

# **Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecno solos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG.**

## **Historical scenario, physiography and strategies for environmental rehabilitation of the landscape affected by the Fundão Dam breaking accident at Mariana, Minas Gerais State.**

Carlos Ernesto G. Reynaud Schaefer<sup>1</sup>, Eliana Elizabet dos Santos<sup>2</sup>, Caetano Marciano de Souza<sup>3</sup>, José Damato Neto<sup>4</sup>, Elpidio Inácio Fernandes Filho<sup>5</sup>, Caroline Delpupo<sup>6</sup>

### **RESUMO**

Uma análise do contexto histórico, ainda que muito preliminar, indica a continuidade de processos geradores de passivo da exploração mineral que remontam aos tempos de colonização. O desastre motiva e urge a busca por formas mais sustentáveis de mineração, conjugando o imperativo econômico às necessidades e demandas sociais e ambientais, tornando um desafio o exercício de conciliação a ser buscado. Tal parece ser um cenário absolutamente impositivo agora, para todos os atores envolvidos. O simplismo de apontar culpados, num teatro tão complexo de causas e efeitos possíveis e factuais, parece-nos temerário num primeiro momento. O quadro fisiográfico onde se insere a Barragem do Fundão revela diversos fatores que predis põem a eventos de rompimento e deslizamentos: solos rasos, relevo muito declivoso e drenagem encaixada e fortemente controlada por falhas e fraturas, sismicidade regional ponderável, combinada à heterogeneidade litológica, em que se alternam substratos muito alteráveis com outros muito resistentes; alterações hidrológicas causadas pelo rebaixamento de lençol. Um conjunto razoável de atributos naturais que ressaltam riscos potenciais. Face ao imenso passivo gerado, medidas reparadoras ou alternativas técnicas podem ser buscadas, e no que tange aos solos afetados, verdadeiros tecno solos, algumas

<sup>1</sup> Professor Titular Pedologia e Geomorfologia, UFV, MG

<sup>2</sup> Doutoranda Departamento de Solos, UFV, MG

<sup>3</sup> Professor Associado, Departamento de Fitotecnia, UFV, MG

<sup>4</sup> Doutorando, Departamento de Fitotecnia, UFV, MG

<sup>5</sup> Professor Associado, Geoprocessamento, Departamento de Solos, UFV, MG

<sup>6</sup> Pos-Doutora, Departamento de UFV, MG

estratégias são propostas neste trabalho. Sua aplicabilidade e possíveis adaptações só serão conhecidas através de pesquisa, que se possa traduzir em rápida e segura reversão dos ambientes afetados para um estado minimamente restaurado, com potencial agropecuário e ecológico mais próximos de uma condição ideal.

**Palavras-chave:** tecnossolos, mineração de ferro, restauração ambiental

## ABSTRACT

The analysis of the historical context of the Fundão Dam accident, albeit much preliminary, indicates the continuity of processes that generate mining liabilities that go back to the times of colonization. The disaster motivates and urges the search for more sustainable forms of mining, combining the economic imperative with social and environmental needs and demands, making the reconciliation exercise a challenge to be sought. This seems to be an absolutely imposing scenario now for all the actors involved. The simplicity of pointing legal liability in such a complex theater of possible and factual causes and effects seems reckless at first. The physiographic features of the Fundão Dam reveals several factors that predispose to the breakage and landslide events: shallow soils, deep weathering, very steep slope and deep drainage incision, strongly controlled by faults and fractures; significant regional seismicity, combined with lithological heterogeneity; very weatherable substrates alternating with very resistant ones; hydrological and hydrographic changes caused by the lowering of the water table and changing drainage patterns. A large combination of natural attributes that highlight potential risks. In view of the immense liability generated, remediation measures or technical alternatives can be sought. With regard to the affected soils, true technosols, some strategies are proposed in this work. Its applicability and possible adaptations will only be known through research, which can translate into a quick and safe reversion from the affected environments to a minimally restored state, with agricultural and ecological potential closer to an ideal condition.

**Keywords:** technosols, iron mining, environmental restoration

## Quadro histórico da degradação ambiental na região

Desde o século XVII e na infância da Capitania de Minas, a economia mineira centrou-se em grande parte na exploração mineral. Neste sentido, como bem destaca Filgueiras (2007), tal atividade dependia, e ainda depende, de conhecimentos científicos precisos em diversas disciplinas: quais sejam química, mineralogia, geologia, hidrologia, metalurgia, engenharia de minas. De um saber garimpeiro inicialmente puramente empírico, nos aluviões e rios auríferos, passou-se pouco a pouco a uma técnica mineradora, passando-se então às grupiarias, montes e veios, de ouro ou de diamantes. A mineração sempre foi uma atividade cercada do imponderável, e influenciada por muitas variáveis complexas.

Em 5 de Novembro de 2105, às 15:30 horas, a Barragem de contenção de rejeitos do Fundão rompeu-se, espalhando uma gigantesca avalanche ou onda de lama com mais de 34 milhões de m<sup>3</sup> por todo o eixo do sistema hidrográfico do Gualaxo do Norte, Carmo e Rio Doce, parte do qual represado na UHE de Candonga. Neste acidente, de proporções inéditas, repetia-se uma lógica inaugurada desde os tempos coloniais. Na *Minas Gerais* setecentista, a prática da mineração já se valia do desmonte e represamento das águas (Gonçalves, 2007), tanto para por a seco o cascalho rico, quanto para desviar as águas nas *levadas* (canais), permitindo lavar o minério nos altos. Era uma atividade de escala mais local. Lamas geradas nesses ciclos antigos se espalharam e dispersaram, menos concentradas, por todos os rios da Capitania, como pode ser visto ao longo das cabeceiras do Carmo e do Rio das Velhas, onde até hoje se vêem pilhas de cascalhos abandonados nas planícies devastadas pela busca do ouro. Tal degradação minerária itinerante, denunciada pioneiramente por Vieira Couto (1799) como insustentável, só evoluiria muito lentamente até as fases derradeiras do ciclo do ouro.

Em 1769, um português radicado no Arraial da Piedade, já requisitava permissão real para abrir-se uma fábrica de ferro em Minas, reconhecendo a opulência ferrífera das terras mineiras (*apud* Gonçalves, 2007). Quando se pensou o aproveitamento do ferro, notadamente tão abundante, advertiu o ouvidor José Francisco Pessanha (em 1777) uma preocupação claramente ambiental: *“ocorre-me porém o grande inconveniente do consumo da madeiras para subsistir a fábrica de ferro, visto não haver carvão de pedra”*. Somente o Intendente dos Diamantes, Sr. Câmara, já em 1814, obteria pela primeira vez o ferro gusa, fundido em alto forno, na fábrica do Morro do Pilar, em que se empregou técnicas afro-brasileiras. Era o embrião da siderurgia brasileira.

Com o tempo, e o advento e desenvolvimento da economia mineral ferrífera, outros problemas ganhariam maior relevo. Um deles, o que fazer dos imensos rejeitos gerados na escala gigantesca da exploração? No beneficiamento a úmido, o que fazer da lama: como e onde barrá-la. Minerar é gerar passivos, o que é incontornável, e cercado de riscos. Sedimentos decorrentes da atividade minerária já se acumulavam nos rios e montanhas de Minas desde o final dos seiscentos, generalizando nos setecentos. Foi o Rio do Carmo, em suas nascentes em Mariana, o primeiro grande garimpo de ouro do Brasil. Parece um destino recorrente e previsível que tenha sido na primeira bacia explorada que tenha ocorrido o maior desastre conhecido. Não é invenção moderna.

Neste trabalho buscou-se coligar os fatos e repercussões associados ao acidente da Barragem do Fundão, em Mariana, procurando ilustrar aspectos fisiográficos pouco discutidos, bem como avançar na proposição de algumas estratégias de recuperação ambiental possíveis. Caminhos existem, e já estão sendo buscados. O destino mineral do território das Minas Gerais é inquestionável; urge conciliar seus ricos ganhos com sistemas mais seguros, que possam minimizar os riscos. Evitá-los, de todo, não parece factível.

## Um quadro fisiográfico que predis põe a fenômenos de movimentação da massa de solos

### Geologia e Geomorfologia

A região mais afetada, do sistema Gualaxo do Norte-Carmo, compreende parte importante das cabeceiras do Rio Doce, cuja bacia se estende por mais de 83.400 km<sup>2</sup>, dos quais 86% em MG e apenas 14% no ES (CPRM, 2015). A barragem de contenção de rejeitos do Fundão se localizava num grande anfiteatro de sopé montanhoso, que recebe as águas de diversos córregos e nascentes formadores dos Rios Gualaxo e do Carmo, entre o Bloco Montanhoso do Caraça e a Serra de Antônio Pereira e o Alto de Conta História (Figura 1). A região possui três compartimentos de Relevo principais, discutidos na seção seguinte, dentro de uma ênfase geoambiental e geossistêmica. O quadro geológico e geomorfológico regional foi bem sintetizado pelos trabalhos coligidos de Strauch (1955); RADAMBRASIL (1983; 1987) Souza e Saadi (1994) e Souza (1995), que representam importantes balizamentos para a discussão deste trabalho (Figura 1). Na parte superior, predomina um relevo estrutural, com cristas montanhosas, escarpas e restos erodidos de Planaltos elevados, constituindo o Bloco Quadrilátero Ferrífero, com altitudes que atingem 2.000 m, com forte controle geotectônico das sequências Arqueanas e Paleoproterozoicas. Este compartimento forma os contrafortes dos afluentes da margem esquerda da Bacia do Rio Doce (Rio do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, etc). Estes rios entalharam vales profundos, bem encaixados, ou mesmo cânions, seccionando em linha W/E as estruturas tectônicas NE/SW, principais (Figuras 1 e 2; Tabela 1).

Logo abaixo deste compartimento, tem-se uma zona de Cristas Alinhadas que conectam os Blocos elevados ao mar de morros, a jusante. Representa um geoambiente de transição, sendo o mais instável de todos. Ali se situam os sistemas de barragens de rejeito (Figura 2) afetados pelo desastre.

Logo abaixo deste compartimento, ocorre um Planalto Dissecado de 600-900 metros, embasado em rochas metamórficas, principalmente gnaisses e xistos, com dissecação homogênea de aparência geral de “mares de

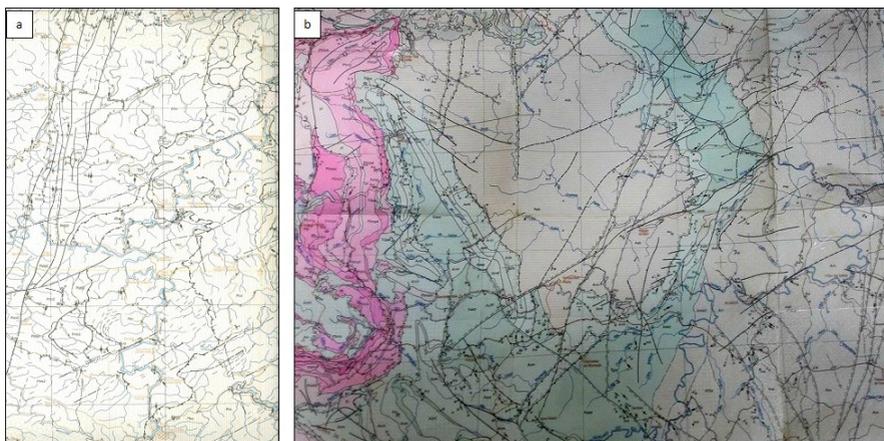


Figura 1: Esboço geológico da área de estudo segundo (a) CPRM (1993) e (b) DORR (1959).

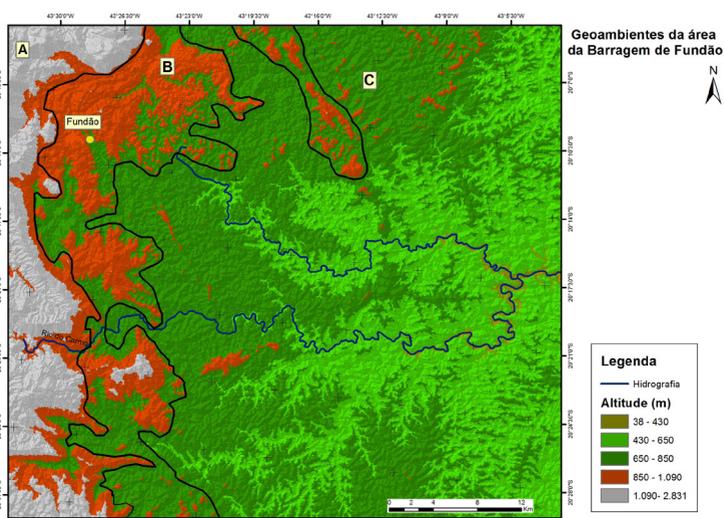


Figura 2: Modelo Digital de Elevação da área de estudo e Geoambientes Escarpas e Serranias da Borda Leste do Quadrilátero Ferrífero (A); Cristas Alinhadas e Encostas dissecadas do Planalto Superior, com Vales Encaixados (B); e Marres de Morros e Colinas (C).

<b>Unidade Geoambiental</b>	<b>Escarpas e Serranias da Borda Leste do Quadrilátero Ferrífero</b>	<b>Cristas Alinhadas e Encostas dissecadas do Planalto Superior, com Vales Encaixados</b>	<b>Marres de Morros e Colinas</b>
<b>Geologia/tectônica</b>	Quartzitos, Itabiritos, Cangas e Quartzos-Xistos; zona de sismicidade regular	Filitos, cloritaxistos e platôs de cangas; zona de sismicidade regular	Gnaisses, xistos profundamente alterados (saprolitos profundos)
<b>Relevo</b>	Escarpado, controlado pela estrutura; vales encaixados e profundos	Cristas e encostas alinhadas	Dissecação homogênea em saprolitos em Morros e colinas; zona deprimida
<b>Solos</b>	Afloramentos rochosos (canga, quartzitos) ou Neossolos Litólicos	Cambissolos Húmicos, Distróficos e Neossolos Litólicos	Cambissolos Distróficos e Latossolos Vermelho-Amar e los Distróficos, com Cambissolos nas calhas dos Rios do Carmo e Doce
<b>Uso e Cobertura</b>	Complexo Rupestre	Pastagens e amplos Remanescentes fragmentados de Mata Atlântica	Pastagens e Capineiras e plantio nos terraços fluviais
<b>Hidrologia</b>	Rios encaixados sob controle geotectônico, falhas e fraturas, encachoeirados; ausência de planícies/terraços significativos	Canais retilíneos, encaixados, com terraços muito incipientes; drenagem controlada pela geotectônica, mas com início de desenvolvimento de planícies e alvéolos	Canais meandantes, trechos com terraços e planícies marginais, ou moderadamente encaixadas. vales mais amplos, remansos e lagoas marginais

Tabela 1: Unidades Geoambientais da área afetada pela Barragem do Fundão.

morros”, embora algumas áreas possuam cristas mais salientes, em rochas mais resistentes.

Mais a leste, fora da área destacada em tela, inicia-se a depressão do Médio Rio Doce, com relevos colinosos e suavizados de altitudes variando de 600 a menos de 170 metros na região de Governador Valadares. Essas colinas e morrotes são embasadas predominantemente por gnaisses do Complexo Piedade, cuja área central foi rebaixada tectonicamente, onde o Rio Doce forma um mundo de lagos.

O curso do Rio Gualaxo do Norte, no setor da barragem do Fundão, é totalmente adaptado às falhas ou contatos geológicos de grande extensão (Figura 2), perfeitamente ilustradas no Mapa da CPRM (1993), Folha Mariana. Uma grande falha de empurrão controla os baixos cursos dos córregos Santarém, Mirandinha e Quebra Vara, que confluem para a planície aluvial de Bento Rodrigues. Os corpos de minério de Ferro explorados são paralelos a estas estruturas rúpteis, que devem ter controlado sua gênese. Uma comprovação é que o minério é sobreposto por espessa capa de canga laterítica retrabalhada (CPRM, 1993), sugerindo certa inversão de relevo. Na área adjacente, tem-se a Bacia Terciária do Fonseca, claramente soerguida no Quaternário. Uma movimentação recente, portanto. A direção das falhas (NW/SE) coincide com a direção dos contatos, exacerbando fraquezas estruturais antigas.

O esvaziamento do minério nas cavas adjacentes às barragens devem impor fluxos hidrológicos novos, esvaziamentos ou infiltrações de aquíferos, ou alívios de carga. Tudo isso tem efeitos pouco previsíveis e raramente monitorados. Esta zona intercala rochas de resistências ao intemperismo muito desiguais: quartzitos, quartzitos ferruginosos e xistos sericíticos do Paleoproterozoico, além de itabiritos profundamente decompostos e cobertos de canga. E clorita xistos e quartzitos Arqueanos (Grupo Nova Lima). Estas rochas formam os relevos mais acidentados e erodidos. Mais abaixo, os gnaisses tonalíticos e rochas granitizadas dominam os mares de morros mais homogêneos, com rochas muito mais alteradas e um domínio geológico mais estável.

Em síntese, a simples locação da barragem denuncia riscos potenciais, mas difíceis de prever com alguma certeza. Além disso, trata-se de zona sísmica, reconhecida há muito desde Gorceix (1884), e corroborado por Saadi (1996, 2001), em extenso estudo técnico regional, bem como Mello (1997), explicando a gênese das lagoas do médio Rio Doce. Assim, o sismógrafo da USP detectou seis sismos de baixa magnitude, entre 13:00 e 16:00, com epicentros localizados nas imediações da Barragem (USP, Folha de São Paulo, 6 Nov). Alguns precedem o rompimento.

## Hidrografia

O sistema hidrográfico possui setores claramente diferenciados pela progressiva redução da declividade, com valores superiores a 0,5% no trecho superior, decrescendo para 0,1% na região de Barra Longa até Candonga. No Geoambiente mais elevado, acima da barragem, os rios são fortemente encaixados, possuindo correntes de alta energia e praticamente sem planícies fluviais significativas. A Barragem do Fundão fica localizada num anfiteatro erosivo apertado, nos sopés das Serras do Batatal e do Coqueiro, que conectam o Bloco Montanhoso do Caraça a Serra de Antônio Pereira. Área naturalmente instável, pelo forte gradiente topográfico. Cicatrizes de deslizamentos de grande magnitude ocorrem em todas as encostas. Denunciam uma suscetibilidade a movimentos de massa de causas naturais. Os Cambissolos (solos rasos) dominantes contribuem muito para isso. No Geoambiente seguinte, mesmo com a redução da declividade, boa parte dos rios corre sobre substrato rochoso, e as planícies estão restritas a alvéolos reduzidos, onde a sedimentação é muito limitada. Um desses alvéolos, o maior e mais espreado, ficava Bento Rodrigues. Ali o efeito da avalanche foi devastador. Os rios são encaixados, e correm sob forte controle geotectônico. Os depósitos de lama da barragem foram abrigados nas encostas e sopés de morros e cristas, sendo altamente instáveis. Nos mares de morros, geoambiente seguinte, os rios já possuem declividades menores (0,1%) com acentuação de meandros e vales de fundo mais plano, onde se desenvolvem planícies mais amplas, e terraços, que abrigaram boa parte da lama que desceu, até a Barragem de Candonga. Observa-se o padrão florestado original, e drenagens meandranes controladas por falhas e fraturas, condicionando os fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais. Toda essa paisagem foi rapidamente suprimida, e substituída por um sistema deposicional artificial, com forte carga sedimentar em curto prazo, suportada pelo barramento e pelas sucessivas elevações. Para agravar o quadro, ocorre ainda um gigantesco volume de lama remanescente (cerca de 2 milhões de m<sup>3</sup>, ou 10% do volume que efetivamente desceu até Candonga),

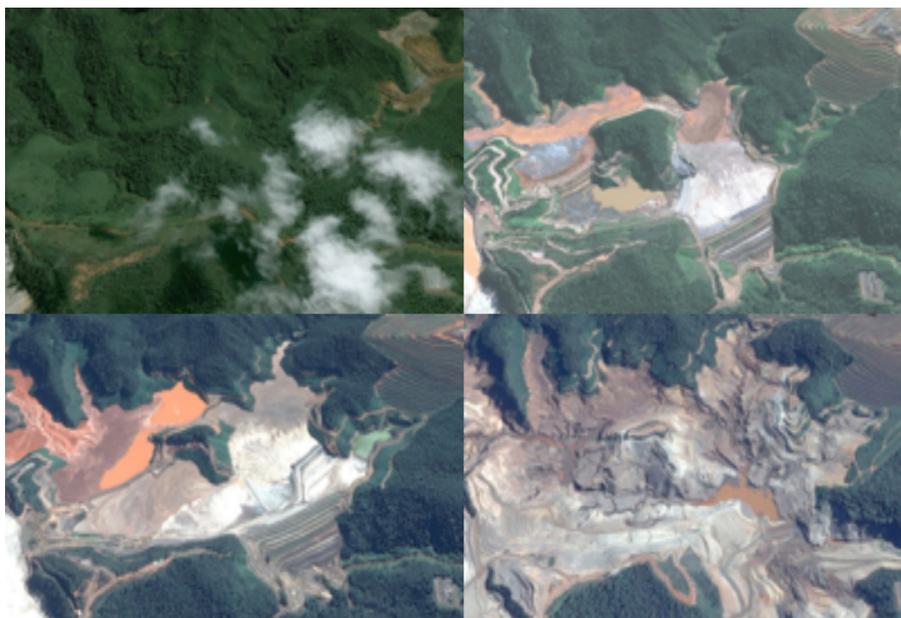


Figura 3: Sequencia cronológica de imagens da área da Barragem de Fundão, na data imediatamente anterior à sua implantação (2005), e sua ampliação sucessiva (2011, 2015) até os momentos seguintes ao desastre (Dez 2015) respectivamente.

retido precariamente nos taludes e depressões internas na barragem esvaziada, cujo melhor destino parece ser um rápido preenchimento que o recobra totalmente, permitindo recompor a configuração da microbacia original. Em seguida, deve-se proceder uma recomposição edáfica, com topsoil argiloso e adição de matéria orgânica, com revegetação da cobertura de Mata de Candeia, típica da região. Com isso, evitar-se-á a reincidência de processos erosivos. Um modelo esquemático detalha melhor a proposição do cenário de recuperação ambiental (Figura 4).

Acidentes do tipo suscitam questões mais imediatas, vinculadas à forte degradação da paisagem: rios, planícies fluviais, terraços áreas rurais habitadas, estruturas, pontes animais, coletividades, zonas urbanas e todo um modo de vida e um tecido social descontinuado ou irremediavelmente perdido. Neste sentido, convém refletir que a

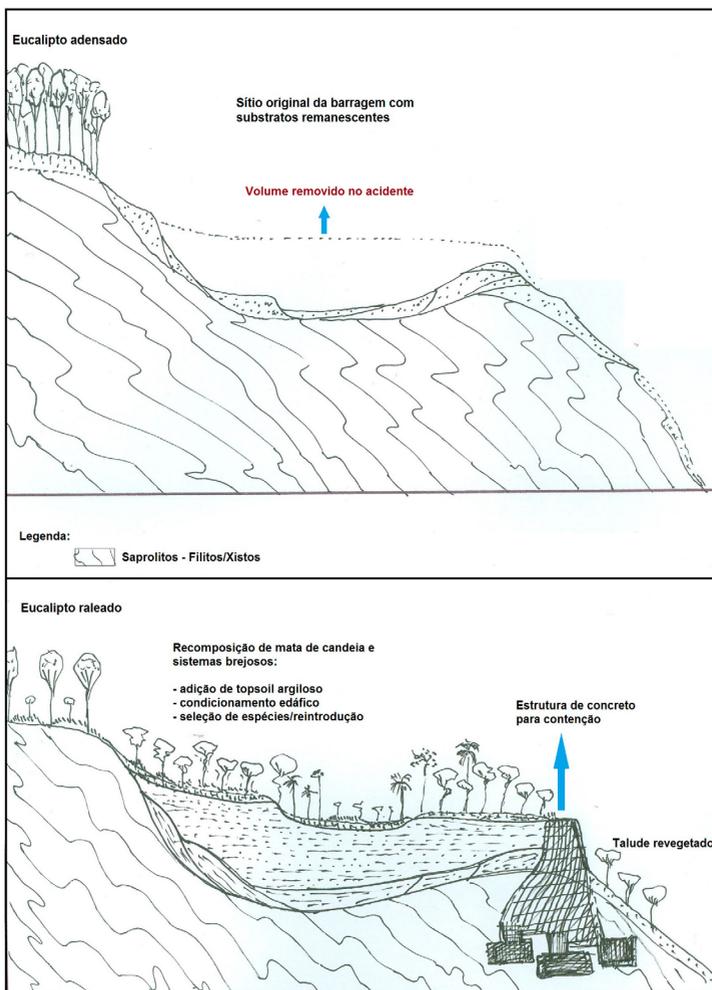


Figura 4: Cenário atual do sítio da Barragem do Fundão (A) e após o enchimento proposto e plano de recomposição da microbacia e paisagem associada (B); (A) a linha pontilhada ilustra o volume de material que extravazou a barragem, bem como o grande volume de lama ainda retido nos taludes e depressões em seus limites, exacerbando fenômenos erosivos; (B) após a contenção estruturada da nova barragem, a paisagem será recomposta com deposição de topsoil argiloso e condicionamento edáfico (químico, físico e biológico), reintroduzindo espécies da Mata de Candeia, típica do entorno. O plano prevê a contenção total do material remanescente, e a restauração ecossistêmica ampla, à partir de um desenho experimental, a ser conduzido previamente.

própria região onde se localizam as barragens apresenta um quadro impróprio para sua escolha inicial para locação: sismicidade histórica comprovada (SAADI, 2001), zona geológica extremamente falhada, com falhas inversas e de baixo ângulo, relevo acentuado, com rios fortemente encaixados, solos rasos sobre mantos de intemperismo de profundidade variável (rasos nos quartzitos; profundos, nos filitos e xistos).

O quadro preliminar do desastre permite desvendar o quadro ambiental complexo, plano de fundo para uma melhor compreensão dos fatos, em que se sobrepõem condicionantes fisiográficos desfavoráveis, e um certo descontrole de processos de execução e fiscalização. Um conjunto de imagens que comparam o quadro fisiográfico anterior e posterior ao evento, permitem ilustrar e detalhar aspectos importantes (Figura 5)

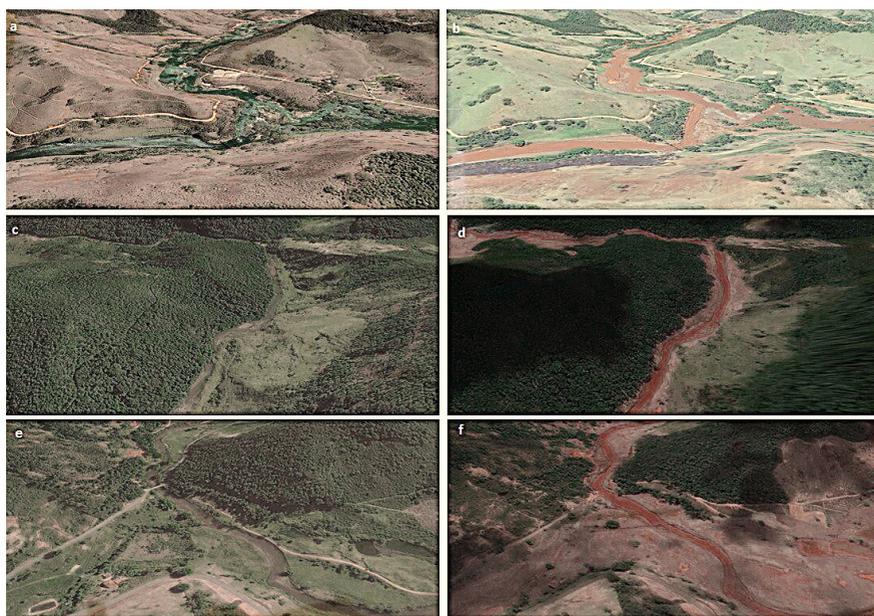


Figura 5: Imagens de satélite da área de estudo antes e depois o desastre. Encontro do Rio do Carmo com Rio Doce, em setembro de 2011 (a) e 11 de novembro de 2015 (b). Matas Ciliares em junho de 2015 (c) e novembro de 2015 (d). Ponte do Rio Gualaxo do Norte em junho de 2015 (e) e 12 de Novembro de 2015 (f).

Em meio à miríade de problemas que decorrem, é próprio de uma tragédia como essa uma reflexão sobre nosso papel na natureza, e do quão vulnerável estamos a eventos de desastre que trazem consequências imponderáveis sobre tantas facetas socioambientais. Em termos práticos, o desastre da Barragem do Fundão evidenciou a morte e a destruição em sua face mais temível: muitas vidas humanas perdidas, milhares de animais aquáticos e terrestres mortos, uma Bacia Hidrográfica essencial para Minas e Espírito Santo, diretamente e fortemente afetada em sua integridade ambiental. A ruptura repentina gerou o deslocamento de uma onda desproporcional de rejeito que galgou a barragem de Santarém, a jusante, e desceu de forma avassaladora pelos rios Gualaxo e Carmo até atingir a barragem de Candonga, onde boa parte ficou represada, após extravasar um volume ainda gigantesco, mas preso à calha do rio Doce. Neste trecho de montante desde a barragem e Candonga, por mais de 95 km, boa parte das margens dos terraços baixos, até 4 metros de altura, e toda planície fluvial e leito menor foram recobertos ou assoreados por um imenso volume de rejeito, atingindo profundidade máxima de até 200 cm de material, além de galhos e restos orgânicos mais leves (Figura 6).

Toda essa dimensão trágica é, contudo, indutora imediata da busca de soluções técnicas e medidas práticas que podem alavancar o processo de recuperação. Para tanto, numa primeira etapa é preciso mensurar e conhecer o desastre em todas suas facetas e detalhes. Num plano mais óbvio e imediato, águas e leito menores dos rios foram diretamente impactados, e estudos hidrológicos, sedimentológicos e de ictiofauna foram imediatamente implementados. Em suas margens, porém, o rastro de destruição da onda de rejeitos criou um ambiente inóspito, inteiramente novo: uma antiga planície fluvial outrora intensamente cultivada ou pastejada, e agora recoberta por um lençol de sedimentos estranhos à Bacia, que suprimiram as áreas ribeirinhas mais nobres, onde o uso consolidado com cultivo de roças e pastagens representavam o panorama típico. Além disso, os poucos fragmentos residuais de Mata Atlântica ripária, já tão empobrecidos, agora reduzidos e sem conectividade.

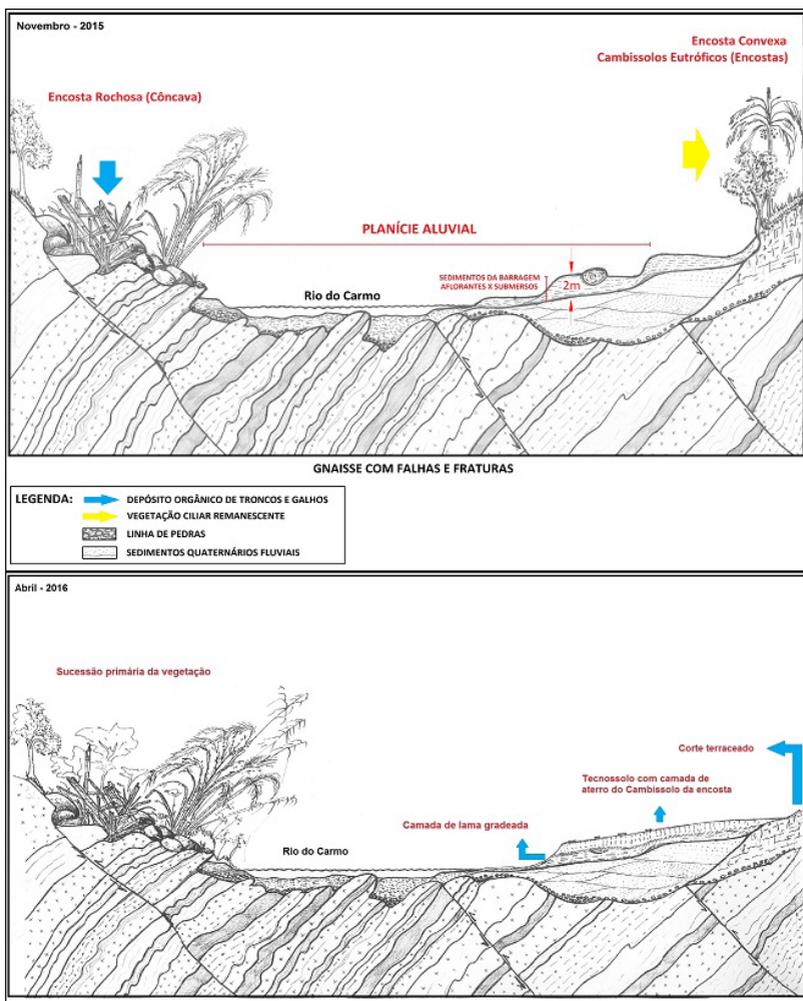


Figura 6: Perfil esquemático do depósito de lama proveniente do rompimento da barragem e Tecnossolos em seu estágio zero de evolução - cenário imediatamente após o desastre (Novembro – 2015). Corte e aterro das encostas vizinhas para promover a formação de um novo terraço e Tecnossolo com melhores características físicas e químicas (Depósito de Cambissolo sobre lama gradeada). Cenário atual quatro meses após o desastre (Abril – 2016). Fazenda Porto Alegre. Fonte: Schaefer et al. (2016).

Nossa abordagem enfatiza os aspectos dos solos das zonas ribeirinhas afetadas do sistema Gualaxo - Carmo - Doce, mais severamente afetado. O enfoque escolhido é o cenário e destino da imensa quantidade de rejeito que extravasou o leito menor dos rios e ocupou suas margens, até atingir Candonga, nela grande parte do rejeito foi represada. Sua dimensão, sua quantificação e sua repercussão ambiental, serão o destaque. Um rejeito complexo: areia, silte, argila e restos orgânicos – tudo junto e misturado, com pouca seleção. A abordagem escolhida parte da premissa de que o conceito de Tecnossolos pode balizar a busca de soluções para fatos tão pouco comuns aos problemas habituais de recuperação de solos degradados. Um rejeito complexo: areia, silte, argila e restos orgânicos – tudo junto e misturado, com pouca seleção, e natureza mineralógica única, decorrente de resíduos de mineração e seu tratamento.

Tal aporte repentino resultou no completo desaparecimento e assoreamento das várzeas mais baixas e em profundas mudanças nos terraços, que foram enterrados por volume de sedimentos “tecnogênicos” de origem minerária gerando um quadro degradado onde tecnossolos são a nova realidade. Tecnossolos praticamente estéreis, em forte contraste com os antigos Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Cambissolos, na maioria eutróficos, que sustentavam a paisagem ribeirinha, e hoje truncados e enterrados. Neste novo cenário, tem-se uma oportunidade para acompanhar, de maneira pioneira, transformações pedogenéticas em um novo solo artificial, desprovido de estrutura e com teores muito baixos de matéria orgânica.

## **A natureza da lama**

Ao longo do trecho impactado pela deposição, foram procedidas coletas de material de sedimento e dos solos artificiais e outros afetados, e procedidas análises de rotina química e física (EMBRAPA, 1997), para uma primeira visão da fertilidade natural já relatadas por Schaefer et al. (2016), e discutidas a seguir. Embora tais análises sejam usualmente destinadas ao diagnóstico da fertilidade e à prescrição

de corretivos e adubação, servem também como indicadores da qualidade ambiental do solo artificial criado pelo desastre.

De maneira geral, a lama depositada como Tecno solo é quimicamente pobre, embora os problemas físicos pareçam maiores que os químicos para a recuperação ambiental. Os valores de densidade do solo ao longo de todo o trecho ribeirinho, determinados logo após o desastre, mostraram faixa variável de 0,94 a 2,38 g/cm<sup>3</sup> com média de 1,41 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 2). Os valores extremos são muito altos e a situação aparentemente se agravou com a passagem da estação chuvosa e quente (verão), quatro meses após o desastre, pois houve assentamento e selamento do solo (*hard-setting*) formando uma crosta duríssima à penetração.

A densidade do solo (lama) foi extremamente variável com média de 1,41 g/cm<sup>3</sup> em superfície e 1,54 g/cm<sup>3</sup> na lama enterrada com valores de desvio padrão de 0,53 a 0,52, respectivamente (Tabela 2). A densidade de partícula é bem mais elevada pela natureza do minério de ferro que possui alta massa específica 2,75 g/cm<sup>3</sup> (superfície) 2,80 g/cm<sup>3</sup> (enterrada) e menor desvio padrão 0,29 g/cm<sup>3</sup> e 0,23 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente (Tabela 2).

O material de lama possui CTC muito baixa, sendo praticamente destituído de carga elétrica negativa, como pode ser avaliado pelo ΔpH positivo (diferença entre pH KCl e pH em H<sub>2</sub>O) que indica um substrato com carga líquida positiva, típico de materiais oxídicos muito intemperizados e semelhantes à solos e materiais de canga ferrífera do Quadrilátero (Schaefer et al., 2015) (média pH KCl = 6,25, média pH em água = 5,69). Os valores de pH tendem a ser relativamente elevados não devido à presença de bases (Ca, Mg), que é baixa, mas sim à aproximação do Ponto de Carga Zero dos óxidos de Ferro (próximo da neutralidade), que predominam nesses substratos tão intemperizados (Tabela 2).

Já os solos enterrados (Neossolos Flúvicos e/ou Cambissolos) mostram valores de pH em água bem maiores que pH KCl, e portanto, CTC e carga líquida negativa. A CTC média da lama é muito baixa (2,96) e os solos do entorno possuem valores maiores,

com destaque para os Cambissolos das encostas. O Alumínio trocável é praticamente nulo em todos os solos e o teor de MO foram baixos e pouco variáveis, tendo em vista que os solos adjacentes foram “truncados” pela erosão antes da deposição da lama, perdendo todo o horizonte A mais rico em matéria orgânica. A lama possui teor de P extraível por Melich mais alto (média 9,34 mg/dm<sup>3</sup>) que os Cambissolos/ Argissolos (5,38 mg/dm<sup>3</sup>) e menores que os Neossolos Flúvicos/Gleissolos (11,05 mg/dm<sup>3</sup>). São teores relativamente altos, e devem refletir a intensa mistura do material com os solos superficiais arrastados pela erosão na passagem da onda de lama. Os teores de Na são maiores na lama, e devem refletir efeitos do tratamento do minério.

**Tabela 2: Quadro síntese de Análises químicas e físicas de 65 amostras de lama e solos afetados pelo desastre. Adaptado de Schaefer et al. (2016).**

Análises		Tecnosolo (lama)		Neossolo Flúvico		Cambissolo	
		Média	Desvio Pad.	Média	Desvio Pad.	Média	Desvio Pad.
pH	H <sub>2</sub> O	5,69	0,19	5,65	0,19	5,77	0,15
	KCl	6,25	1,25	4,91	0,6	4,6	0,3
P		9,34	3,48	11,05	24,5	5,38	3,97
K	mg/dm <sup>3</sup>	18,43	22	15,87	12,32	46,67	62,81
Na		11,61	11,98	5,23	4,62	4,88	8,91
Ca <sup>2+</sup>		1,45	0,69	1,61	0,99	1,76	1,44
Mg <sup>2+</sup>		0,34	0,48	0,57	0,43	0,48	0,37
Al <sup>3+</sup>		0,016	0,07	0,07	0,15	0,14	0,22
H+Al	cmol./dm <sup>3</sup>	1,06	1,33	1,53	1,07	3,28	1,23
CTC (T)		2,96	2,09	3,78	1,54	5,67	2,3
MO	dag/kg	0,91	1,54	0,85	0,69	1,42	1,03
P-rem	mg/L	28,68	11,07	29,57	11,2	24	9,4
Fe		499,2	476,01	610,3	528,28	604,72	556,04
Pb	mg/dm <sup>3</sup>	0,41	0,44	0,73	1,38	1,57	1,45
Areia Grossa		0,16	0,18	0,24	0,21	0,26	0,08
Areia Fina		0,33	0,19	0,36	0,21	0,2	0,08
Silte	kg/kg	0,32	0,18	0,16	0,1	0,14	0,07
Argila		0,18	0,17	0,23	0,19	0,39	0,11
Dens. Solo		1,41	0,53	–	–	–	–
Dens. Solo		1,54	0,42	–	–	–	–
profundidade							
Dens.Part	g/cm <sup>3</sup>	2,75	0,29	–	–	–	–
Dens.Part.		2,8	0,23	–	–	–	–
Profundidade							

No campo, observa-se um intenso e generalizado selamento superficial, agravado pela erosão preferencial do material fino, mais dispersável, deixando um substrato residual rico em areia fina e silte, altamente compactado (*hard-setting*), constituindo um entrave à recuperação natural sem alguma intervenção. Quase cinco meses após o desastre, a lama compactada permanece em um cenário fisicamente pobre à revegetação (Figura 7).



Figura 7: Paisagem da área em estudo no mês do desastre (a e b) e cinco meses depois (c e d).

### **Medidas de recuperação e cenário prognóstico nas áreas cultivadas**

Para exemplificar os processos de recuperação em curso, escolheu-se a maior área de Tecno solos, de cerca de 11 ha de terra de várzea soterrada pela “lama”, pertence à fazenda Porto Alegre, voltada à pecuária leiteira de alto rendimento, com muitas instalações de currais e ordenhas severamente afetadas pela inundação e soterramento. Imediatamente após o acidente, o proprietário

solicitou junto à SAMARCO o empenho na redução imediata dos prejuízos e foi traçado um plano de recuperação das áreas atingidas. Foi sugerido pelo grupo da UFV que o material tecnogênico (lama) fosse recoberto com uma camada de solo fértil oriunda do entorno, o que foi imediatamente implementado com apoio da SAMARCO. Foi realizada gradagem prévia da lama que se encontrava assentada e selada, com uma camada de 10 cm de solo solto para permitir romper o selamento natural do material de alta densidade e resistente à penetração. Após essa etapa de gradagem, foi depositado cerca de 50 cm de solo fértil devidamente sistematizado e nivelado, permitindo recompor o terraço original (Figura 3). Os resultados finais parecem muito promissores e revelam a exequibilidade de estender a prática à boa parte da área afetada.

Nas encostas onde foi desaterrado o material de solo eutrófico, foi evitada a exposição do saprolito e tomadas medidas de recomposição dos taludes para minimizar os processos erosivos. Já estão sendo implantadas pastagens e capineiras nos locais, e estamos iniciando a montagem de um experimento para comparar os Tecnoossolos e os diferentes tratamentos para sua recuperação produtiva. Para isso, a propriedade destinou uma área experimental para que a UFV realize ensaio de acompanhamento das mudanças físicas, químicas e biológicas com diferentes tratamentos de material, com e sem sobreposição do solo. O projeto trabalha com a dimensão conceitual de Tecnoossolos, ou seja: solos que se desenvolvem de substratos decorrentes da atividade antrópica, inclusive da mineração, e que podem sofrer intervenções visando a recuperação da qualidade.

Para ser considerado um Tecnoossolo, o solo artificial deve conter mais de 20% de material tecnogênico nos primeiros 100 cm (IUSS Working Group WRB 2006), e embora sejam mais comuns em áreas urbanas, tem sido cada vez mais detectados em larga escala em áreas rurais, onde representam as maiores áreas contaminadas do planeta (ROSSITER, 2007). Uma das principais aplicações dos estudos de Tecnoossolos tem sido sua recuperação para permitir o uso sustentável e livre de riscos maiores. Assim, estudos diagnósticos dos tecnoossolos da área afetada, fornecem o modelo ideal para sua recuperação, como denotam estudos recentes com ênfase na Matéria Orgânica (ZIKELI et al., 2002; HOWARD e OLSZEWSKA, 2010) transformações minerais e geoquímicas (UZAROWICZ e SKIBA,

2011); recuperação de estrutura e funções ecológicas (MONSERIE et al., 2009; SERE et al., 2010).

### **Restaurar Vegetação nas Áreas de Preservação Permanente**

Além dos Tecno solos gerados pelo desastre, e perdas de áreas cultivadas, houve uma perda igualmente significativa da vegetação nas áreas de preservação permanentes (APP's) no trecho estudado. Segundo IBAMA (nota técnica) houve destruição parcial ou total de 1469 ha ao longo de 77 km de cursos d'água, em boa parte APP's. O avanço da gigantesca onda de lama logo após o desastre praticamente devastou ou arrancou a totalidade de indivíduos arbóreos mais próximos à calha dos rios com exceção dos bambuzais que se curvaram ou quebraram sem sofrer arranque total. O soterramento concomitante do solo, banco de semente e plantas mais jovens ou de menor porte, comprometeu severamente a sucessão vegetal. Áreas mais críticas irão necessitar de um amplo e integrado Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). Neste sentido, o cercamento das áreas ribeirinhas já afetadas pode auxiliar sobremaneira a recuperação da vegetação ciliar aberta pelo desastre, considerando ainda um contexto anterior pouco vegetado. Quatro meses depois, contudo, o simples cercamento e isolamento de acesso aos animais às áreas afetadas pelo desastre, se mostrou eficaz para a recuperação, mesmo que de forma incipiente da área. Tais medidas se associadas a outras intervenções diretas que acelerem e facilitem a sucessão inicial representam grande potencial de recuperação para a área em estudo. A prioridade deve ser dada a espécies nativas de rápido crescimento, típicas de sucessão inicial, que permitam criar (ou recriar) os gradientes ambientais dos solos preexistentes, facilitando a entrada de espécies mais tardias da Mata Atlântica, com capacidade para sustentar a fauna ribeirinha igualmente arrasada pelo desastre. Todo um trabalho com espécies facilitadoras deve ser buscado, a fim de se identificar as espécies de maior resiliência e adaptação aos Tecno solos gerados. Em termos de suprimento de recursos, estudos de performance comparada da sucessão vegetal nos dois cenários de Tecno solos (com e sem lama exposta), devem ser realizados. A conexão dos Fragmentos deve ser buscada para facilitar a reintrodução de espécies localmente extintas. Imaginar uma restauração ecológica ao nível pré-desastre, com

heterogeneidade ambiental prístina, talvez não seja realmente factível, dada a complexidade das perdas correlatas de todo o sistema afetado (macrofauna, mesofauna, solos, nascentes, afluentes menores). Contudo, os paradigmas da restauração ecológica contemporâneo visam, substancialmente, a integridade, resiliência e sustentabilidade dos ecossistemas (Martins et al., 2105). Assim, a área em estudo, notadamente no trecho Candonga – Fundão, representa grande potencial de aplicação de técnicas de recuperação de áreas degradadas destinadas a tais finalidades. Ressalta-se que uma característica marcante das regiões intertropicais do planeta é sua capacidade de recuperar-se ante distúrbios; nesse mister, a ciência de solos pode ser uma grande mediadora que concilie os imperativos da recuperação, em suas dimensões física e biótica, de forma mais integrada e harmoniosa. O exercício de recuperação ambiental na área em estudo por si só representa diversos benefícios às comunidades locais, independentemente de seu alcance, haja vista a magnitude do desastre. Por fim, frutos positivos como lições educativas desta tragédia, perdurarão como modelo de superação brasileiro para situações de igual complexidade.

### **Corrigindo o passivo a partir de outros resíduos da cadeia produtiva**

Além das técnicas de correção física e química dos tecnossolos gerados, alternativas podem ser buscadas. Trabalho desenvolvido em conjunto pelo doutorando José Damato Neto e UFV parte do pressuposto de que é possível integrar a cadeia de produção de ferro e aço, da qual fazem parte a mineração, a produção de carvão e a siderurgia, de tal forma que os diferentes setores integrantes da cadeia compartilhem, entre si, a busca de soluções de problemas e passivos ambientais inerentes à mesma. Para estes pesquisadores, a siderurgia do ferro e do aço é dependente basicamente de dois segmentos: mineração (produção do minério de ferro como fonte deste elemento) e carbonização (produção de carvão vegetal usado como fonte energética e como redutor do ferro) (Figura 8). Todos os setores da economia, que formam a base da cadeia produtiva, geram resíduos. Assim, a questão levantada é: seria possível que o

segmento produção de carvão e a siderurgia possam ser agentes na recuperação das áreas atingidas pela mineração e/ou seus rejeitos? Ou, mais especificamente, a siderurgia e a produção de carvão poderiam auxiliar na recuperação das áreas de Tecnessolos resultante do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana/MG?

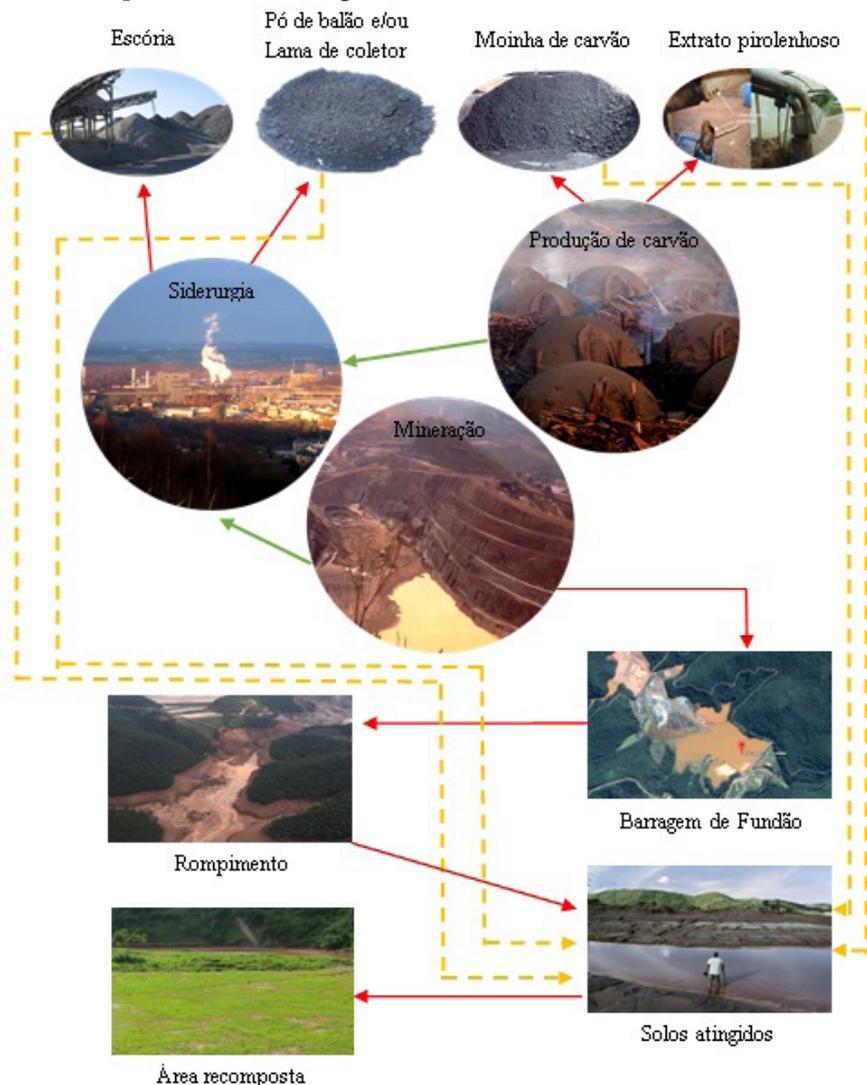


Figura 8: Integração entre o setor siderúrgico e de produção de minério e carvão vegetal e suas respectivas gerações de resíduos.

O crescimento industrial tem provocado a geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. Embora a palavra “resíduo” possa subentender que o material seja de má qualidade, em muitas situações os resíduos apresentam potencial para uso em outras atividades, auxiliando inclusive na conservação do ambiente (pela diminuição da necessidade de extração de produtos naturais) e na economia de fontes de energia, por exemplo.

Os tecnossolos (materiais de solo) formados ao longo da área afetada, à semelhança da grande maioria dos solos brasileiros, apresentam baixa fertilidade natural, necessitando de correção de acidez e de aportes externos de nutrientes. A utilização de “materiais não convencionais” torna-se promissora, devido à crescente elevação dos custos para aquisição e aplicação de corretivos e fertilizantes minerais, que levam os agricultores a procurar meios diferenciados de manejo agrícola, com intuito de reduzir despesas.

Entre os materiais resultantes de processos industriais, com potencial de uso na recuperação de áreas degradadas, como no caso em questão, podem ser citados o extrato pirolenhoso, a moinha de carvão, a escória siderúrgica, o pó de balão e a lama de coletor. Resultantes do processo de produção de carvão vegetal, o extrato pirolenhoso e a moinha de carvão apresentam grande capacidade de condicionar o solo, favorecendo o desenvolvimento das plantas além de apresentar efeito significativo no aumento do enraizamento. Por parte da siderurgia, a escória siderúrgica, o pó de balão e a lama de coletor são os resíduos mais importantes em volume. Representam fontes de nutrientes essenciais, carbono orgânico e de silício, sendo as escórias siderúrgicas corretivos da acidez do solo, apresentando ainda vantagens comparativas ao uso dos calcários naturais. O pó de balão e a lama de coletor obtiveram liberação ambiental de uso em Minas Gerais pela Deliberação Normativa COPAM 115/2008.

Ao longo dos anos, vários trabalhos de pesquisa foram feitos e vários resultados positivos do uso destes materiais, foram encontrados, tanto no Brasil, quanto no exterior. O extrato pirolenhoso foi estudado por uma série de pesquisadores podendo-se citar entre eles os trabalhos de Myasaka (2001), que obteve melhorias nos atributos físicos e químicos

dos solos, aumento na população microbiana (entre eles actinomicetes e fungos micorrízicos) favorecendo a disponibilização dos nutrientes para as plantas. Gomes *et al.* (1991) relatam que obtiveram melhor enraizamento e crescimento de mudas quando fizeram uso de moinha de carvão em substrato. As escórias siderúrgicas, por seu turno, cujos componentes neutralizantes da acidez são os silicatos de cálcio e de magnésio, apresentam comportamento semelhante aos calcários no que se refere à correção da acidez do solo (GOMES *et al.*, 1965; CAMARGO, 1972). Esses materiais podem ser até mais eficientes que os calcários devido à maior solubilidade dos silicatos comparada à dos carbonatos, além de fornecerem o elemento silício, entre outras vantagens. Lima (2003) relatou que o uso de pó de balão na agricultura promoveu aumento do teor de nutrientes no solo, enquanto Silva (2007) verificou que a aplicação de pó de balão e lama de coletor não resultaram, em seu experimento, em alterações na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, e nem nos teores de elementos contaminantes, tanto no solo quanto nas coleções hídricas superficiais e subterrâneas.

Desta forma, a proposta de Souza e Damato Neto prioriza a sinergia e fortalecimento dos agentes envolvidos na cadeia produtiva do ferro e do aço, utilizando resíduos das atividades de carbonização e siderúrgica na recuperação do Tecno solo resultante do rompimento da barragem de Fundão (Mariana/MG).

O Brasil detém um dos maiores complexos siderúrgicos instalados na América Latina, com destaque para a antiga Companhia Siderúrgica Belgo Mineira (hoje grupo Arcelor), a ACESITA (atualmente APERAM) e a USIMINAS. Para dar suporte ao segmento desta forte atividade, estão associadas empresas de mineração, com destaque para a Companhia Vale, SAMARCO, entre outras, e empresas reflorestadoras, que cultivam eucalipto para fornecer matéria-prima, tanto para as indústrias de produção de carvão (para as siderurgias), quanto para celulose. Todo esse complexo industrial é responsável por grande parte das exportações brasileiras de minério de ferro e aço, sendo, portanto, de grande importância para a região onde

estão instaladas (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010), para o estado de Minas e, evidentemente, para o Brasil.

A atividade de mineração, produção de carvão e siderurgia são setores muito importantes para a Companhia Vale e são dependentes uns dos outros. Assim, este trabalho visa ainda utilizar resíduos finos de carvão (moinha de carvão, pó de balão e lama de coletor como “finos de carvão”); extrato pirolenhoso; e escória siderúrgica para recuperação dos solos atingidos pela lama da Barragem de Fundão da mineradora SAMARCO.

O experimento deverá ser conduzido segundo algumas diretrizes. Primeiro, a área afetada será subdividida em 3 subáreas, respeitando a granulometria do material depositado. Nesses 3 ambientes serão retirados no total 120 amostras (40 amostras/ambiente) para análises de rotina físicas e químicas (EMBRAPA, 1997). Os dados obtidos serão sistematizados, estabelecendo-se comparações entre o solo da camada superficial em condição original (solo original sob sedimento) e do sedimento depositado (Tecnossolo). Posteriormente, serão conduzidos 3 experimentos, sequencialmente.

### **Experimento 1: Incubação do Tecnossolo com finos de carvão e extrato pirolenhoso**

Serão coletados 200 kg de material de solo de cada área selecionada. A partir das análises químicas, será realizado o cálculo da correção de acidez, utilizando para isso a escória siderúrgica disponível no mercado (Agrosilício, Silifétil, etc...). **Serão utilizados vasos contendo 2 kg** do material de solo com a acidez devidamente corrigida, onde serão variadas doses de fino de carvão (0, 25, 50, 100 e 200 megagrama  $ha^{-1}$ ) e de extrato pirolenhoso (0; 1, 2,5; 5 e 10  $m^3 ha^{-1}$ ). O arranjo experimental será conduzido em delineamento inteiramente casualizado do tipo fatorial. O experimento 1 terá, portanto, 25 tratamentos com 3 repetições, totalizando 75 parcelas amostrais para cada subárea. Como existem 3 subáreas haverá, no total, 225 unidades experimentais. Essas unidades serão distribuídas

aleatoriamente sobre uma bancada em uma casa de vegetação, onde ficarão incubadas mantendo-se a umidade em 70% da capacidade de retenção de umidade.

Amostras serão retiradas com 30, 60 e 90 dias após a instalação do experimento e nelas serão realizadas as análises físicas e químicas.

## **Experimento 2: Avaliação de espécies de plantas utilizando o tratamento que apresentou melhor resultado no experimento 1**

Em outros 200 kg de material de solo de cada área selecionada, em função da análise química e dos resultados do experimento 1, será feito o cálculo da correção de acidez e sua correção utilizando para isso a escória siderúrgica disponível no mercado (Agrosilício, Silifertil, etc...). Será feita a adubação química conforme a exigência da espécie em teste e, evidentemente, aplicação das quantidades de finos de carvão e extrato pirolenhoso obtidas no experimento 1. Neste material, serão cultivadas 6 espécies (braquiária, capim vetiver, grama batatais, mucuna preta, lab lab e amendoim forrageiro). Este experimento será conduzido em ambiente protegido em vasos com 2 kg em 5 repetições. As parcelas experimentais serão distribuídas aleatoriamente sobre uma bancada. O arranjo experimental será conduzido em delineamento inteiramente casualizado. As unidades experimentais serão mantidas por 90 dias mantendo a umidade em 70% da capacidade de retenção de água, redistribuindo semanalmente as mesmas sobre a bancada. Ao final dos 90 dias, serão plantadas as espécies acima citadas. Esta fase do experimento será monitorada a partir de fotos de topo das unidades experimental, sendo a fotografia utilizada para quantificação da área foliar, até a produção de sementes quando pertinente ou quando da completa cobertura do solo caso não haja produção destas. Ao final, a parte aérea será cortada e dela será obtida o peso úmido e seco. O sistema radicular será retirado do material do solo e terá medido seu comprimento e quantificados seu peso úmido e peso seco.

## **Validação no campo**

Será reprisada no campo, em área de 1 ha para cada subárea, o melhor resultado obtido nos experimentos 1 e 2. O experimento será acompanhado quinzenalmente quantificando a evolução de ocupação da área através de fotografias. Esse acompanhamento acontecerá até que as plantas utilizadas produzam novas sementes (isto se a planta escolhida produzir sementes). As sementes serão amostradas e será determinado seu poder de germinação de acordo com as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 1980).

Espera-se que o uso de resíduos possa se mostrar uma medida prática efetiva e economicamente viável, que poderá complementar os processos de recuperação física dos tecnossolos, permitindo recuperações mais rápidas e efetivas das áreas afetadas, e aplicações inovadoras de estratégias.

## **Considerações Finais**

Uma análise do contexto histórico, ainda que muito preliminar, indica a continuidade de processos geradores de passivo da exploração mineral que remontam aos tempos de colonização. O desastre motiva e urge a busca por formas mais sustentáveis de mineração, conjugando o imperativo econômico às necessidades e demandas sociais e ambientais, tornando um desafio o exercício de conciliação a ser buscado. Tal parece ser um cenário absolutamente impositivo agora, para todos os atores envolvidos. O simplismo de apontar culpados, num teatro tão complexo de causas e efeitos possíveis e factuais, parece-nos temerário num primeiro momento.

O quadro fisiográfico onde se insere a Barragem do Fundão revela diversos fatores que predis põem a eventos de rompimento e deslizamentos: solos rasos, relevo muito declivoso e drenagem encaixada e fortemente controlada por falhas e fraturas, sismicidade regional ponderável, combinada à heterogeneidade litológica, em que se alternam substratos muito alteráveis com outros muito resistentes; alterações hidrológicas causadas pelo rebaixamento de lençol. Um conjunto razoável de atributos naturais que ressaltam riscos potenciais.

Face ao imenso passivo gerado, medidas reparadoras ou alternativas técnicas podem ser buscadas, e no que tange aos solos afetados, verdadeiros tecnossolos, algumas estratégias são propostas neste trabalho. Sua aplicabilidade e possíveis adaptações só serão conhecidas através de pesquisa, que se possa traduzir em rápida e segura reversão dos ambientes afetados para um estado minimamente restaurado, com potencial agropecuário e ecológico mais próximos de uma condição ideal.

## Referências Bibliográficas

BRANDALISE, L. A. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB; Carta Geológica, Carta Metalogenético-Previsional da Folha Ponte Nova (SF.23-X-B-II), escala 1:100.000, Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1991.

BRASIL, 1983. Levantamento de Recursos Naturais. Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Uso Potencial da Terra. V.32, Folha SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória. Rio de Janeiro, IBGE, 1983. 775 p.

BRASIL, 1983. Levantamento de Recursos Naturais. Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Uso Potencial da Terra. V.34, Folha SE 24 Rio de Janeiro/Vitória. Rio de Janeiro, IBGE, 1983. 775p.

CAMARGO, A.P. Influência da granulometria de três materiais corretivos na neutralização da acidez do solo. Piracicaba, SP. ESALQ/USP. 1972. 59p. Dissertação de Mestrado.

CAMARGO, A.P. Influência da granulometria de três materiais corretivos na neutralização da acidez do solo. Piracicaba, SP. ESALQ/USP. 1972. 59p. Dissertação de Mestrado.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS [COPAM]. Deliberação Normativa COPAM nº 115 de 23 abril. 2008. Dispõe sobre a aplicação agrícola do resíduo siderúrgico, denominado pó de balão, em áreas de plantio de florestas homogêneas de *Eucalyptus* sp., abril 2008.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME; Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio Doce. Volume I, Relatório Final, Minas Gerais. Ano: 2010.

CPRM. Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Org. por Orisvaldo Ferreira Baltazar e Frederico Ozanam Raposo. Brasília, DNPM/CPRM. 196 p. 1993.

DORR II, John Van N.; et al. Esboço Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Publicação Especial. DNPM, Rio de Janeiro, n. 1, 25 nov. 1959

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Brasília, 1997. 212p. (EMBRAPA CNPS. Documentos, 1).

FILGUEIRAS, Carlos A. L. A ciência e as Minas Gerais do Setecentos. In: RESENDE, Maria Efigênia Lage de; VILLALTA, Luiz Carlos (Orgs.). **As Minas Setecentistas**. Belo Horizonte: Autêntica; Companhia do Tempo, 2007. p. 159-186

GOMES, A. G.; GARGANTINI, H.; BLANCO, H. G. Comportamento de escórias de siderurgia como corretivo da acidez do solo. Bragantia, Campinas, v.24, n.15, p. 173-179, 1965.

GOMES, J.M.; COUTO, L.; BORGES, R.C.G.; FONSECA, E.P. Efeitos de diferentes substratos na produção de mudas de *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore, Viçosa, v.15, n.1, p.35-42, 1991.

GONÇALVES, A. L. 2007: “As técnicas de mineração nas Minas Gerais do século XVIII”, In: RESENDE, Maria Efigênia Lage de; VILLALTA, Luiz Carlos (Orgs.). **As Minas Setecentistas**. Belo Horizonte: Autêntica; Companhia do Tempo, 2007. p. 159-186

GORCEIX H. 1884. Bacias Terciárias d' água doce nos arredores de Ouro Preto (Gandarela e Fonseca), Minas Gerais, Brasil. Anais. Esc. Minas de Ouro Preto, v.3, Ouro Preto/MG, p.75-92, [1884].

IGAM, 2015. Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Rio Doce no estado de Minas Gerais. Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce após o Rompimento da Barragem da Samarco no Distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG. Belo Horizonte, 2015.

IUSS WORKING GROUP WRB. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports n. 103. FAO, Rome. 2006.

LIMA, M.S.M. Avaliação das características agronômicas do pó-debalão gerado no sistema de limpeza de gás do alto-forno a carvão vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 2003. 88p.

MARTINS, S.V. ; RODRIGUES, R.R. ; GANDOLFI, S.; CALEGARI, L. 2009. Sucessão Ecológica: fundamentos e aplicações na restauração de ecossistemas florestais. In: S.V. Martins (editor), Ecologia de Florestas Tropicais do Brasil, pp 19-39.

MEIS, M.R.M de, 1977. As unidades morfoestratigráficas neokuaternárias do médio vale do rio Doce. Anais da Academia Brasileira de Ciências, V.49, n.º.3, 1977, p. 443-459.

MIOTO, J. A. 1993. Sismicidade e Zonas Sismogênicas do Brasil. Rio Claro-SP, IGCE/UNESP, Tese de doutoramento, 1993, 2 volumes.

MIYASAKA, S.; OHKAWARA, T.; NAGAI, K.; YAZAKI, H.; SAKITA, M.N. Técnicas de produção e uso do Fino de Carvão e Licor Pirolenhoso. In: Encontro de processos de proteção de plantas, 1., 2001, Botucatu. Controle ecológico de pragas e doenças: resumo... Botucatu: APAN, 2001. p.161-176.

MONSERIE MF, WATTEAU F, VILLEMIN G, OUVREARD S, MOREL JL (2009) Technosol genesis: identification of organo-mineral associations in a young Technosol derived from coking plant waste materials. J Soils Sediment 9:537–546. doi:10.1007/s11368-009-0084-y

ROSSITER, D. G. Classification of Urban and Industrial Soils in The World Reference Base for Soil Resources. In: Journal of Soil and Sediments 7 (2), 2007. p. 96 -100.

SAADI, A. 1991. Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais: tensões compressivas, descontinuidades crustais e morfogênese. Belo Horizonte-MG, IGC/UFMG (Tese para provimento de cargo de Professor Titular), 1991, 300p.

SAADI, A. 2001. Rico Sísmico na Bacia do Rio Doce. Relatório Técnico elaborado para o Convênio ANEEL-FUMEC, no âmbito d “AAI dps Aproveitamentos Hidrelétricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce”, 10 pp.

SAADI, A.; COSTA, N.B.O.R.; CAMPOS, J.K.F.1922. Geomorfologia aplicada ao controle ambiental da expansão urbana do Vale do Aço. In: Simpósio “Situação Ambiental e Qualidade de Vida na RMBH e Minas Gerais”, Anais, 2º, ABGE, Belo Horizonte-MG, 1992. p.149-152.

SCHAEFER, C.E.G.R, CANDIDO, H.G.; CORREA, G.R.; PEREIRA, A.; NUNES, J.A.; SOUZA, O.F.F.; MARINS, A.; FERNANDES FILHO, E.; KER, J.C. 2015. Solos desenvolvidos sobre Canga Ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros. In: Geossistemas Ferruginosos do Brasil (org. F.F Carmo & L. Y. Kamino, Edi. Int Pristino.) pp. 77-102.

SILVA, C.S.W. Avaliação ambiental decorrente do uso agrícola de resíduos do sistema de limpeza de gases de uma indústria siderúrgica a carvão vegetal. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa – UFV, para obtenção do título de Mestre em Fitotecnia, 2007. 110p.

SOUZA, C.J.O; SAADI, A. 1994. Contribuição à geomorfologia da bacia do Rio Doce. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 6º, São Paulo-FFLCH/USP, Anais.1994, pp.157-161.

STRAUCH, N.(Dir) 1995. A bacia do rio Doce: estudo geográfico. Rio de Janeiro, IBGE, 1995,199P.

USP, 2015.Tremores de terra ocorridos em Mariana/Bento Rodrigues, MG, no dia 05/11/2015. Centro de Sismologia da

USP, Relatório, 06 de novembro de 2015. 7 P., In: <http://www.sismo.iag.usp.br>, acesso em 11/11/2015.

UZAROWICZ L, SKIBA S (2011) Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: mineral transformations as an indicator of pedogenesis. *Geoderma* 163:95–108

VIEIRA, F. 2015. Entre a informação e a desinformação: a difícil análise de um acidente ambiental de magnitude nacional sem precedentes. Informativo da Associação Brasileira de Ciência Ecológica e Conservação/ ABECO, n.º.3, Outubro a Dezembro de 2015.

ZIKELI S, JAHN R, KASTLER M (2002) Initial soil development in lignite ash landfills and settling ponds in Saxony-Anhalt, Germany. *J Plant Nutr Soil Sci* 165:530–536.