seu parental (pai ou mãe) e seu irmão (a) (seriemas não possuem diferenças visíveis entre machos e fêmeas). No dia seguinte ao anilhamento foi iniciada uma intensa campanha de divulgação sobre o monitoramento desta família nas redes sociais, principalmente em páginas do Facebook que reuniam o perfil de uma grande quantidade de usuários do campus (alunos, funcionários, professores, visitantes). Foi solicitado que qualquer seriema avistada no campus deveria ser relatada aos pesquisadores, informando o dia, hora, local, quantas seriemas foram observadas, e se a seriema com a anilha também havia sido visualizada. Encorajava-se que os relatos fossem acompanhados de registros

fotográficos ou vídeos curtos, criados com os aparelhos celulares dos próprios voluntários. Inicialmente os registros eram entregues aos pesquisadores via e-mail, *Whatsapp* ou nas próprias páginas de *Facebook* onde a pessoa interessada havia visto a postagem sobre o monitoramento.

Imediatamente após a divulgação do monitoramento, os primeiros registros começaram a ser entregues, mostrando que a proposta foi bem-vinda pelo público e poderia ter êxito. Assim, para manter o engajamento das pessoas, poucos dias após o início do projeto, foi criado no Facebook o grupo “Você viu uma seriema na ESALQ?”⁸ para ser o principal canal de entrega de novos registros. Além de facilitar o trabalho de tabulação dos dados pelos pesquisadores, todo registro postado neste grupo era facilmente visualizado por todos os demais interessados. Do mesmo modo, os pesquisadores postavam lá periodicamente pequenas compilações sobre os locais por onde as seriemas já haviam sido relatadas e quais descobertas haviam sido feitas até então. Essa prática garantia o retorno de informações sobre o projeto aos voluntários de forma rápida, além de estabelecer um canal onde os mesmos podiam comentar à vontade, como, por exemplo, tirando dúvidas, sugerindo melhorias, fazendo elogios ou críticas. Assim, o projeto conseguiu consolidar entre os voluntários um sentimento de que eles, de fato, faziam parte do projeto. Além disso, como o alvo do monitoramento era um filhote, notou-se que os voluntários desenvolveram um sentimento de zelo ao longo do tempo, o que ajudou a mantê-los engajados. Portanto, desta vez o projeto conseguiu estabelecer uma razão para a participação ativa dos voluntários.

Como resultado, até abril de 2019, mais de 130 voluntários já haviam participado e mais de 400 registros de seriemas haviam sido entregues (ALEXANDRINO et al., 2019b). Os dados gerados ajudaram os pesquisadores a identificar que as seriemas que ocorriam na área urbana da ESALQ estavam na verdade passando por um processo de domesticação, que as deixavam cada vez mais confiantes a se manter neste ambiente atípico. Durante o monitoramento foi identificado possíveis riscos a sua sobrevivência, como o trânsito constante de carros e possíveis conflitos com animais domésticos. Um resultado que chamou a atenção foi o fato destas seriemas possuírem uma área de vida com alta sobreposição, com 35 pontos do campus onde há oferecimento de ração para gatos domésticos abandonados. Ou seja, o monitoramento conseguiu levantar uma evidência

⁸Disponível em: <https://www.facebook.com/groups/1947269508912397>.

de que a atividade de manutenção de centenas de gatos no campus está causando à fauna nativa local, um impacto extremamente negativo. Além disso, foi descoberto que estas seriemas não possuíam medo do trânsito de carros, o que levou um dos filhotes da família a ser atropelado em fevereiro de 2019 aos quatro meses de idade (ALEXANDRINO et al., 2019b).

Embora o monitoramento das seriemas tenha sido idealizado para ser do tipo crowdsourcing, (seguindo a proposta original do projeto “Eu vi uma ave usando pulseiras!?”) a participação do público em um canal aberto gerou um interesse nos voluntários em propor soluções aos problemas que foram sendo identificados ao longo do tempo, levando o projeto a gradualmente migrar para o do tipo “inteligência distribuída”. Muitos voluntários propuseram a instalação de placas informativas no campus sobre as consequências negativas em oferecer alimento para a fauna local, bem como solicitando cautela dos motoristas ao dirigir nas ruas do campus. Logo, em junho de 2019, esse pedido foi atendido pela Diretoria da ESALQ e tais placas foram instaladas em diferentes pontos (Figura 1), uma prova concreta de que a participação pública na ciência pode fomentar tomada de decisões.



Figura 1. Placas informativas instaladas nas ruas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP, solicitando cautela ao dirigir no campus e que as pessoas não ofereçam alimento às seriemas. Estas placas são fruto do projeto “Eu vi uma ave usando pulseiras!?”.

Fonte: Alexandrino (2019).

Os dois casos outrora expostos, os quais exemplificam projetos aplicados em escalas espaciais pequenas (ou seja, contextos locais e regionais), demonstram a importância da conquista do voluntário local através da facilidade da contribuição, do retorno imediato do seu esforço, e da riqueza de abrir um espaço de participação e flexibilização, que incorpore as sugestões dos voluntários. Na primeira experiência (aves nos remanescentes florestais), o foco foi uma pergunta do pesquisador, e o voluntário precisava se ajustar às exigências (complexas) do projeto, sem acesso imediato às informações. Inconscientemente, o projeto se revelou distante do voluntário. A segunda experiência, em contrapartida, parecia ter metas mais modestas, mas permitiu a participação, inicialmente não prevista, dos voluntários, e a incorporação de sugestões enriqueceu e transformou o rumo da investigação científica. O estudo, embora ainda conduzido por um pesquisador, em momento algum se configurou como pertencente a um “dono único”, e por isso ele se emancipou, gerando uma efetiva transformação que incluiu até a administração da universidade.

4 ORIENTAÇÕES PARA BOAS PRÁTICAS DE PESQUISA: RECOMENDAÇÕES

Em 2015, a Associação Europeia de Ciência Cidadã definiu 10 princípios da ciência cidadã⁹, que servem como um guia amplo na condução de projetos com a participação cidadã. Muitos projetos de ciência cidadã são voltados para o monitoramento da biodiversidade. Em 2014, em Manaus, diversos pesquisadores se reuniram no Seminário Internacional de Monitoramento Participativo para o Manejo da Biodiversidade e dos Recursos Naturais e produziram a Carta de Manaus, com uma série de recomendações¹⁰ para ações de monitoramento participativo da biodiversidade.

Em nosso caso específico, como fruto do II Workshop Dia D do rio Doce, em que foram apresentados trabalhos em andamento sobre o desastre de Mariana, realizou-se uma reflexão sobre como a ciência cidadã pode transformar a qualidade do fazer científico em contextos sociais de crise e, conseqüentemente, ser um instrumento na transformação de realidades. Pesquisadores de várias áreas de conhecimento reportaram a dificuldade que vinham tendo para realizar coleta de dados no

⁹Disponível em: https://ecsa.citizen-science.net/sites/default/files/ecsa_ten_principles_of_cs_portuguese.pdf.

¹⁰Disponível em: <http://www.mma.gov.br/publicacoes/biodiversidade/category/151-monitoramento-da-biodiversidade.html?download=1404:carta-de-manaus-recomenda%C3%A7%C3%B5es-para-o-monitoramento-participativo-da-biodiversidade&start=20>.

cenário pós-desastre, pela relutância das populações locais. Durante o Workshop foram levantadas as possíveis causas da resistência das comunidades em permitir o acesso dos pesquisadores e, por meio de dinâmicas de grupo, elaborou-se um conjunto de recomendações para aprimoramento das práticas científicas com as populações locais em contextos de crise.

Em síntese, o que coletivamente se discutiu como aspectos importantes a serem incorporados na prática científica em comunidades locais situadas em contextos de crise, são os que seguem.

- a) Ao acercar-se de uma comunidade que vive em uma localidade onde se pretende realizar pesquisa, primeiramente é importante agir de modo humilde, falar com clareza e objetividade, indicando sua procedência (universidade/instituição) e explicando, em linguagem acessível aos habitantes, os objetivos da pesquisa.
- b) Ao mesmo tempo, é importante que o investigador adote uma atitude colaborativa, tenha interesse e busque compreender os desafios que estão sendo vivenciados pela população atingida e que, idealmente, busque colaborar (no âmbito da pesquisa ou não) usando os seus saberes, habilidades e conhecimentos em favor da realidade local, nivelando as expectativas das pessoas em relação ao que a pesquisa efetivamente pode contribuir.
- c) Saber escutar diferentes vozes das comunidades, responder às suas questões e respeitar o tempo das pessoas.
- d) Agir com transparência em relação à pesquisa, reportando sobre os objetivos da investigação, os avanços e as perspectivas de uso das informações.
- e) Reportar periodicamente às comunidades os resultados de pesquisa, demonstrando a sua relevância para a situação da região.
- f) Sempre que possível, buscar envolver as populações na pesquisa e incorporar saberes locais, demonstrando disposição para também aprender com os demais.
- g) Quando há envolvimento de pesquisadores-cidadãos, dar retorno a eles sobre o resultado da coleta de informações.
- h) Sempre que possível, quando o tema da pesquisa estiver relacionado ao meio ambiente, buscar engajar a população local em ações de recuperação ambiental.

- i) No âmbito da interação com outros pesquisadores, buscar informar-se sobre demais pesquisas em andamento na mesma região para evitar duplicar iniciativas de pesquisa de um mesmo teor.
- j) No âmbito da interação com suas instituições de ensino, buscar capacitar-se para a interação com populações locais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo, apresentamos, primeiramente, preceitos básicos da ciência cidadã, seguido de um exemplo prático, para finalmente expor os resultados da discussão realizada pelo coletivo de pesquisadores durante o II Workshop Dia D do Rio Doce e um conjunto de recomendações para aprimoramento das práticas científicas com as populações locais.

Destacamos que os pesquisadores que querem aplicar esta ferramenta científica, ou incentivar a mesma numa dada comunidade, precisam estar conscientes de que é primordial estabelecer uma boa conexão com o contexto do local onde o projeto será implantado, independentemente do tipo e nível de participação pública que se espera alcançar. Isto significa compreender os valores e emoções que os cidadãos que farão parte da pesquisa possuem em relação ao tema a ser investigado. Esta informação ajudará o pesquisador a entender quais serão as melhores formas de engajar tais cidadãos, as limitações envolvidas e as capacitações que serão necessárias, servindo como base para a condução de todas as etapas de pesquisa (planejamento, coleta de dados, análise, tomada de decisões). Além disso, uma avaliação periódica da qualidade dos dados e resultados gerados ao longo do tempo é imprescindível, pois permitirá adequações no projeto, caso necessário.

A ciência cidadã tem o potencial de transformar a qualidade da prática científica em contextos sociais de crise e, conseqüentemente, ser um instrumento na transformação de realidades. Acreditamos que tais orientações podem guiar processos de produção de conhecimento em contextos semelhantes ao que ocorreu em Mariana/MG.

6 REFERÊNCIAS

ALEXANDRINO, E. R. et al. Challenges in Engaging Birdwatchers in Bird Monitoring in a Forest Patch: lessons for future citizen science projects in agricultural landscapes. **Citizen Science: Theory and Practice**, Winter Harbor, v. 4, n. 1, p. 1–14, 2019a.

- ALEXANDRINO, E. R. et al. Large terrestrial bird adapting behavior in an urbanized zone. **Animals**, Basel, v. 9, n. 6, p. 351, 2019b.
- ALEXANDRINO, E. R. et al. Regiões paulistas carentes de registros ornitológicos feitos por cidadãos cientistas. **Atualidades Ornitológicas**, Ivaiporã, v. 201, p. 33–39, 2018.
- ALEXANDRINO, E. R. **Placas informativas instaladas nas ruas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP, solicitando cautela ao dirigir no campus e que as pessoas não ofereçam alimento às seriemas. Estas placas são fruto do projeto “Eu vi uma ave usando pulseiras!?”** 2019. 2 Fotografias.
- BONNEY, R. et al. Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. **BioScience**, Washington, v. 59, n. 11, p. 977-984, 2009.
- BONNEY, R. Citizen science: a lab tradition. **Living Bird**, Ithaca, v. 15, n. 4, p. 7-15, 1996.
- COMANDULLI, C. et al. Ciência cidadã extrema: uma nova abordagem. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 6, n. 1, p. 34-47, 2016.
- HAKLAY, M. **Citizen science and policy: a European perspective**. Washington: Commons Lab, Wilson Center, 2015. p. 11.
- HAKLAY, M. Citizen science and volunteered geographic information: overview and typology of participation. In: SUI, D.; ELWOOD, S.; GOODCHILD, M. **Crowdsourcing geographic knowledge: volunteered geographic information (vgi) in theory and practice**. Cham: Springer, 2013. p. 105-122.
- HECKER, S. et al. **Citizen science: innovation in open science, society and policy**. London: UCL, 2018.
- HOLDREN, J. P. **Addressing societal and scientific challenges through citizen science and crowdsourcing**. Washington: Office of Science and Technology Policy, 2015.

LEWIS, J. Technological Leap-frogging in the Congo Basin, Pygmies and Global Positioning Systems in Central Africa: what has happened and where is it going? **African Study Monographs**, Lagos, v. 43, p. 15-44, 2012.

SLATER, C. et al. Camera shy? Motivations, attitudes and beliefs of bird photographers and species-specific avian responses to their activities. **Biological Conservation**, Essex, v. 237, p. 327-337, 2019.

CIÊNCIA CIDADÃ E RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL: REFLEXÕES SOBRE A PRODUÇÃO ACADÊMICA NOS ÚLTIMOS 10 ANOS

Samuel Perpétuo Rodrigues¹
Renata Bernardes Faria Campos¹
Maria Celeste Reis Fernandes de Souza¹

1 INTRODUÇÃO

Em novembro de 2015, a bacia hidrográfica do rio Doce foi atingida pelo maior desastre socioambiental da história do Brasil, o rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana – MG. Para compensar e reparar os danos causados pelo rompimento, as mineradoras envolvidas Samarco, Vale e BHP, os governos federais e estaduais de Minas Gerais e Espírito Santo, assinaram um Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC), criando a Fundação Renova, responsável por gerenciar os programas de reparação e compensação (<https://www.fundacaorenova.org/a-fundacao/>).

A aplicação de Termos de Ajustamento de Conduta para casos como o desastre da Samarco/Vale/BHP, é usual na busca por proporcionar a tutela efetiva dos direitos dos afetados. Contudo, a falta de participação dos atingidos nestes acordos levanta a indagação acerca da efetividade desses instrumentos e sobre os reais beneficiários das obrigações assumidas neles. Neste sentido Dornelas et al. (2016) chamam a atenção para a importância de espaços autônomos de participação social não geridos pelas empresas responsáveis pela tragédia ou pelo Estado, mas canais

¹PPG Mestrado em Gestão Integrada do Território-GIT/UNIVALE

e espaços democráticos de comunicação, debate e deliberação por parte dos atingidos, dos movimentos sociais e grupos parceiros.

De toda forma, a partir da homologação do TTAC, no caso do desastre tecnológico das mineradoras Samarco/Vale/BHP, as medidas de reparação passaram a ser administradas por uma fundação privada chamada Renova. Esta decisão foi duramente criticada por meio de nota pública tanto pelos movimentos sociais e entidades associadas ao Comitê Nacional em Defesa dos Territórios Frente à Mineração e à Articulação Internacional dos Atingidos e Atingidas pela Vale, como também pelos Ministérios Públicos Estadual e Federal (ZHOURI et al., 2018)

A despeito dessa problemática, atualmente a Fundação Renova desenvolve 42 programas de reparação e compensação socioambientais e socioeconômicos, que se desdobram em muitos projetos que estão sendo implementados ao longo dos 670km do rio e seus afluentes. Entre os programas, está inserido o Programa de Recuperação de Nascentes (<https://www.fundacaorenova.org/programa/recuperacao-de-nascentes/>), que motivou a realização da presente pesquisa.

O programa de Recuperação de Nascentes teve início em setembro de 2016, com objetivo de recuperar 5 mil nascentes ao longo da bacia do rio Doce em uma década. Por ser um programa que envolve comunidades rurais, o sucesso do mesmo não depende somente da capacidade técnica de profissionais, mas também do engajamento das comunidades envolvidas. Na verdade, todo processo de recuperação ambiental traz resultados a longo prazo e o envolvimento das pessoas inseridas no processo é extremamente importante para o resultado final. A grande dificuldade encontrada pelos profissionais nesse tipo de projeto, é a falta de consciência ambiental.

No caso da recuperação da bacia do rio Doce, um dos grandes desafios encontrados é o engajamento dos produtores rurais no processo de recuperação das nascentes. Engajar o produtor é essencial, uma vez que, cabe a ele a conservação ao longo do tempo da nascente recuperada. Neste cenário a educação ambiental apresenta-se como uma ferramenta importante para a mobilização social das comunidades contempladas com programas de recuperação ambiental. O conceito “mobilização social” pode ser entendido por condutas democráticas e participativas (TORO; WERNECK, 2004).

Os processos de mobilização por meio da educação ambiental já são objeto de atenção no caso da recuperação das nascentes da bacia do Doce, particularmente para a obtenção de anuências, essenciais para o cumprimento das metas estabelecidas no TTAC. Entretanto, é preciso considerar que a avaliação integrada da efetividade e sustentabilidade deste processo aconteça por meio do monitoramento continuado, conforme já recomendado pelo Painel da IUCN (SANCHEZ et al., 2018). Neste sentido, o presente trabalho considera a Ciência Cidadã como uma possibilidade de mobilização para o monitoramento destas áreas, por meio de um processo onde os próprios produtores estejam engajados. Considerando esta possibilidade, o presente trabalho tem como objetivo discutir possíveis relações entre Ciência cidadã, educação ambiental, mobilização social e recuperação de nascentes a partir de trabalhos científicos publicados nos últimos dez anos.

2 SITUANDO E COMPREENDENDO A CIÊNCIA CIDADÃ

A ciência cidadã compreende a participação de amadores, voluntários e entusiastas em projetos científicos. Os envolvidos participam da construção do conhecimento, discutem metodologias, contribuindo efetivamente para os resultados dos estudos. A ciência cidadã pressupõe que qualquer pessoa pode dedicar o seu conhecimento e o seu tempo mobilizando seus recursos na procura de resultados de interesse social. Para Bonney (2009) o conceito de ciência cidadã relaciona-se com a implementação prática da participação do cidadão no processo científico. Em outra definição, o conceito desenha uma ponte entre cidadãos e instituições científicas. (IRWIN, 1995).

Pesquisadores da área defendem que, a construção do conhecimento científico pode ser feita em qualquer lugar, em qualquer momento, com a participação da sociedade. Jollymore (2017) descreve assim, a ciência cidadã, como uma ampla gama de projetos que são definidos por abordagens que abrangem desde crowdsourcing através do envolvimento explícito, até a integração dos cidadãos dentro do processo de execução de pesquisas científicas.

A ciência cidadã não se distancia do que se compreende como “ciência tradicional”, fruto da atuação de pesquisadores profissionais. Ela complementa essa ciência, na proposição de novos problemas e desafios. Neste sentido a ciência cidadã pode expandir drasticamente a coleta e a análise de dados por uma fração do custo de campanhas de pesquisas científicas

tradicionais. Além disso, a ciência cidadã também pode aumentar o escopo dos projetos de pesquisa em escalas temporais e espaciais melhorando o seu poder estatístico (JOLLYMORE, 2017).

Assim, a ciência cidadã é uma investigação científica feita por um conjunto de colaboradores profissionais e não profissionais. Alender (2016) ressalta que projetos de ciência cidadã geram benefícios em três principais categorias: resultados para pesquisas científicas, como coleta de dados; resultados para os participantes, incluindo educação e novas habilidades; resultados para sistemas socio-ecológicos como conservação, administração e política.

A ciência cidadã tem se difundido no campo da ecologia, particularmente em estudos ligados à biologia da conservação e monitoramento ambiental, criando novas “redes de sensores de cidadãos” (CARTON; ACHE, 2017; JOLLYMORE, 2017). De fato, a ciência cidadã há muito tem sido um meio de engajar as populações locais em iniciativas de conservação da biodiversidade, mas essa participação tem sido limitada em vários aspectos (COMANDULLI et al., 2016). Na maior parte dos casos, os papéis reservados aos participantes se reduzem a simples observação e coleta de dados, dado que a definição dos problemas e a análise científica, via de regra não contam com a participação deles. Além disso, há uma ideia preconcebida de que os participantes devem ter um nível educacional relativamente avançado. Estes autores destacam a Ciência Cidadã Extrema como avanço do atual conjunto de práticas da ciência cidadã, por meio do desenvolvimento e implementação de metodologias e ferramentas capazes de permitir que qualquer comunidade, em qualquer lugar do mundo comece um projeto de ciência cidadã para lidar com suas próprias questões.

No contexto particular das consequências do maior desastre tecnológico e socioambiental que acomete a bacia do rio Doce desde novembro de 2015, destacamos a recuperação de nascentes como parte da mitigação de danos que estão sendo implementados no presente trabalho. Dada a extensão da área atingida e o número de nascentes que se pretende recuperar, assim como a complexidade deste processo, consideramos o imprescindível envolvimento dos produtores no processo de produção de conhecimento sistematizado, superando a simples anuência e prestação de informações para que a Renova faça a recuperação. É neste sentido que buscamos compreender melhor os estudos já publicados sobre ciência cidadã, particularmente aqueles relacionados a recursos hídricos, por meio de uma revisão sistemática da literatura.

Por meio da revisão buscamos integrar as informações de um conjunto de estudos que já foram realizados ao longo dos anos dentro da temática proposta, assim como identificar perspectivas que necessitam de atenção e investigações futuras. Portanto, este estudo é retrospectivo e secundário e se baseia no que já foi pesquisado nos últimos anos, por isso, a qualidade das informações e resultados dependem das pesquisas primárias. Não cabe juízo de valores nas conclusões dessa revisão, mas apenas ressaltar o que foi dito e apontar possíveis lacunas para orientar pesquisas futuras dentro da temática.

Para esta revisão sistemática foi feita uma busca no portal de periódicos da Capes (<http://www.periodicos.capes.gov.br/>). A primeira busca foi feita na língua portuguesa usando as combinações das palavras chaves: “ciência cidadã”, restauração, recuperação, ecossistema, nascentes e água. Foram usados os filtros de publicações dos últimos 10 anos (2009 a 2019) e artigos revisados por pares. Entretanto esta busca não resultou nenhuma publicação relevante para o presente estudo. Desta forma, foi feita uma segunda busca no portal, seguindo-se o mesmo protocolo, mas usando os mesmos termos na língua inglesa.

Os artigos indicados pelo portal foram selecionados por meio da aproximação com o tema e com o objeto de estudo. Portanto, todas as publicações encontradas foram lidas e selecionamos aquelas diretamente relacionadas a ciência cidadã dentro da temática de recursos hídricos.

3 PRODUÇÃO ACADÊMICA SOBRE CIÊNCIA CIDADÃ E ÁGUA DOS ÚLTIMOS DEZ ANOS

A busca realizada em língua inglesa resultou em 81 artigos revisados por pares publicados nos últimos dez anos. Após a leitura dos resumos, foram selecionados quatorze artigos relacionados com ciência cidadã e recursos hídricos simultaneamente (Figura 1). Os artigos selecionados foram lidos integralmente e fichados para posterior análise, sendo os outros 66 artigos descartados devido ao distanciamento com o tema do presente trabalho. Destacamos aqui que a maior parte dos artigos descartados nesta análise versaram sobre educação ambiental, por outro lado, entre os artigos escolhidos, é possível notar o crescente interesse pela ciência cidadã, uma vez que onze dos quatorze artigos selecionados foram publicados nos últimos quatro anos.

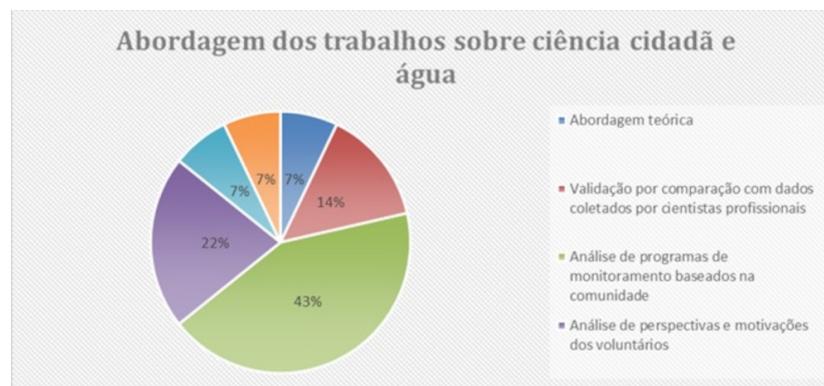


Figura 1. Panorama geral dos quatorze trabalhos sobre ciência cidadã e água publicados nos últimos dez anos a partir de revisão sistemática no portal de periódicos da CAPES.

Fonte: Os autores (2019).

Apesar de não encontrarmos artigos publicados em língua portuguesa sobre ciência cidadã e recursos hídricos no portal da CAPES, dois dos trabalhos selecionados foram realizados no Brasil, particularmente na bacia do rio São Francisco (CUNHA et al., 2017; FRANÇA et al., 2019). Uma destas pesquisas foi conduzida na região metropolitana de Belo Horizonte (MG), envolveu 1965 professores e alunos que executaram protocolos simplificados de monitoramento de características físicas de habitat, qualidade da água e macroinvertebrados bentônicos. Os dados coletados pelos estudantes foram comparados com dados coletados por pesquisadores, tornando possível validar metodologias simplificadas.

França et al. (2019) demonstram que metodologias de pesquisa científica, adaptadas para uso por estudantes da educação básica, podem ser eficazes em avaliações ecológicas da qualidade da água urbana, ampliando potencialmente a escala na qual o monitoramento pode ser realizado. Por outro lado, as atividades de monitoramento ecológico envolvendo jovens, podem ajudar a desenvolver seu conhecimento acerca das consequências e necessidades de se proteger e reabilitar córregos urbanos, aumentando também a transparência e a confiança na sociedade e na governança.

O outro estudo realizado no Brasil (CUNHA et al., 2017) traz dados relativos à floração de algas em três cidades do sul e sudeste (Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro). Neste caso os voluntários foram treinados para executar protocolos que

geraram dados em campo e coletar material para posterior análise em laboratório, sempre sob assistência de pesquisadores. Estes autores destacam o potencial da associação de cientistas cidadãos com profissionais em programas de monitoramento como forma de beneficiar o manejo ambiental, especialmente por meio do fornecimento de informações mais detalhadas. De modo particular, os dados coletados evidenciam a relação direta entre as observações feitas pelos cidadãos acerca da vegetação ciliar e os dados gerados por pesquisadores acerca da qualidade da água.

Numa escala ampliada, Thornhill, Chautard e Loielle (2018) utilizaram dados coletados por 120 voluntários treinados para o uso de métodos padronizados em três continentes (América do Norte, Europa e Oceania) atentando para variações sazonais. Os voluntários deste trabalho, assim como aqueles do Brasil (CUNHA et al., 2017) coletaram dados visuais do entorno, com registro fotográfico e contribuíram para análises de qualidade da água, mas neste caso também incluíram a presença de peixes. Assim como os demais, estes autores recomendam a ciência cidadã como uma ferramenta complementar útil para o monitoramento regulatório e profissional atuando como um sistema de alerta. Entretanto, a ciência cidadã não deixa de ter suas limitações e sua aplicação nem sempre é adequada. Além disso, o engajamento dos cidadãos pode ser demorado e são necessárias mais pesquisas para entender as motivações das comunidades locais em relação aos seus recursos de água doce.

Limitações da ciência cidadã também foram apontadas num estudo sobre a ligação entre os salmões e as águas subterrâneas, um dos principais focos do planejamento de recuperação de salmões e adaptação às mudanças climáticas no centro da Califórnia e noroeste do Pacífico (WOELFLE-ERSKINE, 2017). A autora do estudo utilizou entrevistas de campo e observação de participantes em campanhas de campo e fóruns regulatórios para explorar como os colaboradores sintetizam dados de agências e proprietários de terras sobre águas subterrâneas e gestão dos salmões numa bacia hidrográfica escassa em água, na costa central da Califórnia.

Woelfle-Erskine (2017) ainda afirma que a pesquisa colaborativa iniciada por residentes locais e pessoal da agência criou, em alguns casos, um novo senso de possibilidade ecológica na região. Mas a falta de envolvimento com os membros tribais indígenas Pomo e Miwok, com as tribos confederadas de Graton Rancheria e com trabalhadores rurais e outros moradores marginalizados mostrou-se como uma limitação da participação dos voluntários. Apesar das limitações, a autora aponta

o envolvimento de grupos diversos, revela novas perspectivas de conhecimento que podem então ser incorporadas ao debate político. Esse conhecimento repercute na reestruturação dos ecossistemas como bens comuns de múltiplas espécies e enfatizam a interdependência, em vez do conflito entre as necessidades humanas e ecológicas de água e oferecem a melhor chance de promover a sustentabilidade e a equidade entre e além do ser humano.

Em 2014, Winfield já alertava em um artigo teórico para o potencial da ciência cidadã para a compreensão científica e a gestão da conservação do solo e da água. Este autor sugere que as ações de voluntários não devem ser vistas como um local para a abordagem científica profissional tradicional, mas devem ser bem-vindas como uma maneira de oferecer importantes contribuições aos cientistas no enfrentamento dos desafios ambientais atuais (WINFIELD, 2014).

Ainda sobre as motivações dos participantes, Jollymore et al. (2017) já haviam notado que isso pode afetar os dados coletados e a interpretação que os cidadãos dão para as exceções. De toda forma, estes autores validam a participação de cidadãos em pesquisas científicas e ressaltam a importância da inclusão de questões de interesse dos cidadãos nos projetos, dado que nem sempre estas questões coincidem com as questões dos cientistas. No caso desta pesquisa, os participantes foram chamados uns pelos outros num esquema de “bola de neve”, a partir de estudantes universitários para a comunidade. Além da utilização de kits e protocolos de fácil execução, os autores também chamam a atenção para o aspecto da segurança dos cidadãos durante a coleta de dados. Por fim e não menos importante estes autores salientam a importância deste tipo de pesquisa para o engajamento das pessoas, o que também se constitui numa oportunidade de romper com o fluxo unidirecional da produção do conhecimento científico.

Antes ainda, Alender (2016) já atentara para as motivações dos voluntários com vistas a otimização do recrutamento e manutenção de voluntários neste tipo de projeto. O trabalho contou com 271 voluntários de oito organizações de monitoramento da qualidade da água nos Estados Unidos. É importante notar que a maioria dos participantes declaram maior interesse em contribuir para o meio ambiente e para a comunidade, enquanto um número menor declara motivação para contribuir com o conhecimento científico e um número ainda menor de participantes se interessam por outros tipos de recompensas.

Dentre os artigos encontrados nesta revisão, destacam-se cinco trabalhos sobre o monitoramento com base na comunidade (CBM), dentre os quais quatro são diretamente ligados à água no Canadá. O primeiro a ser publicado trata das

dificuldades relativas à documentação e análise, com atenção para o contraste e a comparação de processos e efeitos. Os autores trazem à tona a complexidade de projetos de ciência cidadã para o monitoramento ambiental e propõem uma avaliação que compreende três componentes, o sujeito social, o objeto de monitoramento e os meios de ação. Além disso, destacam cinco processos: gerenciamento de dados, aprendizado social, assimilação / tomada de decisão, ação direta e vinculação. As propriedades emergentes também foram identificadas nos níveis focal e supra focal, considerando a auto-organização da comunidade, capacidade de resposta e autonomia para o gerenciamento ambiental. O modelo foi aplicado à avaliação de qualidade da água implementado em áreas rurais no México aos dados dos três primeiros anos (2010–2012) por um programa CBM. O estudo detectou mudanças que indicavam movimento em direção aos resultados esperados, mas também revelou a necessidade de ajustar a estratégia e os procedimentos de intervenção. Os componentes e processos do modelo refletiram aspectos relevantes da CBM no mundo real. Segundo os autores o modelo ofereceu uma estrutura conceitual com vantagens para entender a CBM como um evento socio ecológico e fortalecer sua implementação sob diferentes condições e contextos.

Dentre os trabalhos referentes à CBM no Canadá, Buckland-Nicks, Castleden e Conrad (2016) concluíram que, embora forneça informações essenciais sobre a saúde das bacias hidrográficas e envolva o público na ciência, as iniciativas de CBM enfrentam barreiras no compartilhamento das informações coletadas pela comunidade e a gestão ambiental. As descobertas publicadas em 2016 mostraram que o nível de rigor para padrões de qualidade, inclusão de voluntários, recursos disponíveis e objetivos desejados são considerações importantes no monitoramento, dado que, o envolvimento de voluntários maximiza recursos para a realização de objetivos científicos e educacionais.

O segundo trabalho ligado ao CBM (GARDA; CASTLEDEN; CONRAD, 2017) salienta que as organizações comunitárias de monitoramento das atividades ecossistêmicas aquáticas operam em várias escalas, frequentemente envolvendo-se também, em projetos de restauração decorrentes do monitoramento. Entretanto, mudanças físicas, indicativas de melhoria do ecossistema, exemplos de respostas mensuráveis, permanecem raras, indicando problemas com a detecção dos efeitos de projetos de pequena escala na escala da bacia hidrográfica. Neste sentido, os autores apontam que as ações das CBM são desafiadas pela falta de financiamento, capacidade e procedimentos de monitoramento assim como a falta de capacidade para realizar restaurações em larga escala e o rigoroso monitoramento científico.

Em trabalho mais recente Carlson e Cohen (2018) entrevistaram 121 dos 270 voluntários envolvidos no mesmo programa de monitoramento participativo (Community-Based Water Monitoring - CBM). Embora os voluntários deste programa utilizem protocolos padronizados e confiáveis, menos da metade das organizações do CBM informa que seus dados são usados para balizar políticas para água em qualquer nível, a despeito do apoio expresso do governo ao programa. Neste sentido, os autores destacam a importância de superação de barreiras ligadas à comunicação e ressaltam que a participação dos voluntários não pode ser simplesmente uma alternativa mais barata à coleta de dados.

O quarto trabalho relacionado ao CBM no Canadá, compila informações geradas ao longo de 6 anos e meio por uma rede de monitoramento local (FLORES-DÍAZ et al., 2018). Os autores demonstram como os esquemas de CBM podem ser um meio de gerar conhecimento dos recursos hídricos, aprimorando assim o entendimento da dinâmica da água e informar as decisões dos usuários em níveis local-regional. Os resultados foram agrupados por preocupações comunitárias e institucionais específicas sobre a água e objetivamente indicam que nascentes sob boas práticas de manejo tinham baixos níveis de poluição, enquanto outras usadas para beber e recreação tinham altos níveis de bactérias fecais.

Em outra abordagem Macknick e Enders (2012) focaram em conflitos por recursos naturais na região da Nicarágua e Honduras e oferecem recomendações descrevendo como um monitoramento binacional da água, baseado na comunidade, poderia melhorar a coleta de dados e sua inclusão no processo de tomada de decisão. Neste trabalho os autores recomendam que o monitoramento de água feito por meio da ciência cidadã pode melhorar a coleta de dados e a inclusão no processo de tomada de decisão, contribuindo para a solução dos conflitos decorrentes da falta de políticas integradas de silvicultura, água e uso da terra.

Por fim, numa abordagem mais geral e recente Wild, Dempsey e Broadhead (2019) consideram a aproximação do marco de “10 anos depois” desde o início do site www.daylighting.org.uk, para refletir sobre a abordagem baseada na natureza (NBS²), as oportunidades apresentadas, as restrições encontradas, os progressos realizados e os resultados entregues. No artigo os autores destacam o potencial de métodos baseados no ‘Volunteered Geographic Information’ (VGI), assim como

²NBS seriam soluções sociais para desafios ambientais, inspiradas e apoiadas pela natureza, com bom custo-benefício, que proporcionam simultaneamente benefícios ambientais, sociais e econômicos e ajudam a criar resiliência, trazendo a diversidade da natureza, recursos e processos naturais para as cidades, paisagens e paisagens marinhas, de forma local. Intervenções adaptadas, eficientes em termos de recursos e sistemas.

o baixo custo que pode atrair atenção, embora não seja o único aspecto a ser considerado por pesquisadores e outras partes interessadas. Além de serem, muitas vezes, a única fonte de informações, o rápido crescimento do interesse pelo material do estudo sobre decodificação (amplamente na América do Norte e na Europa) provou ser inestimável para profissionais e formuladores de políticas. Por fim, os autores destacam que, para as NBS urbanas, a prática está evoluindo rapidamente e os pesquisadores enfrentam uma escassez de dados. Mais informações são urgentemente necessárias, exigindo métodos inovadores e complementares.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos publicados na última década evidenciam o importante papel da ciência cidadã no engajamento de indivíduos em causas ambientais, contribuindo para os objetivos da educação ambiental e levando à motivação para ações de recuperação para além do simples monitoramento. Não obstante, as contribuições deste envolvimento dos cidadãos têm grande importância para a conservação e gestão ambiental em geral e sobretudo para a construção de conhecimento numa perspectiva transdisciplinar. Não menos importante, a participação de cidadãos em processos de monitoramento se mostra útil para o levantamento de problemas e soluções para as questões de interesse social.

Na maior parte dos casos a comunidade participa ativamente do processo de coleta de dados, por meio de protocolos simplificados, o que nos leva a destacar a importância da publicação dos resultados das análises em meios de fácil acesso por meio de textos que possam ser compreendidos pelos próprios voluntários independentemente de sua escolaridade. Além disso, é imprescindível que os resultados destas pesquisas sejam comunicados às instâncias de tomada de decisão e elaboração de políticas para a gestão ambiental, dado que a principal motivação para a participação de voluntários em projetos desta natureza é a efetiva contribuição para o meio ambiente e para a comunidade.

Os dois aspectos supracitados se constituem em argumentos para a utilidade de procedimentos que envolvam os cidadãos da bacia do rio Doce no monitoramento das ações de mitigação que vêm sendo implementados após o rompimento da barragem de Fundão. Por fim, destacamos a importância do uso de métodos VGI dada a extensão da bacia e do território atingido pelo desastre de 05 de novembro de 2015. Acreditamos que esta participação pode contribuir para o sucesso das ações

por meio da mobilização e conscientização da população. A construção de instrumentos de monitoramento de modo coletivo com a população e a formação dos sujeitos para o monitoramento, pode contribuir decisivamente para a sustentabilidade dos processos de recuperação ambiental, mesmo após o fim da atuação da Fundação Renova e cumprimento dos programas constantes do TTAC.

5 REFERÊNCIAS

- ALENDER, B. Understanding volunteer motivations to participate in citizen science projects: a deeper look at water quality monitoring. **Journal of Science Communication**, New York, v. 15, n. 3, p. A04, 2016.
- BONNEY, R. et al. Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. **BioScience**, Washington, v. 59, n. 11, p. 977–984, 2009.
- BUCKLAND-NICKS, A.; CASTLEDEN, H.; CONRAD, C. Aligning community-based water monitoring program designs with goals for enhanced environmental management. **Journal of Science Communication**, New York, v. 15, n. 3, p. A01, 2016.
- CARLSON, T.; COHEN, A. Linking community-based monitoring to water policy: Perceptions of citizen scientists. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 219, p. 168-177, 2018.
- CARTON, L.; ACHE, P. Citizen-sensor-networks to confront government decision-makers: Two lessons from the Netherlands. **Journal of Environmental Management**, London, v. 196, p. 234-251, 2017.
- COMANDULLI, C. et al. Ciência cidadã extrema: uma nova abordagem. **Biodiversidade Brasileira**, Brasília, v. 6, n. 1, p. 34-47, 2016.
- CUNHA, D. G. F. et al. The contribution of volunteer-based monitoring data to the assessment of harmful phytoplankton blooms in Brazilian urban streams. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 584, p. 586-594, 2017.

- DORNELAS, R. S. et al. Ações civis públicas e termos de ajustamento de conduta no caso do desastre ambiental da Samarco: considerações a partir do observatório de ações judiciais. In: LOSEKANN, B.; LOSEKANN, C. (ed.). **Desastre no Vale do Rio Doce**: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição. Rio de Janeiro: Folio Digital, 2016. p. 339-372.
- FLORES-DÍAZ, A. et al. Community-based monitoring in response to local concerns: creating usable knowledge for water management in rural land. **Water**, Pittsburgh, v. 10, n. 5, p. 542, 2018.
- FRANÇA, J. S. et al. Student monitoring of the ecological quality of neotropical urban streams. **Ambio**, Stockholm, v. 48, n. 8, p. 867-878, 2019.
- GARDA, C.; CASTLEDEN, H.; CONRAD, C. Monitoring, restoration, and source water protection: canadian community-based environmental organizations' efforts towards improving aquatic ecosystem health. **Water**, Pittsburgh, v. 9, n. 3, p. 212, 2017.
- IRWIN, A. **Citizen science**: a study of people, expertise and sustainable development. London: Routledge, 1995.
- JOLLYMORE, A et al. Citizen science for water quality monitoring: data implications of citizen perspectives. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 200, p. 456-467, 2017.
- MACKNICK, J. E.; ENDERS, S. K. Transboundary forestry and water management in Nicaragua and Honduras: from conflicts to opportunities for cooperation. **Journal of Sustainable Forestry**, London, v. 31, n. 4-5, p. 376-395, 2012.
- THORNHILL, I.; CHAUTARD, A.; LOISELLE, S. Monitoring biological and chemical trends in temperate still waters using citizen science. **Water**, Pittsburgh, v. 10, n. 7, p. 839, 2018.
- TORO, B.; WERNECK, N. M. F. D. **Mobilização social**: um modo de construir a democracia e a participação. Belo Horizonte: Autêntica, 2004.
- WILD, T. C.; DEMPSEY, N.; BROADHEAD, A. T. Volunteered information on nature-based solutions: dredging for data on deculverting. **Urban Forestry & Urban Greening**, Oxford, v. 40, p. 254-263, 2019.

WINFIELD, I. J. Biological conservation of aquatic inland habitats: these are better days. **Journal of Limnology**, Verbania Pallanza, v. 73, p. 120-131, 2014.

WOELFLE-ERSKINE, C. Collaborative approaches to flow restoration in Intermittent Salmon-Bearing Streams: Salmon Creek, CA, USA. **Water**, Pittsburgh, v. 9, n. 3, p. 217, 2017.

ZHOURI, A. et al. **O desastre no Rio Doce**: entre as políticas de reparação e a gestão das afetações. Mineração, violências e resistências: um campo aberto à produção de conhecimento no Brasil. Marabá: Editorial Iguana, 2018. p. 28-64

SOBRE OS AUTORES DESTA OBRA

Adriane Cristina de Melo Hunzicker

Doutoranda e Mestra em Educação na Faculdade de Educação (FaE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Graduada em Geografia pela Faculdade Santa Rita (2008). Especialista em Práticas Pedagógicas pela Universidade Federal de Ouro Preto (2015) e em Educação a Distância pela Universidade Norte do Paraná (2015). Desenvolve pesquisas sobre a relação educação-mineração. Participa do projeto de extensão sobre os impactos do rompimento da barragem de Fundão nas escolas do campo, pesquisa integrada ao Núcleo de Estudos e Pesquisas em Educação do Campo (NEPCAMPO/FaE/UFMG). Membro da Frente Educação e mineração no Programa Participe da UFMG. Participa do Grupo de Estudos e Pesquisas em Representações Sociais (Geres/FaE/UFMG). Atuou como docente em escolas atingidas pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana/MG. Atualmente é monitora no curso de Licenciatura em Educação do Campo (LeCampo/FaE/UFMG) e bolsista da Capes/Proex. E-mail: adrianegeo@yahoo.com.br

Alessandra Rondina Fontanesi Gomes

Graduada em Ciências Biológicas - licenciatura, pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), no ano de 2018. Foi bolsista PIBIC nos anos de 2016 a 2017, no laboratório ANT-Lab, Faculdade de Educação, atuando na área de Contribuições para a educação em ciências a partir de investigações sobre as ontologias de geometria de povos do campo. Durante os anos de 2018 a 2019 foi integrante do laboratório de Recuperação de áreas degradadas e interação microrganismos-planta, do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, atuando na área de Recuperação de Campo rupestre na Bacia do Rio das Velhas: Prevenção do fogo, resgate da biodiversidade e controle de espécies invasoras. Atualmente é auxiliar de laboratório em recuperação de áreas degradadas e interação microrganismos-planta, do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, e atua no projeto de remediação e recuperação da mata ripária atingida pelo rejeito contaminado da barragem do Fundão, rompida em 2015. Também realiza a produção de mudas nativas de espécies do Cerrado e Mata Atlântica.

Alexandre Barbosa Reis

O professor Alexandre Reis (50 anos) é formado em Farmácia - Bioquímica (Licença de Análises Clínicas) pela Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP (1996). Especialização em Parasitologia (1998) e Doutorado em Imunoparasitologia (2001) pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Pós-doutor em imunologia (Vaccinologia) pelo Centro de Pesquisa René Rachou, Fundação Oswaldo Cruz - CPqRR / FIOCRUZ / MG (2003) e Pós-doutor seniores no Laboratório de Malária e Pesquisa de Vetores (EUA, NIAID / NIH 2010-2011). Atualmente, é Professor Titular de Parasitologia Clínica no Departamento de Análises Clínicas da Escola de Farmácia (DEACL - UFOP) e Pesquisador Sênior do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Doenças Tropicais (INCT - DT). Atual coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, NUPEB / UFOP. (NUPEB / UFOP); Professor Orientador de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas (Cipharma / EF) e Biotecnologia (BIOTEC). Além disso, realiza assessoria pontual no Programa de Pós-Graduação em Parasitologia da Universidade Federal de Minas Gerais. Atual coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, NUPEB / UFOP. Desde 2002, ele é pesquisador parceiro do Centro de Pesquisa René Rachou (FIOCRUZ / MG), onde orientou mais de 25 mestres, 10 médicos e 10 pós-médicos. Foi coordenador do comitê de Ciências da Vida da UFOP, chefe do Centro de Ciências Animais (2009) e membro consultor da câmara de Ciências Biológicas e Biotecnológicas da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (2009 - 2011), além de ser ad hoc consultor do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e consultor externo da Malária Net no Brasil. Revisor de mais de 40 publicações científicas. Membro do comitê consultivo do Ministério da Saúde para o controle da leishmaniose visceral no Brasil e do Departamento de Ciência e Tecnologia do Ministério da Saúde no Brasil. Possui várias patentes na área de Vaccinologia, Imunodiagnóstico e, em 2013, transferiu a tecnologia de produção da vacina LbSap contra a leishmaniose visceral canina para a empresa Ouro Fino Agro Business. Bolsista de Produtividade Científica 1C do CNPq com experiência nas áreas de Imunoparasitologia e Imunopatologia, com ênfase em Protozoologia, atuando principalmente nos seguintes temas: imunopatologia, migração celular, leishmaniose visceral canina, *Leishmania chagasi*, desenvolvimento de cães, vacinas e métodos de diagnóstico (Biotecnologia)

Aline Oliveira Silva

Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns (UFRPE-UAG). Mestre em Produção Agrícola (UFRPE-UAG). Doutora em Ciência do Solo pelo Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo na Universidade Federal de Lavras (UFLA). Atualmente bolsista de Pós-Doutorado Júnior do CNPq. Atua nas áreas de indicadores de qualidade do solo, enzimologia do solo, fixação biológica de nitrogênio, fungos micorrízicos arbusculares, diversidade de microrganismos no solo e cultivo *in vitro* de microrganismos.

Amanda Duim Ferreira

Doutoranda em Solos e Nutrição de Plantas na Esalq - USP. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal do Espírito Santo (2016) e mestrado em Agricultura Tropical pela Universidade Federal do Espírito Santo (2019), atuando principalmente nos seguintes temas: dinâmica de elementos em solos alagados, metais em solos, fitorremediação de metais.

Ana Luisa Soares Vasconcelos

Doutorada no Programa de Solos e Nutrição de Plantas - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ/USP. Atua nas áreas de dinâmica de carbono e nitrogênio, gases de efeito estufa e microbiologia do solo. Mestrado em ciência no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) e graduação (bacharel e licenciatura) em Engenharia Agrônoma na ESALQ/USP. Durante a graduação estagiou em grupos de pesquisa e extensão da universidade, foi bolsista de iniciação científica do CNPq (2010 - 2011), Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), cooperativa de cafeicultores (COOXUPE) e empresa de consultoria (P&A).

Ana Paula Valadares da Silva

Graduada em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal de São João Del Rei e Pós graduanda em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras. Possui experiência na área de microbiologia do solo com ênfase em fungos micorrízicos (Tropicais e

Antárticos), metais pesados e bio-sólidos (lodos de esgoto). Atualmente realiza trabalho com rejeito de mineração de ferro oriundo do rompimento da barragem do Fundão em Mariana - MG e de Brumadinho - MG, com ênfase na biodisponibilidade de metais.

Angelo Fraga Bernardino

Professor Associado no Departamento de Oceanografia da Universidade Federal do Espírito Santo, Doutor em Oceanografia Biológica pelo Instituto Oceanográfico da USP, com período sanduíche na *University of Hawaii* sob orientação dos Profs. Paulo Sumida e Craig Smith. Trabalha com ecologia bêntica costeira, de margem continental e oceanos profundos. Participou como pesquisador em mais de 13 Cruzeiros Oceanográficos Científicos no Brasil e Exterior, em projetos desenvolvidos na Antártica (Oceano Austral), Oceano Pacífico NE, Pacífico SW, Giro Subtropical Central do Pacífico e Atlântico SW, sendo Co-Investigador principal em três destes. Realizou um mergulho em submersível tripulado (Shinkai 6500) a 2880 metros na Margem Continental Brasileira. Se dedica a estudos sobre a biodiversidade, ecologia trófica e aspectos funcionais de comunidades bentônicas em sedimentos inconsolidados. Coordena ou colabora em projetos científicos em ecossistemas costeiros e profundos, com foco em mudanças climáticas, impactos na biodiversidade e planejamento espacial marinho em zonas costeiras e no talude continental do Brasil. Coordenador do sítio PELD-Habitats Costeiros do Espírito Santo (2017-presente). Membro permanente do programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas da UFES. Membro do comitê gestor (Advisory Board) da organização internacional *Deep-Oceans Stewardship Initiative* (DOSI - <http://dosi-project.org>) desde 2018. *Review editor* para a *Frontiers in Marine Science - Deep-Sea Environments and Ecology*.

Arthur de Carvalho Antão

Graduando (9º período) em ciências biológicas (licenciatura) na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Em 2016, fui monitor de biologia e química no Colégio Adventista de Belo Horizonte e no curso preparatório Pré-Absoluto. Fui estagiário voluntário na modalidade iniciação científica do grupo de pesquisa de Epidemiologia e Conservação de animais silvestres (ECOAS) da Escola de Veterinária da UFMG, no período de um ano (2016-2017). Em outra oportunidade, fui estagiário no laboratório de recuperação de áreas degradadas e interação microrganismo-planta do Instituto de Ciências

Biológicas da UFMG, onde participei dos projetos de recuperação de taludes da mineradora EMPABRA e da área impactada do desastre de Mariana, além de realizar produção de mudas nativas para recuperação de áreas degradadas. Atualmente sou estagiário no aterro sanitário MACAÚBAS onde sou responsável pela execução do programa de recuperação ambiental (PRAD), além de participar da elaboração e execução de atividades de educação ambiental.

Camila de Paula Dias

Doutoranda em Ciências Biológicas pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas - CBIOL/UFOP desenvolvendo pesquisa junto ao laboratório de EcoHealth. Mestra pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PROAMB/UFOP, em que atuou com micro-organismos resistentes a antibióticos presentes no sistema de tratamento de suinocultura no âmbito do conceito “Saúde única” (OneHealth) e com metagenômica de reatores lignocelulósicos no Laboratório de Biologia e Tecnologia de Micro-organismos (LBTM) da Universidade Federal de Ouro Preto. Bacharela e Licenciada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Ouro Preto atuando com extensão em Saúde Pública. Técnica em Segurança do Trabalho e Meio Ambiente, com experiência em Educação Sanitária e Ambiental e Saúde Pública.

Carlos Henrique Barbosa Santos

Possui graduação em Agronomia (2011) e mestrado em Ciências Agrárias (2013) pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia e doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) (2017) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP/FCAV Campus de Jaboticabal. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Fruticultura, atuando principalmente nos seguintes temas: produção de mudas, propagação e enxertia, melhoramento de plantas frutíferas, microbiologia e bioquímica do solo.

Carlos Frankl Sperber

Sou bacharel e licenciado em biologia, com mestrado em ecologia (UNICAMP) e doutorado em Zoologia (UNESP). Fiz estágios pós-doutorais no Instituto Max-Planck de Limnologia (Alemanha), Museu de História Natural de Paris (França)

e Universidade de Kyushu (Japão). Sou professor na UFV desde 1992, onde leciono ecologia e oriento nos programas de pós-graduação em entomologia e ecologia, em nível de iniciação científica, mestrado e doutorado. Sou bolsista de produtividade do CNPq desde 2007, e pesquiso na área de ecologia e ensino-aprendizagem de ecologia. O sucesso no meu trabalho se baseia em colaboração e cooperação, o que exige que eu me esforce para uma maior equidade para pessoas de todas as origens e situações, abertura para o novo e desconhecido, e respeito pela diferença. Vejo como meu dever ajudar o melhor possível a superação de desigualdades de condição e respeito, enquanto tento reconhecer e superar meus próprios preconceitos. Mesmo que essas coisas não façam explicitamente parte da descrição de minhas atividades, eu ainda as faria porque acho que estão corretas. Eu pessoalmente me identifico como branco, masculino, heterossexual e sem limitações físicas ou psicológicas reconhecidas por mim.

Carolina Schneider Comandulli

Carolina Schneider Comandulli vem trabalhando, colaborando e convivendo com povos indígenas da Amazônia e Mata Atlântica há mais de 15 anos, tanto a nível profissional e acadêmico, tendo ocupado desde posições chave em instituições de governo e de implementação de políticas indigenistas, bem como trabalhado diretamente com organizações de base local. Ocupou diversos cargos na Fundação Nacional Índio, entre 2010 e 2014, bem como realizou consultoria para diversas organizações ao longo dos últimos 15 anos, como o Centro de Trabalho Indigenista e a *Forest Trends*. Carolina participa de uma série de grupos acadêmicos que possuem a finalidade de trazer as reflexões e ensinamentos teóricos para a prática e em benefício das comunidades locais e sociedade em geral, sendo eles: Ciência Cidadã Extrema, Centro de Antropologia da Sustentabilidade e Desafios de Pesquisas Multidisciplinares. Em 2019, co-organizou o evento *Flourishing Diversity Series*, em Londres, que segue tendo desdobramentos. Carolina possui Mestrado em Antropologia, Ecologia e Desenvolvimento pela *University College London* – UCL e está em fase de término do Doutorado em Antropologia pela mesma universidade.

Cynthia Canêdo da Silva

Professora adjunta do Departamento de Microbiologia na Universidade Federal de Viçosa-MG. Graduada com bacharelado e licenciatura em Ciências Biológicas, e mestre em Microbiologia Agrícola, ambos títulos obtidos pela Universidade

Federal de Viçosa. Doutora em Genética e Biologia Molecular pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e em 2012, finalizou um pós-doc vinculado ao CPQBA/UNICAMP financiado pela Petrobrás. Atua na área de Microbiologia Molecular Ambiental, com ênfase em Metagenômica, Caracterização e Monitoramento da estrutura e função de comunidades microbianas em diversas amostras ambientais e em processos biológicos de remediação de compostos poluentes em efluentes industriais, através da construção de bibliotecas de genes RNAr 16S e de alto peso e técnicas moleculares de fingerprinting.

Diego Barcellos

Doutorado (2018) e Mestrado (2013) em Ciência do Solo pela *University of Georgia* (EUA). Graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (2011). Atualmente é pesquisador (pós-doutorado FAPESP) na ESALQ/USP, trabalhando com solos do estuário do Rio Doce na dinâmica redox dos óxidos de ferro e metais, e também com solos de manguezais do Espírito Santo e Ceará. Professor Colaborador na ESALQ/USP, lecionando as disciplinas de Química e Fertilidade do Solo e Gênese, Morfologia e Classificação do Solo. Natural do Espírito Santo, filho de agricultores produtores de café. Possui Certificado de Educação em Ensino Universitário pela *University of Georgia* (2018), com treinamento didático para atuar em universidades. Trabalhou com projetos de Pedologia por 3 anos durante a graduação na UFV. Desenvolveu projeto de Mestrado em Fitorremediação de solos contaminados com poluentes orgânicos utilizando eucalipto (experimentos de casa de vegetação e campo). Doutorado na área de Química e Mineralogia do Solo & Química da Matéria Orgânica do Solo. Realizou experimentos de campo em Porto Rico e na Carolina do Sul (EUA) utilizando dataloggers e sensores de umidade, oxigênio, potencial redox, e amostragem constante de solos para extrações químicas e caracterização dos óxidos de ferro e carbono orgânico do solo. Experiência de laboratório com ICP-MS para metais, cromatógrafo gasoso (CO₂, CH₄, e N₂O), CHN e *TOC Analyzer*, difratometria de raio-x, espectroscopia Mossbauer (para óxidos de ferro), e formação em técnicas sincrotron aplicadas à agricultura e ambiental. Ganhou 5 competições de pôster em congressos e recebeu mais de 6 prêmios na *University of Georgia*. Treinamento em empreendedorismo e inovação na *Singularity University* (2017), no *Global Solutions Program*, financiado pela NASA e Google, com o objetivo de buscar soluções para melhorar a vida de 1 bilhão de pessoas nos próximos 10 anos, incluindo tópicos como agricultura, fome, água, meio-ambiente, energia, saúde, e outros. Tenho

como missão pessoal e profissional de melhorar a vida das pessoas no setor agrário e ambiental utilizando conhecimentos e treinamento adquirido.

Diego Jeangregório Martins Guimarães

Advogado, professor, pesquisador. Graduado em Direito pela Universidade Vale do Rio Doce – UNIVALE (2014). Estudou Filosofia pela Universidade Federal de Lavras - UFLA no sistema de Universidade Aberta do Brasil - UAB no polo presencial de Governador Valadares. Especialista em Direito do Trabalho, Processo do Trabalho e Prática Trabalhista também pela Univale (2015). Mestre Acadêmico, tendo concluído o PPG – *Stricto sensu* mestrado interdisciplinar em Gestão Integrada do Território – Área temática da CAPES: interdisciplinar em Ciências Humanas e Sociais – pela UNIVALE (2017). Atua como professor na Universidade Vale do Rio Doce, lotado no curso de Graduação em Direito, atuando também nos cursos de Engenharia Civil e Ambiental, e Gestão do Agronegócio na área de Direito Ambiental. Professor também em cursos de Pós-Graduação Lato Sensu na Universidade Vale do Rio Doce, atuando como coordenador do Curso de Pós-graduação Lato Sensu Especialização em Direito Civil e Processo Civil na Univale. Atua como pesquisador do OBIT – Observatório Interdisciplinar do Território, órgão vinculado ao PPG-*Stricto Sensu* no Mestrado Interdisciplinar em Gestão Integrada do Território, integrante do grupo de pesquisa História, Sociedade e Território. Atua também como Representante da 43ª Subseção da OAB/MG no Conselho Municipal de Defesa e Conservação do Meio Ambiente (Codema) de Governador Valadares/MG. Atua como Presidente da Câmara Técnica Institucional e Legal do Codema de Governador Valadares/MG.

Éder Rodrigues Batista

Possui Licenciatura Plena em Ciências Biológicas (2013) e mestrado em Engenharia Agrícola (2015) pela Universidade Federal de Mato Grosso, atual Universidade Federal de Rondonópolis – UFR. Tem experiência na área de Ciências Biológicas, atuando principalmente nos temas fixação biológica de nitrogênio simbiótica e associativa e indicadores microbiológicos de qualidade do solo. Trabalhou como pesquisador associado no Grupo de Pesquisa e Inovação em Sistemas Puros e Integrados de Produção Agropecuária (GPISI-UFR), onde desenvolveu pesquisas relacionadas à qualidade biológica do solo. Atualmente

curso doutorado em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras, no setor de Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do Solo.

Eduardo Roberto Alexandrino

Biólogo, com mestrado, doutorado e pós-doutorado em Ecologia Aplicada (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo). É pesquisador do Instituto Nacional da Mata Atlântica (INMA/MCTIC), e pesquisador colaborador do Laboratório de Ecologia, Manejo e Conservação de Fauna Silvestre – LEMaC da ESALQ/USP. Ao longo da carreira profissional sempre atuou em três frentes de trabalho: ensino, extensão e pesquisa científica, este último com forte base interdisciplinar, constituído principalmente pelos seguintes temas: Ornitologia, Aves em paisagens urbanas e agrícolas; Conservação de fauna em ambientes sob influência antrópica; Aves da Mata Atlântica; Fauna como ferramenta para avaliação de impactos ambientais; Estudos de Impactos Ambientais; Observação de aves como ferramenta para educação ambiental, turismo e promoção da ciência cidadã.

Eunice Sueli Nodari

Professora Titular da Universidade Federal de Santa Catarina. Possui graduação em História pela Universidade de Passo Fundo (1976), mestrado em História – *University of California* - Davis (1992), doutorado em História pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1999) e Pós-Doutorado na *Stanford University* – EUA (2015-2016), e na Universidade Federal de Minas Gerais (2016). Pesquisadora visitante no CESTA/Stanford University. Pesquisadora convidada do *Rachel Carson Center-LMU* em Munique – Alemanha (2019-2020). Foi membro do Grupo Gestor na UFSC do Programa CAPES/PrInt. Foi Presidente do Fórum de Pró-Reitores de Extensão das Universidades Públicas Brasileiras no período de maio de 2007 a junho de 2008. Diretora de Ensino de Graduação (2000-2004), Pró-Reitora de Cultura e Extensão (2004-2008) da UFSC, e coordenadora do Programa de Pós-Graduação em História da UFSC (2010-2015). Chefe do Departamento de História (2016 a 2019) Coordenadora do Doutorado Interdisciplinar em Ciências Humanas – Interinstitucional UFSC/UNIVALE (2017 a...) Subcoordenadora do Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Ciências Humanas (2018-2019). Atualmente é

coordenadora do Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Ciências Humanas. É coordenadora do Grupo de Pesquisa do CNPq do Laboratório de Imigração, Migração e História Ambiental (LABIMHA/UFSC). É bolsista em Produtividade em Pesquisa do CNPq. Orientadora de Mestrado e Doutorado no Programa de Pós-Graduação em História e no Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Ciências Humanas. Atua em rede com o KTH - Suécia e CESTA/Stanford. Tem experiência na área de História e na área Interdisciplinar em Ciências Humanas, com ênfase em História Ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: História Ambiental Global, desastres socioambientais, migrações ambientais, florestas; biodiversidade e *spatial history*.

Everlon Cid Rigobelo

Possui graduação em Agronomia pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal Unesp (2001), mestrado em Microbiologia Agropecuária pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal UNESP (2003) e doutorado em Microbiologia Agropecuária pela mesma instituição em (2006) e pós-doutorado no Laboratório de Genética de Bactérias do Departamento de Biologia Aplicada a Agropecuária. Durante o período de agosto de 2006 a outubro de 2013 foi docente do Campus Experimental de Dracena – UNESP e por concurso público do dia 11/10/2013 foi nomeado docente da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal – UNESP pertencendo ao Departamento de Produção Vegetal responsável pelas disciplinas de microbiologia do solo e microbiologia ambiental.

Fabricio Angelo Gabriel

Mestre em Engenharia Ambiental (2017) e Bacharel em Ciências Biológicas (2015) pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). As atividades de pesquisa em que atua se concentram na análise da contaminação e diagnóstico da qualidade ambiental dos sistemas aquáticos, incluindo avaliações de risco ecológico. Utilizando a abordagem de múltiplas linhas de evidência, vem desenvolvendo estudos sobre o impacto do rejeito de mineração na contaminação do sedimento, mudanças nas comunidades bentônicas e bioacumulação e desintoxicação de metais subcelulares na fauna estuarina.

Fernando Dini Andreote

Professor Associado em Microbiologia do Solo na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Engenheiro agrônomo e Doutor em Genética e Melhoramento de Plantas pela mesma instituição. Livre Docente em Biologia do Solo pela ESALQ/USP. Coordenador da Área de Microbiologia do Solo junto à Sociedade Brasileira de Microbiologia. Representa a *International Society for Microbial Ecology* (ISME) no Brasil, e é Membro Afiliado a Academia Brasileira de Ciências. Atua na área de Microbiologia do Solo e Ambiental, com enfoque em análises independentes de cultivo de comunidades microbianas. Estuda comunidades microbianas em áreas naturais, como os biomas Mata Atlântica, Caatinga e Manguezais, e em áreas de produção agrícola. Tem como objetivo principal gerar conhecimento para o desenvolvimento de uma agricultura mais produtiva e sustentável, tendo a biologia do solo como base de inovação.

Flávia Louzeiro Aguiar Santiago

Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal do Piauí (2013), Mestre em Agronomia Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal do Piauí (2015) e Doutora em Ciência do Solo, com ênfase em Microbiologia do Solo, na Universidade Federal de Lavras (2019). Fez parte de sua pesquisa de Doutorado na Cornell University, EUA, com destaque em estudos Metagenômicos e Ecologia do solo. Tem experiência em estudos de áreas degradadas, principalmente com indicadores biológicos e bioquímicos do solo em áreas de mineração com parcerias com setor privado (ITV). Atua também em áreas de Fertilidade do Solo, Manejo da Nutrição de Plantas e Microbiologia e Bioquímica do Solo, com destaques nos seguintes temas: bactérias diazotróficas, fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), diversidade de grupos funcionais do solo, metagenômica do solo e sustentabilidade agrícola.

Frederico Ferreira Fernandes

Biólogo (2012) e mestre em Biologia Animal (2015) ambos pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Atualmente é Doutorando no Programa de Pós-graduação em Ecologia da UFV, sendo integrante da rede de Pesquisas Terra-Água,

atuando na área de ecologia e genética da conservação e genética evolutiva em peixes na bacia do rio Doce. Tem experiência na área de citogenética e ecologia de Peixes neotropicais.

Haruf Salmen Espindola

Possui graduação em História pela Universidade Federal de Minas Gerais (1981), mestrado em História Política pela Universidade de Brasília (1988) e doutorado em História Econômica pela Universidade de São Paulo (2000). Atualmente é professor titular da Universidade Vale do Rio Doce – Univale, atuando no Curso de Direito e no Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Gestão Integrada do Território – GIT/Univale. Atualmente é Coordenador do Programa GIT/Univale e do Doutorado Interinstitucional – DINTER do Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina – PPGICH/UFSC, na receptora Univale. Foi Chefe de Departamento, Diretor de Faculdade e Pró-Reitor; atuou como membro da Conselho Diretor da Fundação Percival Farquhar, mantenedora da Univale. Na Gestão Pública ocupou o cargo de Presidente do Conselho Municipal do Patrimônio Histórico e Cultural; Secretário de Governo; e Secretário de Educação no Município de Governador Valadares. Na pesquisa dedico à Ciência Política, História Social e História Ambiental. Na Extensão Universitária atua no terceiro setor, campo do desenvolvimento territorial rural e da agroecologia, inclusive foi coordenador da ONG Centro Agroecológico Tamanduá, na qual é atualmente membro do Conselho Diretor.

Helder Barbosa Paulino

Graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1992), mestrado em Sistema de Produção pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1998) e doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2002). Atualmente é professor adjunto I da Universidade Federal de Goiás. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Fertilidade do Solo e Adubação, atuando principalmente nos seguintes temas: soja, solo, cerrada e feijão. Tem orientado alunos na área de educação e desenvolve projeto, desde 2003, para inclusão de pessoas carentes na universidade pública (Cursinho Pré-Vestibular ATTITUDE).

Helena Santiago Lima

Engenheira Agrônoma formada pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Mestre em Microbiologia Agrícola também pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Foi bolsista de iniciação científica pelo CNPq, durante esse período avaliou o impacto na diversidade microbiana, ocasionado pela conversão de áreas de floresta em pastagens na região da floresta amazônica. No mestrado desenvolveu projeto de pesquisa que visava avaliar a estrutura e função da comunidade microbiana como indicador do impacto ocasionado pela deposição do rejeito de mineração proveniente do rompimento da barragem do Fundão (Mariana-MG) sobre o solo. Tem experiência na área de Microbiologia, com ênfase em ecologia microbiana e bioinformática. Atualmente é estudante de doutorado em microbiologia agrícola, pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Hermano Melo Queiroz

Engenheiro Agrônomo formado pela Universidade Federal do Ceará em 2014, Mestre em Ciências do Solo, pela Universidade Federal do Ceará, atualmente Pós-graduando (Doutorando) pelo programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). Atua nas áreas de gênese, geoquímica de solo e gases de efeito estufa com foco em solos de ecossistemas costeiros.

Iesmy Elisa Gomes Mifarreg

Graduanda em Direito pela Universidade Vale do Rio Doce; Bolsista de Iniciação Científica pela Universidade Vale do Rio Doce.

Isabelle Gonçalves de Oliveira Prado

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Lavras (2013). Participou do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência - PIBID (2010). Foi aluna de Iniciação Voluntária e Iniciação Científica no laboratório de

Microbiologia do Solo da UFPA, onde realizou trabalhos na área de micologia com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e recuperação de solos degradados e contaminados com elementos-traço. Foi bolsista do Programa Ciência sem Fronteiras na Espanha e realizou estágio no departamento de Microbiologia na *Universitat de Barcelona* (2012-2013). Realizou mestrado (2014-2016) e doutorado (2016-2020) no Departamento de Microbiologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Desenvolveu habilidades de análises de genomas, ferramentas de bioinformática e pesquisa relacionada a diversidade fúngica em áreas degradadas. Realizou doutorado sanduíche na Université Laval em Quebec, Canada. Vem desenvolvendo trabalhos/pesquisas utilizando os microrganismos associados às plantas como aliados do processo de recuperação ambiental em áreas degradadas e áreas sob processo de revegetação.

Jessé Valentim dos Santos

Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Alagoas (2007), mestrado (2010) e doutorado (2014) em Microbiologia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras. Pós-doutorado na Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Setor de Biologia, Microbiologia e Processos Microbiológicos do Solo. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Microbiologia, Bioquímica e processos biológicos do solo. Tem atuando em pesquisas relacionadas ao uso do solo e seus efeitos sobre a microbiota, considerando tanto solos agrícolas como solos impactados/contaminados por atividades de mineração, incluindo-se áreas em processo de reabilitação. Os temas mais comuns são: biomassa microbiana, respiração do solo, atividades enzimáticas do solo, bactérias fixadoras de nitrogênio, fungos micorrízicos, atributos biológicos como indicadores da qualidade do solo e reabilitação de áreas degradadas. Foi professor substituto no Instituto federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG – Bambuí de Julho 2018 a Março de 2019, ministrando aulas nas disciplinas: Fitopatologia; Fruticultura; Gestão Ambiental; Culturas anuais e Defesa Fitossanitária. Atualmente é bolsista pós-doutorado em projeto VALE-UFPA, com avaliação de impactos do rejeito de mineração em áreas afetadas pelo rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho. E-mail: jessevalentim@gmail.com.

Josefa Clara Lafuente Monteiro

Possui graduação em Biologia e Geologia pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (2004) e mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais pela Universidade Federal de Ouro Preto (2008). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geologia Ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: resíduos da construção civil, gestão, patrimônio cultural e ambiental, turismo; educação ambiental; consciência ambiental, fluxo de base, bacias hidrográficas, relevo, unidades de conservação e análises espaciais utilizando geoprocessamento.

Leonardo Matos de Oliveira Mendes

Aluno de graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), formado como técnico em Mecânica Industrial pelo CEFET-MG. Atuou como estagiário no Laboratório de Interação Micro-organismo/Planta e Recuperação de Áreas Degradadas, órgão representado pela Professora Maria Rita Scotti Muzzi, do Departamento de Botânica da Unidade de Ensino Instituto de Ciências Biológicas (ICB) da UFMG por dois anos e participa desde 2016 do grupo de estudos em Agroecologia e Hortas Urbanas, Agroê, formado por estudantes da Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente trabalha como bolsista de Educação Ambiental no Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG. A sua linha de interesse e atuação está direcionada aos seguintes temas: 1- Recuperação de Áreas Degradadas com espécies nativas e/ou com sistemas agroflorestais; 2 - Ecologia da Vegetação; 3- Produção, divulgação, planejamento e desenvolvimento de hortas urbanas agroecológicas. 4- Educação ambiental e divulgação de práticas sustentáveis.

Lissandra Lopes Coelho Rocha

Possui graduação em Direito pela Faculdade de Direito do Vale do Rio Doce (1997) e mestrado em Direito pela Universidade Gama Filho (2007). Doutoranda do Programa Interdisciplinar em Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina e integrante do Laboratório de Imigração, Migração e História Ambiental (LABIMHA/UFSC). Foi coordenadora do Curso de Direito e Pró-Reitora Acadêmica da Univale. Atualmente é reitora da Universidade Vale do Rio

Doce. Atua como pesquisadora do OBIT – Observatório Interdisciplinar do Território, órgão vinculado ao PPG-Stricto Sensu no Mestrado Interdisciplinar em Gestão Integrada do Território, integrante do grupo de pesquisa História, Sociedade e Território trabalhando no projeto “Direito dos Desastres e a legislação brasileira: um estudo interdisciplinar das visibilidades e invisibilidades jurídicas nos desastres socioambientais”.

Marcelo Loures dos Santos

Atualmente é professor Associado II do Departamento de Educação da Universidade Federal de Ouro Preto, atua também como professor colaborador no Mestrado Profissional Educação e Docência (Promestre) da Faculdade de Educação da UFMG, na linha Educação do Campo. Doutor em Psicologia pela PUC-CAMPINAS (2009), realizou estágio pós-doutoral no Departamento de Psicologia Social da Universitat Autònoma de Barcelona sobre Metodologia de Produções Narrativas entre 2014 e 2015, com bolsa da Capes (processo 1922-14-9). Tem experiência em pesquisa, ensino e extensão em educação com enfoque em educação do campo, educação popular, agroecologia, democracia e metodologias participativas.

Marco Aurélio Carbone Carneiro

Graduado em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal de Lavras (1995), mestrado (1997) e doutorado (2000) em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) pela mesma Universidade. Atuou por 12 anos na Universidade Federal de Goiás/Campus de Jataí, lecionando na graduação as disciplinas de Matéria Orgânica do Solo e Conservação do Solo e na pós-graduação Microbiologia e Bioquímica do Solo. Foi orientador e coorientador de vários discentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Campus de Jataí e do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFG de Goiânia e supervisor de 3 bolsista pós doutorado na UFG (PRODOC e PNPD). Foi coordenador do projeto PROCAD-NF em parceria com ESALQ/USP e de vários projetos institucionais da UFG (CAPES, CNPQ e FINEP). Coordenador do Laboratório de Solos do Campus Jataí desde 2002, transformando-o em referência no sudoeste de Goiás. Foi presidente da Fundação Educacional de Jataí no ano de 2005, Assessor de Pesquisa da Direção do Campus Jataí no período de 2003 a 2006. Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFG Campus Jataí de 2006/2010 e 2011/2012.

Atuou como membro do conselho deliberativa da FUNAPE da UFG no biênio 2011/2012, liderou o grupo de pesquisa em “Geração de Tecnologia para o Bioma Cerrado” desde 2006 até 2012. Coordenou a Rede de Pesquisa em Fungos Micorrizicos Arbusculares no Bioma Cerrado que envolve 8 instituições do Centro-Oeste e financiada pelo CNPQ. Foi diretor regional do Centro-Oeste da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2010-2012). Em 2012 foi redistribuído para Universidade Federal de Lavras/Departamento de Ciência do solo. Atualmente atua nas disciplinas na graduação de Fertilidade do Solo e Biologia do Solo e na pós-graduação Microbiologia e Bioquímica do Solo. Foi membro do comitê interno do PIBIC da UFLA, externo da UFT, IF Goiano Campus Rio Verde e UFSJ. Participou como membro do comitê de avaliação Trienal da Capes 2010/2012. Foi coordenador adjunto do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFLA (2015). Atualmente é editor assistente da Revista Brasileira de Ciência do Solo e Diretor Executivo da Editora UFLA. Orienta discentes do ensino médio (PIBIC Jr), de graduação (IC) e pós-graduação (mestrado e doutorado) e supervisão de pós doutorado. Trabalha com indicadores biológicos e bioquímicos do solo em áreas de mineração com parcerias com setor privado (ITV, VALE e SAMARCO) e em Sistemas Integrados de Produção Agropecuário em parceria com instituições de pesquisa e ensino (EMBRAPA, UFMT e outras instituições).

Maria Celeste Reis Fernandes de Souza

Graduada em Pedagogia pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Carangola, FAFILE (1983), Mestre em Ciências de la Educación pelo Instituto Enrique José Varona, Havana. (2001), Doutora em Educação pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (2008) e realizou estágio de pós-doutoramento em educação na Universidade Federal de Sergipe UFS (2015). É professora do Programa de Pós-Graduação em Gestão Integrada do Território da Universidade Vale do Rio Doce - UNIVALE. Desenvolve trabalhos de ensino, pesquisa e extensão nos seguintes campos em interface com estudos sobre Território: Educação de Pessoas Jovens e Adultas, Letramento e Numeramento, Educação Integral/Tempo Integral, Gênero, Educação Ambiental, Relação com o Saber. Pesquisadora do Grupo de Pesquisa Núcleo Interdisciplinar de Educação, Saúde e Direitos – UNIVALE. Pesquisadora colaboradora dos Grupos de Pesquisa: Grupo de Estudos sobre Numeramento – GEN/UFMG e Educação e Contemporaneidade- EDUCON/UFS.

Maria Catarina Megumi Kasuya

Concluiu o doutorado em Agricultura – *Hokkaido University* em 1995. Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Viçosa. Publicou mais de 140 artigos em periódicos especializados e cerca de 280 trabalhos em anais de eventos. Possui 12 capítulos de livros. Editora de dois livros. Participou de eventos nacionais e internacionais. Coordenou a 6ª Conferência Internacional sobre Micorrizas em 2009. Orientou um total de 180 estudantes, incluindo BIC-Júnior, IC, MS e DS, além de supervisionar pos-doc. Entre 1986 e 2013 participou de 60 projetos de pesquisa, sendo que coordenou 36 destes. Atualmente coordena 3 projetos Institucionais e é coordenadora do Programa de Pós-graduação em Microbiologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Coordena convênio Institucional da UFV com a Universidade de Hokkaido, Universidade de Lisboa e Universidade de Laval, além de possuir projetos internacionais com a Universidade de Lisboa e Universidade de Laval e Museu Nacional de História Natural de Paris – França. Atua na área de Agronomia, com ênfase em Microbiologia e Bioquímica do Solo. As principais linhas de pesquisa são Associações micorrízicas e produção de cogumelos.

Maria Isabel Antunes-Rocha

Graduação em Psicologia pela Universidade Federal de Minas Gerais (1983), Mestrado em Psicologia Social pela Universidade Federal de Minas Gerais (1995) e Doutorado em Educação pela Universidade Federal de Minas Gerais (2004). Pós Doutorado pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho/Campus Presidente Prudente. Professora Associada da Faculdade de Educação/Universidade Federal de Minas Gerais. Coordena a Frente Educação e Mineração no âmbito do Programa Participa UFMG, o Núcleo de Estudos e Pesquisas em Educação do Campo (NEPCAMPO) e o Grupo de Estudos e Pesquisas em Representações Sociais – GERES). Desenvolve projetos de Ensino, Pesquisa e Extensão com ênfase na formação e prática de educadores em diferentes contextos campestres em diálogo com os referenciais teóricos da Educação do Campo e das Representações Sociais em Movimento. Atualmente é coordenadora de Projetos de pesquisa e extensão nas regiões atingidas pelo rompimento das Barragens do Fundão e de Brumadinho.

Maria Rita Scotti Muzzi

Professora da Universidade Federal de Minas Gerais, Nível Associado do departamento de Botânica onde leciona em nível graduação e pós-graduação, orientando alunos de mestrado e doutorado do Programa de Biologia Vegetal e Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da UFMG. Possui mestrado e Doutorado em Ciências Biológicas, na área aplicada à biologia do solo e Interação microrganismo/planta. A sua linha de pesquisa está direcionada aos seguintes temas: 1 Recuperação de áreas degradadas com espécies nativas em diferentes ecoregiões (Mata Atlântica, Campo rupeste, Cerrado, Floresta ripária, Caatinga arbórea e Cerrado) sob diferentes tipos de impacto (fogo, inundação, espécies invasoras, erosão, mineração). 2 Estudo de bactérias e fungos promotores do crescimento vegetal e da saúde do solo, com ênfase na fixação biológica de Nitrogênio e fungos micorrízicos. 3 Estudo de Indicadores físico-químicos e biológicos de qualidade de solo para aferição do grau de recuperação. Ciclagem de nutrientes, estudos de decomposição da matéria orgânica do solo e sequestro de Carbono. 4 Recuperação de espaços Urbanos. Site: <http://grupogera.eco.br>

Marisângela Viana Barbosa

Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns (UFRPE-UAG), (2010). Mestre em Produção Vegetal, Unidade Acadêmica de Serra Talada (UFRPE-UAST), fevereiro 2013. Doutorado/sanduiche em Ciência do Solo – UFLA, MG/Brasil e Instituto Nacional de Ciências Agrícolas - INCA / Cuba, fevereiro 2018. Cujas titulações estão relacionadas a pesquisa da Microbiologia Aplicada (biotecnologia), associada aos estudos da Ciência do Solo e Produção Vegetal. Atuando com pesquisa de prospecção de microrganismos do solo (rizosférico), endofíticos e em nodulíferas, bactérias e fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) em culturas como (*Saccharum officinarum* (spp.), *Vigna unguiculata*, *Phaseolus vulgaris*, e *Urochloa brizantha*). Realizando estudos de isolamento, crescimento e inoculação de grupos “específicos”, como: fixadores de nitrogênio atmosféricos, FMAs e microrganismos promotores do crescimento vegetal (produção de ácido indolacético e solubilizadores de fosfato) e suas aplicações na recuperação de áreas degradadas (sistema agroflorestal – SAF), produção vegetal e influência na agregação do solo. Atualmente, sou pesquisadora bolsista a nível de

pós-doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFPA, MG/Brasil. Vinculada ao projeto “Bioindicadores do solo em áreas de mineração de ferro em processo de reabilitação”, estudando os processos microbianos associados ao retorno dos serviços ecossistêmicos e sua importância na recuperação de áreas degradadas.

Marliane de Cássia Soares da Silva

Possui Bacharelado e Licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Viçosa. Com Mestrado e Doutorado em Microbiologia Agrícola, com parte do doutorado realizado na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa-Portugal. Tem experiência na área de Microbiologia, com ênfase em Microbiologia agrícola, atuando principalmente nos seguintes temas: fungos micorrízicos arbusculares, fungos ectomicorrízicos, bactérias fixadoras de nitrogênio, eucalipto, micropropagação, enzimas e estresse oxidativo, enriquecimento de cogumelos com selênio e lítio, produção de cogumelos em resíduos agroindustriais, biodisponibilidade de selênio, Biologia celular e molecular (PCR, DGGE, Metagenômica e sequenciamento de nova geração).

Mauro Augusto dos Santos

Doutor em Demografia pela Universidade Federal de Minas Gerais (2010). Possui graduação em Ciências Sociais, com ênfase em Sociologia, pela Universidade Federal de Minas Gerais (1997) e pós-graduação em Gestão de Micro e Pequenas Empresas pela Universidade Federal de Lavras (2002). Desenvolveu pesquisa de pós-doutoramento no Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa (2014) sobre o tema: migração de brasileiros para Portugal. É associado da Associação Brasileira de Estudos Populacionais (ABEP) e da *International Union for Scientific Studies of Population* (IUSSP). Atua desde 2010 como professor adjunto da Universidade Vale do Rio Doce (UNIVALE), lecionando no Mestrado em Gestão Integrada do Território e em cursos de graduação. Coordenou o Programa de Mestrado em Gestão Integrada do Território de fevereiro de 2016 a fevereiro de 2017. Tem experiência na área de Demografia e Sociologia, atuando principalmente nos seguintes temas: migração, população e meio ambiente, planejamento regional e métodos de pesquisa.

Mirelli Borges Medeiros

Possui graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (1997), pós-graduação em Plantas Ornamentais e Paisagismo pela Universidade Federal de Lavras (2007), pós-graduação em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído pela UFMG (2013), Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável pela UFMG (2016). Possui experiência docente e em projetos de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo. Atualmente, é pesquisadora no Laboratório da Paisagem, membro do Grupo de Pesquisa em Desenho Ambiental, membro do Grupo de Estudos em Recuperação Ambiental e doutoranda no Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da UFMG.

Moacir de Souza Dias Junior

Possui graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (1979), mestrado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1983) e doutorado em Crop And Soil Sciences – *Michigan State University* (1994). Professor Titular. Chefe do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Mecânicas dos Solos, atuando principalmente nos seguintes temas: compactação do solo, pressão de pré-consolidação, modelagem da compactação do solo, compressibilidade, colheita florestal mecanizada e cafeicultura.

Natália Maria de Freitas Vicente

Sou bacharel (2006) e licenciada (2008) em Ciências Biológicas pela Universidade Vale do Rio Doce (UNIVALE), mestre (2011) e doutora (2015) em entomologia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). No mestrado, trabalhei com sistemática de percevejos (Miridae - Hemiptera). No doutorado, desenvolvi estudos em filogenia molecular, biogeografia, taxonomia integrativa e evolução acústica de um grupo de grilos neotropicais (Orthoptera - Gryllidae - Eneopterinae), fazendo parte de meus estudos no *Museum d'Histoire Naturelle* em Paris, França. Atualmente, sou bolsista CAPES em estágio pós-doutoral no

departamento de Biologia Geral da UFV, e trabalho em parceria com a rede de pesquisa Terra-Água na busca da identificação e restauração dos impactos ambientais/sociais do rompimento da barragem de “Fundão”, na bacia do rio Doce. Tenho experiência em entomologia, sistemática, genética e biogeografia. E-mail: natalliavicentte@gmail.com

Neucir Szinwelski

Professor adjunto B na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) e responsável pelas disciplinas de Ecologia (geral e dos ecossistemas) e Gestão Ambiental nos cursos de graduação em Ciências Biológicas (licenciatura e bacharelado). Coordenador do Laboratório de Orthoptera, e orientador no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade da Unioeste campus de Foz do Iguaçu. Graduado em Ciências Biológicas (licenciatura) pela Faculdade União das Américas, mestre em Biologia Animal pela Universidade Federal de Viçosa, doutor em Entomologia pela Universidade Federal de Viçosa (bolsista CNPq), e pós-doutor em Ecologia, pela Universidade Federal de Viçosa.

Paulo Prates Júnior

Natural de Caculé – Bahia, onde foi alfabetizado pelo pai e professor, em uma escola multisseriada. Formou-se como Técnico Agrícola pela Escola Agrotécnica de Guanambi/BA. Mudou-se para Salvador e cursou Ciências Biológicas na Universidade Federal da Bahia (UFBA), aprendendo com seus tios, Carmelo, Silvinha e Norminha, a gostar de Samba, MPB e Forró. Atuou no grupo Organismo, no Movimento Estudantil e no Raízes do Semiárido. Foi contemplado com ações afirmativas da UFBA para ser monitor de Zoologia. Em seguida foi estagiário no Laboratório de Ecologia Nutricional de Insetos e no Laboratório de Ecologia da Polinização, bem como foi monitor na disciplina Recursos Genéticos Vegetais. Desempenhou atividades no Laboratório de Fitopatologia da EBDA (Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola S/A), e lá descobriu os nossos amigos pouco visíveis, os microrganismos. Na Universidade Federal de Viçosa (UFV) cursou o mestrado em Agroecologia e encontrou pessoas adoráveis. Apaixonou-se pela UFV e permaneceu para cursar o doutorado em Microbiologia Agrícola. O compromisso social assimilado na UFBA permitiu atuar como cofundador do Café com Agroecologia e do Núcleo de Estudos em Microbiologia Agrícola (NEMA). Atualmente é pós-doutorando no Departamento

de Microbiologia da UFV e trabalha na seleção de microrganismos benéficos para a produção de mudas, visando a recuperação da bacia do rio Doce. Encanta-se com projetos de pesquisa, ensino e extensão, cujos quais incluem Interações Ecológicas, Evolução, Agroecologia, Microbiologia do Solo, Epistemologia e Divulgação Científica. É cismado e sonhador. Gosta de conversas e de silêncios. Segue discreto e se perguntando se o essencial é invisível aos olhos.

Priscilla Bitencourt Freitas

Possui graduação em Ciências Sociais pela Universidade de São Paulo (2001) e mestrado em Sociologia Política pela Universidade Federal de Santa Catarina (2005). Doutorado em Sociologia Política pelo Programa de Pós-Graduação em Sociologia Política da Universidade Federal de Santa Catarina (2016). Pesquisa e atua nos temas: Sociologia ambiental crítica, Desenvolvimento sustentável, Justiça ambiental, relação humano-natureza, relações rural-urbano, impactos do rompimento da barragem do Fundão (Mariana, MG) nas escolas do campo da bacia do Rio Doce (em projeto de pesquisa das universidades Federal de Minas Gerais/NEPCAMPO e Federal de Ouro Preto/GIRACAMPO).

Renata Bernardes Faria Campos

Graduada (licenciatura e bacharelado) em Biologia (1999), Mestre (2002) e Doutora (2008) em Entomologia pela Universidade Federal de Viçosa. Tem experiência em docência e pesquisa na área de Ecologia (com ênfase em Ecologia de Comunidades em Matas Ciliares) e Educação (Formação de Professores, Educação Ambiental e Ensino de Ciências). Foi bolsista PNPB institucional no programa de Pós-Graduação em Ecologia de Biomas Tropicais da UFOP (2012 a 2014) e atualmente é professora pesquisadora no Núcleo de Ciências e Tecnologia da Universidade do Vale do Rio Doce onde também integra o grupo de professores do Programa de Pós Graduação Stricto Sensu em Gestão Integrada do Território. Desenvolve trabalhos de ensino, pesquisa e extensão nos seguintes campos em interface com estudos sobre Território: Ecologia, Educação Ambiental, Conflitos socioambientais. Pesquisadora do Grupo de Pesquisa Núcleo Interdisciplinar de Educação, Saúde e Direitos – UNIVALE.

Renato Saldanha Bastos

Atualmente, encontro-me em estágio de Pós-doutoramento na Universidade Federal de Lavras (UFLA) no Departamento de Solos. Leciono Química nos cursos Técnicos Integrados de Administração, Informática e Mecânica; Metodologia de Pesquisa nos cursos Técnicos Integrados de Informática e Mecânica e estou como Professor responsável pela disciplina Fundamentos de Pesquisa em Ensino de Ciências e Matemática do curso de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Natureza e Matemática no Campus Avançado de Três Corações do IFSul de Minas Gerais. Doutorei-me em Química Orgânica, tendo como área de atuação Síntese Orgânica, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2011. Conclui o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) em 2003. Licenciiei-me em Química pela Fundação Técnico-Educacional Souza Marques em 2003. Graduei-me em Engenharia Agrônoma pela (UFV) em 1999.

Samuel Lourenço Silva

Tem experiência na área de Botânica, com ênfase em Recuperação de Áreas Degradadas.

Samuel Perpétuo Rodrigues

Possui graduação em Jornalismo pela Universidade Federal de Ouro Preto (2016) com bolsa do Programa Ciência sem Fronteiras – *College of Dunaujváros*, DUF, Hungria (2014). Tem experiência como jornalismo em interface com o desenvolvimento rural sustentável, tecnologias sociais e recuperação ambiental, tendo atuado no desenvolvimento e execução das ações de comunicação institucional, campanhas de comunicação interna, relacionamento com fornecedores e assessoria de imprensa. Já participou de mobilização de produtores rurais para Recuperação de Nascentes e educação ambiental, aplicando metodologias de Diagnóstico Participativo. Cursa mestrando em Gestão Integrada do Território pela Universidade Vale do Rio Doce – UNIVALE, onde pesquisa relações de poder ligados a pesquisas com ciência cidadã.

Sérvio Pontes Ribeiro

Possui graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Minas Gerais (1989), mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre pela Universidade Federal de Minas Gerais (1993) e doutorado em *Ecology – Imperial College at Silwood Park, University of London* (1998). É colaborador do *Smithsonian Tropical Research Institute*, Panamá, sendo Membro fundador do projeto internacional IBISCA (*Investigating the biodiversity of Insects in Soil and Canopy*), e membro do Comitê Consultivo do projeto *Arthropod Initiative* do CTFS (*Centre of Tropical Forest Science*). É membro fundador do *Azorean Biodiversity Group*, ligado à Universidade de Ciências Agrárias dos Açores, com a qual mantém vínculo de pesquisa. Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Ouro Preto. É orientador nos Programas de Pós-Graduação em Ecologia da UNICAMP (nota 7), UFV (nota 4) e UFOP (nota 3) e do Programa em Ciências Biológicas (nota 5) do NUPEB-UFOP. Também é listado orientador no Programa de Doutorado em Ciências Naturais/Entomologia, da Universidad de Panama, Panamá. Desenvolve paralelamente iniciativas de divulgação científica e diálogos científicos com a sociedade, com ênfase no conceito de florestas urbanas, através dos Projetos Clube da Ciência/Corsário da Ciência, em Belo Horizonte. Tem experiência na área de Ecologia, com ênfase em Evolução de Interações entre Insetos e Plantas, atuando principalmente nos seguintes temas: Ecologia Evolutiva e Interações inseto-planta em dosséis florestais, Biomas arbóreos tropicais, Insetos Herbívoros, Formigas e mosaicos territoriais em dossel, bioindicação de áreas degradadas, *Ecohealth* e ecologia evolutiva de parasitismo. Atua no momento em ecologia do adoecimento, com foco na competência vetorial de insetos hematófagos, ecologia das relações *Leishmania-Lutzomya-homem* em ecossistemas florestais e urbanos, e distribuição de *Culicidae* vetores ou não de arboviroses. Coordenador do Grupo de Pesquisa no Diretório CNPQ “Ecohealth: Interações parasita-hospedeiro e ecologia das infecções”, e Pesquisador CNPq 1D, pela Ecologia. Foi idealizador, um dos criadores e por duas vezes coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Biomas Tropicais. Também é um dos idealizadores e proponentes da criação do Departamento de Biodiversidade, Evolução e Meio Ambiente do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas da UFOP, concebido a fim de gerar uma identidade institucional do grupo de pesquisadores envolvidos com pesquisa e ensino em evolução, ecologia, genética, botânica e zoologia.

Stael Alvarenga

Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela ESCOLA DE ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (1974), mestrado em URBAN DESIGN - OXFORD POLYTECHNIC (1980) e doutorado em ARQUITETURA E URBANISMO pela UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (2004). Atualmente é professor associado IV da Universidade Federal de Minas Gerais. Coordena o Grupo de Pesquisa em Desenho Ambiental do CNPq e o Laboratório da Paisagem vinculado ao Departamento de Urbanismo e ao PACPS desde 2008. É vice Presidente da Rede Lusófona de Morfologia Urbana desde 2015. Tem experiência na área de Arquitetura e Urbanismo, com ênfase em Planejamento e Projeto do Espaço Urbano, atuando principalmente nos seguintes temas: Morfologia Urbana, Paisagem Urbana, Desenho Urbano, Percepção do Ambiente Construído.

Stephânia Avila

Engenheira química, pelo Centro Universitário Newton de Paiva com formação técnica em petroquímica e química ambiental.

Tiago Osório Ferreira

Graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de São Carlos (UFScar, 1999), mestrado (2002) e doutorado (2006) em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) pela Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Realizou parte do doutorado no exterior junto a *Universidad de Santiago de Compostela* (USC-Espanha, 2005). Atuou como Professor Adjunto na Universidade Federal do Ceará (UFC) de 2006 a 2012, e desde 2013 é Professor Doutor do Departamento de Ciência do Solo da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Obteve o título de Livre-Docente em Pedologia junto à ESALQ/USP em fevereiro de 2020. É bolsista de produtividade CNPq nível 1D, vice-coordenador do curso de especialização em Gerenciamento Ambiental e vice-coordenador do PPG em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ-USP. Desde 2014 é representante do Departamento de Ciência do Solo junto à Comissão de Graduação e é membro da comissão coordenadora

do curso de Gestão Ambiental na ESALQ-USP. Membro do corpo editorial da Revista Ciência Agronômica, Revista Scientia Agricola e da Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente, assessor ad-hoc de agências de fomento (CNPq, INSA, FACEPE, FAPESP) e revisor de periódicos científicos nacionais e internacionais. Tem experiência na área de agronomia, ciência do solo, atuando principalmente nos seguintes temas: gênese de solos, geoquímica de solos, pedogênese, biogeoquímica de solos de ambientes estuarinos, solos de áreas úmidas costeiras. Orientou em nível de graduação (iniciação científica, docência e extensão), especialização e pós graduação 96 alunos e supervisionou 4 pós-doutoramentos. Atualmente orienta 7 alunos de doutorado, 2 alunos de iniciação científica e 1 aluno em projeto de extensão, além de supervisionar 4 pós-doutoramentos. Coordena o grupo de pesquisas em geoquímica e pedologia, o qual possui forte internacionalização com parcerias na *Universidad de Santiago de Compostela* (Espanha), *Oregon State University* (EUA), *Southern Cross University* (Australia), *University of California* (EUA) e *Texas A&M University* (EUA).

Tomas Jansen Lacerda

Aluno de graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atua como estagiário curricular não obrigatório no Laboratório de Interação Micro-organismo/Planta e Recuperação de Áreas Degradadas, orientado pela Professora Maria Rita Scotti Muzzi, do Departamento de Botânica da Unidade de Ensino Instituto de Ciências Biológicas (ICB) da UFMG. A sua linha de atuação está direcionada aos seguintes temas: 1- Recuperação de Áreas Degradadas com espécies nativas e/ou com sistemas agroflorestais. 2- Conservação da biocenose do solo através de interações microorganismos-planta 3- Produção, planejamento e manejo de hortas urbanas agroecológicas, através do Grupo de Estudos em Agroecologia e Hortas Urbanas Agroê, formado por estudantes do curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Wendel Coura Vital

Possui graduação em Farmácia/Análises Clínicas pela Universidade Federal de Ouro Preto (2003), mestrado em Ciências Biológicas/Parasitologia pela Universidade Federal de Ouro Preto (2007), doutorado em Parasitologia na área de Epidemiologia das Doenças Infecciosas e Parasitárias pela Universidade Federal de Minas Gerais (2011), estágio Pós-doutoral

pelo Instituto de Biologia Molecular e Celular da Universidade do Porto (2011) e Pós-doutorando no Programa de Infectologia e Medicina Tropical da Universidade Federal de Minas Gerais (2015). Atualmente é professor adjunto do Departamento de Análises Clínicas da Escola de Farmácia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). É vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas (CIPHARMA), no Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas (CBIOL/NUPEB) da Universidade Federal de Ouro Preto. Suas linhas de pesquisa são principalmente relacionadas a epidemiologia das doenças infecto parasitárias. Possui experiência profissional na área de Epidemiologia, Saúde Coletiva e Hematologia, atuando principalmente na epidemiologia da leishmaniose visceral. E-mail: wendelcoura@ufop.edu.br.



ISBN: 978-65-86561-16-6



9 786586 156116 6