



**ALEXANDRE CARVALHO RIBEIRO JUNIOR**

**ATIVIDADE BIOQUÍMICA E ESTABELECIMENTO DE  
*URUCHLOA DECUMBENS*, *SCHINUS*  
*TEREBINTHIFOLIUS RADDI* E *EREMANTHUS INCANUS*  
EM REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO**

**LAVRAS-MG  
2022**

**ALEXANDRE CARVALHO RIBEIRO JUNIOR**

**ATIVIDADE BIOQUÍMICA E ESTABELECIMENTO DE  
*URUCHLOA DECUMBENS, SCHINUS  
TEREBINTHIFOLIUS RADDI E EREMANTHUS INCANUS*  
EM REJEITO DA MINERAÇÃO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal  
de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Agronomia,  
para a obtenção do título de  
Bacharel.

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

Orientador

Dr. Jessé dos Santos Valentim

Coorientador

LAVRAS-MG

2022

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a minha família por todo o suporte e carinho que tive durante a minha trajetórias, foram a grande base que me manteve de pé por todo esse tempo, sou imensamente grato a tudo que me proporcionaram. Em seguida agradeço a CAPES, CNPQ, FAPEMIG, e a toda equipe do Departamento de Microbiologia do Solo, em especial o Laboratório de Fungos Micorrízicos e Processos Bioquímicos do Solo, que foi o primeiro local que me acolheu para ter minha primeiras experiências acadêmicas na universidade e serei infindavelmente grato por tudo me ensinaram, todos as conversas e momentos bons que partilhei com todos os amigos que fiz do Programa de Pós-Graduação, graduandos e técnicos. Cabe ainda ressaltar alguns nomes, que formam parte fundamental da minha formação: Professor Dr. Marco Aurélio, Dr. Jessé Valentim, Dr. Flávio Araújo, Dra. Raquel Rodriguez, Dra. Aline Oliveira e Dra. Marisangela Barbosa. Muito obrigado a todos. As conversas e orientações que me deram, as guardarei com carinho. Agradeço também todos os grupos que fiz parte além da pesquisa: Núcleo de Ciências do Solo (NECS), Terra Júnior - Consultoria Agropecuária, Núcleo de Estudos em Cafeicultura (NECAF) e Núcleo de Estudos em Entomologia (NEENTO), estes me trouxeram bons amigos e companheiros que poderei para além da graduação. Por fim, mas não menos importante, agradeço do fundo do meu coração meus queridos amigos e amigas dos grupos “Arreda pra Lá” e “Arreda pra Cá”, meus irmãos da “República Área 51”, a minha namorada e companheira, e a todos meus amigos que tive a ventura de encontrar na minha trajetória da graduação. Graças a vocês, cada momento que passamos juntos, dividindo dores e aflições sobre o futuro, comemorando nossas vitórias e tendo conversas francas foram o grande ato da minha juventude e guardarei com muito zelo e amor nas minhas mais doces memórias. Obrigado por tudo.

## RESUMO

Neste trabalho foi avaliado a influência da deposição superficial de rejeito e lama de minério de ferro nos atributos biológicos e bioquímicos e na produção de matéria seca em solos cultivados inicialmente com *Uruchloa decumbens*, e posteriormente com *Schinus terebinthifolius* Raddi e *Eremanthus incanus*. Os parâmetros avaliados foram respiração basal do solo, carbono da biomassa microbiana, atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase, quantificação da glomalina facilmente extraível do solo e a produção de matéria seca da parte aérea e raízes. Foi possível observar que a deposição de lama houve redução na produção de matéria seca de *E. incanus*, e nos tratamentos com sobreposição de lama e rejeito de ferro apresentaram menores valores nas análises de  $\beta$ -glucosidase e glomalina facilmente extraível. Conclui-se que não houve redução da biomassa microbiana, porém houve redução na atividade de algumas enzimas do solo e as espécies *Uruchloa decumbens* e *Eremanthus incanus* não apresentaram variação na produção de matéria seca entre os tratamentos, mostrando boa capacidade de estabelecimento em áreas de revegetação de mineração.

## ABSTRACT

In this work, the influence of surface deposition of iron ore mud and tailings on biological and biochemical attributes and on the production of dry matter in soils cultivated initially with *Uruchloa decumbens*, and later with *Schinus terebinthifolius* Raddi and *Eremanthus incanus* was evaluated. The parameters evaluated were basal soil respiration, microbial biomass carbon, enzyme activity  $\beta$ -glucosidase, quantification of easily extractable glomaline from the soil and the production of dry matter from the aerial part and roots. It was possible to observe that the mud deposition was reduced in the production of *E. incanus* dry matter, and in the treatments with overlay of mud and iron tailings showed lower values in the analyses of  $\beta$ -glucosidase and easily extractable glomaline. It is concluded that there was no reduction in microbial biomass, but there was a reduction in the activity of some soil enzymes and the *Uruchloa decumbens* and *Eremanthus incanus* species showed no variation in dry matter production between treatments, showing good establishment capacity in mining revegetation areas.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1.</b>	<b>Objetivo.....</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.</b>	<b>Impactos do Rompimento da Barragem de Fundão.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.</b>	<b>Bioindicadores do Solo como indicadores de qualidade.....</b>	<b>9</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.</b>	<b>Primeira etapa – Deposição de lama e rejeito e os impactos sobre a microbiota do solo.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>Parâmetros biológicos e bioquímicos.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2.</b>	<b>Segunda etapa – Desenvolvimento de espécies arbóreas sobre solos impactados.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3.</b>	<b>Análise estatísticas.....</b>	<b>13</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>17</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXO A.....</b>	<b>24</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXO B.....</b>	<b>2</b>

## **1 Introdução**

Com o rompimento da barragem do Fundão em Mariana, Minas Gerais, foram depositadas milhões de toneladas de rejeito de mineração de ferro ao longo de 800 km na bacia do Rio Doce. Como consequência, aproximadamente 1500 hectare de matas ciliares e áreas agrícolas, além de diversos cursos de água, incluindo o próprio Rio Doce, foram intensamente impactados, principalmente às margens do Rio Gualaxo do Norte provocando impactos ambientais e alterações parciais ou total em suas propriedades físicas, químicas e biológicas (Segura et al, 2016; Garcia et al, 2017; Hatje et al, 2017; Pires et al, 2017).

A recuperação dessas áreas impactadas depende da ação antrópica, principalmente no processo de revegetação, uma vez que, as plantas contribuem com o aporte de matéria orgânica, fornecendo carbono e energia ao solo e consequentemente estimula a microbiota edáfica e os processos ecossistêmicos desempenhados com participação dos microrganismos do solo (Pilon-Smits, 2005; Carneiro et al, 2008; Santos et al, 2013; Santos et al, 2016; Pedroso et al, 2018), além de evitar perdas por erosão, sendo inclusive a revegetação, a forma mais utilizada para conservação do solo (Moragan, 1986).

No entanto, é bastante documentada a importância da microbiota do solo associada às plantas para se alcançar sucesso nos processos de revegetação (Carneiro et al, 2008; Herzberger et al, 2014; Franchi et al, 2016; Santos et al., 2016; Rangel et al, 2017; Pedroso et al, 2018).

Os microrganismos do solo desempenham papel essencial no desenvolvimento das plantas, por melhorar a disponibilidade de nutrientes (Valencia-Cantero et al., 2007; van der Heijden et al., 2008; Morgan & Connolly, 2013; Tak et al., 2013; Lenart-Boroń and Boroń, 2014; Santoyo et al, 2016; Jacoby et al, 2017), participar da imobilização, transformação química e detoxificação de metais, interferindo na sua disponibilidade para as plantas (Tak et al., 2013; Lenart-Boroń and Boroń, 2014; Ma et al, 2015; Dzionek et al, 2016), ou indiretamente pela estabilização de agregados, devido a efeitos físicos das hifas fúngicas, bem como a produção de agentes cimentantes como a glomalina, por fungos micorrízicos (Wright and Upadhyaya, 1998; Rillig et al, 2004; Pedroso et al, 2018; Lehmann et al, 2017; Barbosa et al, 2019) ou biopolímeros por certos grupos bacterianos (Deng et al, 2015; Lehmann et al, 2017; Costa et al, 2018), além de reações bioquímicas, intermediadas por enzimas, que fazem parte do ciclo do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre (Tabatabai, 1994; Burns and Dick, 2002; Hojati and Nourbakhsh, 2006; Bowles et al, 2014).

O sucesso em programas de revegetação de áreas impactadas, portanto depende do estabelecimento de uma microbiota ativa associada às plantas estabelecidas sobre substratos com impedimentos físicos e químicos decorrentes da sua degradação. Nesse contexto, conhecer como a deposição do rejeito de mineração de ferro afeta a atividade microbiana e o estabelecimento das plantas no rejeito pode fornecer conhecimentos para tomadas de decisões visando a aceleração da reabilitação de áreas impactadas.

## **1.1 Objetivo**

Portanto, como relatado acima, o objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da deposição de rejeito na atividade microbiana do solo e no crescimento de espécies vegetais utilizadas nos processos de reabilitação.

## **2 Referencial Teórico**

### **2.1 Impactos do Rompimento da Barragem da Barragem de Fundão:**

Em 5 de novembro de 2015 a Barragem de Fundão, localizada em Mariana, Minas Gerais, se rompeu e liberou aproximadamente 45 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro. O conteúdo desta barragem após seu rompimento ultrapassou a barragem de Santarém, percorrendo pelo rio Gualaxo Norte até o rio Carmo, após chegou ao rio Doce e por fim a onda de rejeitos chegou ao litoral capixaba percorrendo um total aproximado de 663,2 km de curso d'água. O percurso desses rejeitos soterrou o distrito de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo, pertencentes ao município de Mariana - MG, durante essa tragédia, 13 trabalhadores da Samarco e 5 moradores da região morreram (IBAMA, 2020; Silva, 2019). O rejeito que caiu sobre os leitos dos rios (Gualaxo do Norte, Carmo e Piranga) provocou elevação do nível tanto do fundo quanto de suas margens, ocasionando assim uma ampla dispersão desses detritos e compostos tanto no solo às margens do rio, como também levando ao longo do caminho d'água, impactando toda a fauna, flora e comunidades que estavam nesta região (DA SILVA, 2016). Segundo DA SILVA, 2016, em amostras de água coletadas e em todo o percurso do rio Doce que foi possível observar teores de Fe e Mn superiores aos impostos pelo CONAMA 357/2005, e nas áreas mais próximas às barragens de Santarém os valores de Al e Mn apresentaram, respectivamente, valores 2,5 e 7 vezes acima do permitido pelo CONAMA 357/2005. Seguindo esta linha de raciocínio, os dados analisados pelo (IGAM, 2018), mostram a comparação do monitoramento ao longo do tempo, desde de 2015 até o final de 2017, e foi possível averiguar que os parâmetros físico-químicos: turbidez da água e sólidos em suspensão totais, ambos ultrapassam o limite de classe 2 para as águas do rio, valores estes que estão acima da média histórica do que o instituto vem contabilizando a longo de anos em todo o rio Doce. Os valores apontados no estudo sugerem que os materiais depositados pelo rompimento da barragem nas margens e no leito dos rios, são todos carregados e resolvidos pela ação das chuvas locais.

Outros impactos importantes que podem devem ser trazidos à discussão são os impactos que aconteceram no solo. Segundo (IBAMA, 2015) foi estimado a destruição de 1.469 hectares de terras com destinação a agropecuária usada pelas populações locais, além de ter afetado áreas de preservação permanente ao longo do curso d'água que percorreu a lama. De acordo com o relatado e analisado pelos seguintes órgãos (IBAMA, 2015; SEMAD, 2015; EMBRAPA, 2015) e (Da Silva, 2015), os sedimentos não apresentam estrutura e uma escassez de cátions, impactando tanto na sua fertilidade química quanto física, por sua vez, composição textural é cerca de 90% de areia e silte, sobrando apenas 10% de argila, e apesar dessa composição o material não é poroso e

apresenta compactação quando seco. A composição do rejeito como já descrito não apresenta ter material orgânico, e presença em quantias elevadas de ferro, manganês e alumínio, bem como arsênio em níveis acima do limite estabelecido pelo (CONAMA 454/2012). Além desses minerais foi possível identificar grandes quantias de amins potencialmente tóxicas, (Mroczkowski, Stuczyński, 2006). Todas suas características físico-químicas afetam o pH que irá possuir, como exposto no relatório da (EMBRAPA, 2015), descrito acima, nas áreas de mata ciliar foram contabilizados níveis de pH variando entre 4,5 até 8,9, com essa abrangência existem níveis que se tornam prejudiciais ao crescimento e desenvolvimento de plantas, animais bem como as atividade microbiológicas do meio. Dadas as condições que a deposição do rejeito no solo e na água ocasionou, foi observado uma queda significativa da população microbiana presentes nas áreas atingidas. Isso pode ser explicado pas condições de pH que desfavorecem esses seres, bem como o acúmulo de éter-amida no solo que pode se tornar um fator redutor para o crescimento da microbiota, segundo (Mroczkowski, Stuczyński, 2006; Mehrer, Mohr, 1989).

## **2.2 Bioindicadores dos Solo como indicadores de qualidade**

Ao analisar os impactos feitos em todo o ambiente que foi despejado o rejeito, é possível ressaltar a rápida alteração dos processos biológicos do solo é um importante indicador da sua qualidade, como segundo (Kandeler et al., 1999), microrganismos e processos bioquímicos do solo são extremamente sensíveis a mudanças quantitativas e qualitativas do solo. Para o fim de metrificar qualidade em ambientes de mineração em recuperação, (Izquierdo et al, 2005) avalúo procesos bioquímicos como a Desidrogenase, um oxiredutase importante e presente em apenas células vivas e extremamente sensíveis em solos degradados (García et al,1997), e também foram feitas análises de relacionadas ao processo de mineralização de nutrientes importantes como N (Urease), P (Fosfatase ácida) e C (b-glucosidase), essenciais para o desenvolvimento de outros seres vivos. Cabe ainda ressaltar nesse trabalho a avaliação ao longo do tempo da a enzima b-glucosidase, que dentre todas as outras glucosidases é a mais importante e amplamente encontrada (em plantas, animais, fungos e bactérias (Veena et al.,2011)) para avaliações de qualidade (Utobo and Tewari, 2015). A b-glucosidase tem papel fundamental para degradação da celulose (Gil-Sotres et al., 2005), desempenha no solo parte da catálise de hidrólises e biodegradação de vários b-glicosídeos (Martinez and Tabatabai, 1997), e pela produção de glicose como produto final de várias reações que participa, assim ajudando a fornecer e reaproveitar o carbono ao sistema (Merino et al., 2016; Adetunji, Adewole T. et al, 2017). Esses trabalho mostram que possivelmente ao melhor desempenho da b-glucosidase no solo em (Izquierdo et al, 2005) houveram resultados superiores na sua atividade com 4 e 6 anos de revegetação com *Casuarina equisetifolia* L. ou *Anacardium occidentale* L. quando comparados ao solo sem vegetação, em (dos Santos, et al, 2016) houveram valores superiores b-glucosidase em todos os tratamentos com cobertura vegetal em comparação ao tratamento sem

restauração, esses trabalhos sugerem que há a contribuição de maior aporte de C no sistema para maior ciclagem pela enzima.

O carbono no solo não apenas sobre as reações que ele é necessário, mas também na composição de estruturas e seres que pertencem aquele ambiente. A Biomassa Microbiana é parte fundamental da matéria orgânica do solo, sendo considerada parte lábil da mesma, como também um regulador da ciclagem dos nutrientes no solo (Gomes et al., 2015; Barreto et al. 2008). Segundo (Barreto et al. 2008; Ferreira et al. 2015), o Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) é extremamente sensível às alterações e condições ambientais, sendo muito eficiente para indicar mudanças da cobertura vegetal sobre o solo e sua matéria orgânica, de acordo com (Hoffmann et al., 2018) há uma vasta participação dos microrganismos em inúmeros processos que afetam o ecossistema, como ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo, mudança nos estoques de carbono e a própria dinâmica da matéria orgânica. A determinação do CBM pode ser empregado em diversos estudos, sejam para cunho agrícola (Jakelaitis et al., 2008; Nogueira et al., 2006; Laroca et al., 2018; Oliveira et al., 2021) ou ainda ambiental e visando, no caso, restauração de áreas degradadas (Carneiro et al., 2008; dos Santos et al., 2016; Silva et al., 2021). Nesses trabalhos é possível avaliar que áreas em recuperação e áreas nativas/não impactadas houveram aumentos no CBM, uma vez que isso pode ser atribuído pela maior entrada de carbono no sistema sendo ela pela rizodeposição, decomposição de fitomassa ou ainda em casos quando há introdução de inóculos de organismos que possam ajudar o estabelecimento dessas áreas como visto em (Zanchi et al. 2021). No entanto, conhecer o CBM não fornece indicações mais profundas sobre as atividades dos microorganismos do solo de forma abrangente, desta forma é extremamente válido avaliar a respiração basal do solo, bem como as atividades enzimáticas do mesmo (Mendes et al., 2012).

A Respiração Basal do Solo (RB) se baseia na oxidação de materiais orgânicos pelos seres vivos aeróbicos que liberam CO<sub>2</sub> no final desse processo para produção de energia (Pragana et al., 2012), e por conta do seu hábito heterotrófico são fase fundamental do ciclo do carbono no solo (Epron et al., 2006). A quantificação da RB é algo que pode dizer muito do desempenho dos microrganismos nesse sistema, e podendo servir como base de informação sobre possíveis perturbações que esse ambiente possa estar sofrendo. Tais como, o aumento da eficiência de decomposição de matéria orgânica e liberação de nutrientes por conta de uma aragem um agroecossistema, como também distúrbios ecológico como deposição de materiais orgânicos diferentes e substância exógenas (Medeiros et al, 2018; Tótola; Chaer, 2002; Childs, 2007). Seguindo essa linha de raciocínio, (Couto et al., 2021) conduziu análises com amostras próximas ao rio Carmo, em Mariana, MG onde foi atingido pelo rejeito proveniente da Barragem de Fundão, no qual a autora avaliou três situações de degradação, a primeira próxima ao leito do rio, a segunda afetada pela lama mas sem contato direto com os sedimentos que vêm pela água e com pouca vegetação e a terceira uma área sem já não afetada diretamente pela lama mas ainda degradada por pastagem. Ao analisar a RB e o CBM os segundo e terceiro tratamentos obtiveram resultados

superiores em comparação ao primeiro, no entanto é possível observar que mesmo que RB dos tratamentos dois e três sejam semelhantes há uma diferença significativa entre seus níveis de CBM, mostrando que mesmo que possam estar com níveis de respiração semelhantes a massa de microrganismos entre os tratamentos é diferente, mostrando que há um maior estresse nos ambientes que possuem menores CBM e altas RB.

A junção das informações de CBM e RB é um excelente parâmetro para avaliar de forma mais crítica o comportamento de microrganismos e seus processos em um ambiente. Sendo assim, é muito comum adotar a razão entre RB e CBM, conhecido como quociente metabólico ( $qCO_2$ ). Este parâmetro se baseia na teoria bioenergética de Odum, baseando-se na premissa que comunidades microbianas sob condições de estresse e limitações por nutrientes, pH baixo, ou quaisquer outras condições que as façam serem menos eficientes em converter o conteúdo assimilado em biomassa, boa parte desse conteúdo será requerido para fornecer energia para processos metabólicos e a manutenção da célula (ODUM, 1969). Os valores de  $qCO_2$  por sua vez conseguem trazer outra visão para observar o balanço entre RB e CBM, como exposto e (Couto et al., 2021) é possível verificar que primeiro tratamento mesmo apresentando os menores valores de RB e CBM mostrou o maior valor de  $qCO_2$ , em seguida o segundo e terceiro, isso demonstra que possivelmente os ambientes que esses organismos estão localizados exercem limitações e estresses que os fazem gastar mais recursos para sua manutenção e não para seu crescimento em massa como no terceiro tratamento. Em outros estudos buscando avaliar a qualidade do solo em áreas de mineração em reabilitação, foi apontado pelo autor (Carneiro et al., 2008) em um trabalho feito em recuperação de áreas degradadas por mineração de bauxita, com diferentes níveis de recuperação, foi possível observar que os índices de  $qCO_2$  foram todos inferiores quando comparados ao ambiente ainda sem um programa de recuperação implantado, havendo ainda tratamentos avançados em revegetação que se assemelhavam com os valores da área de referência. Em Oliveira et al., 2021, foi avaliado diferentes fitofisionomias e uma área de mineração em restauração, o  $qCO_2$ , no entanto em duas diferentes estações (chuvoso e seco), podendo avaliar o desempenho e comportamento da comunidade de microrganismos em condições que poderiam alterar seu desempenho e pode-se constatar um aumento significativo deste parâmetro em todos os tratamentos no período chuvoso, e o tratamento da área em revegetação apresentou ser um ambiente mais limitante e estressante aos organismos, dados os menores valores de CBM e valores altos de  $qCO_2$ . Demonstrando um ótimo atributo para qualificar e avaliar dada a sua alta sensibilidade ao ambiente as mudanças no ambiente, podendo trazer informações sobre a progressão da área a sua recuperação, ou melhorias no agroecossistema, como exemplos.

### **3 Material e Métodos**

O estudo foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal de Lavras, em duas etapas (Figura 1), onde a primeira etapa consistiu na simulação da deposição de lama e de rejeito de mineração de ferro

sobre um solo não impactado, cultivado com gramínea e em seguida a segunda etapa consistiu no plantio e avaliação do desenvolvimento inicial de espécies arbóreas nativas em solos impactados. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com 27 repetições.

### **3.1 Primeira etapa – Deposição de lama e rejeito e os impactos sobre a microbiota do solo**

Na primeira etapa do estudo, vinte e sete vasos contendo 2,0 kg de Latossolo Vermelho Distrófico (solo não impactado coletado em uma mata nativa da Universidade Federal de Lavras, 21°13'42" S, 44°58'02" W). A característica química do solo está apresentada na tabela 1 – controle. Cada vaso recebeu 50 ml de solução nutritiva, (com um volume de 1,5 L contendo 39,63 g de NH<sub>4</sub>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 5,25 g de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,30 g de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 0,81 g de MnSO<sub>4</sub> H<sub>2</sub>O, 0,21 g de CuSO<sub>4</sub> 5H<sub>2</sub>O, 0,70 g de ZnSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O, 0,56 g de KCl e 39,28 g de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), e a semeadura de 15 sementes de *Urochloa decumbens*. 26 dias após semeadura ( Days after sowing - DAS) foi realizada a primeira adubação de cobertura seguindo uma dose de 0,189g de N e 0,197g de K por vaso, a segunda adubação de cobertura foi realizada 37 DAS usando as mesmas quantidades de N e K na primeira adubação de cobertura.

Para simular o impacto da deposição de lama e rejeito de mineração sobre o solo não impactado, um mês após o plantio da *U. decumbens*, os seguintes tratamentos foram estabelecidos (Figura 1): nove vasos receberam 280 mL vaso<sup>-1</sup> de lama de mineração; nove vasos receberam 280 ml vaso<sup>-1</sup> de rejeito de mineração, e para efeito de comparação, outros nove vasos foram mantidos sem deposição superficial (tratamento controle, não impactado). A lama e o rejeito de mineração foram cedidos pela empresa Samarco S/A. A lama foi coletada de uma barragem de mineração mantida pela empresa, sendo resultante diretamente do processo de extração do minério de ferro. O rejeito de mineração foi coletado em um trecho impactado às margens do rio Gualaxo do Norte, no distrito de Pedras, município de Mariana-MG (20°16'21" S, 43°12'03" O), um ano após o rompimento da barragem do Fundão. O rejeito e a lama se diferenciam entre si principalmente em seus aspectos físicos, onde o rejeito apresenta textura franco arenosa enquanto a lama apresenta elevadíssimo teor de silte. Os parâmetros químicos e textura da lama, rejeito e do solo (controle) utilizados no experimento encontram-se na Tabela 1.

Ao final do período experimental, três meses após aplicação dos tratamentos, foram realizadas medições de trocas gasosas de *U. decumbens*. As medições foram realizadas no período entre 9 e 11 horas, com o auxílio de um analisador de gás infravermelho (IRGA – Li-Cor – 6400XT). Sua câmera de led foi programada para uma densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) de 600 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Foram determinados os valores de fotossíntese líquida (A - μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática (gs – mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e transpiração (E-mmolH<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>).

Após isso, as partes aéreas das plantas foram coletadas de todos os vasos e secas em estufa de circulação de ar forçada a 60°C até atingirem peso constante para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA).

Ainda, um terço (nove vasos) dos tratamentos foram desmontados, e amostras de solo foram coletadas de forma que solo e o rejeito ou lama foram homogeneizados. Nesta etapa os seguintes atributos bioquímicos foram analisados: respiração basal do solo (RB) de acordo com metodologia de (Alef 1995); carbono da biomassa microbiana (CBM) pelo método da fumigação-extração descrito por (Vance et al. 1987); da razão entre a RB e o CBM foi determinado o qCO<sub>2</sub> de cada tratamento (Anderson and Domsch 1993).; atividade da enzima β-glucosidase conforme a metodologia de (Eivazi e Tabatabai 1988) e quantificação da glomalina facilmente extraível (Bradford 1976 Wright e Upadhyaya 1998).

### **3. 2 Segunda etapa – Desenvolvimento de espécies arbóreas sobre solos impactados**

Após corte da parte aérea da *U. decumbens*, os outros dezoito vasos restantes foram submetidos ao plantio de duas espécies arbóreas, *Schinus terebinthifolius* Raddi (Aroeirinha) e *Eremanthus incanus* (Less.) (Candeia), (Figura 1), as mudas das espécies arbóreas foram fornecidas pelo viveiro de mudas da UFLA. Durante o período de um ano, os vasos com as plantas foram mantidos em casa de vegetação, irrigados constantemente para manter a capacidade de campo.

Após 12 meses de cultivo, todas as plantas de *S. terebinthifolius* e *E. incanus* foram coletadas. As partes aéreas e os sistemas radiculares das espécies arbóreas foram submetidas à secagem em estufas (60°C), até atingir massa constante, para determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de raízes (MSR).

### **3.3 Análise estatísticas**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste Scott-Knott a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2014). Foi feito o Coeficiente de correlação de Pearson e Análise de Componentes Principais (PCA) usando o software R.

## **4 Resultados**

Os resultados para os atributos bioquímicos avaliados no estudo estão apresentados na tabela 2.1 e Tabela 2.2. O Carbono da biomassa microbiana (CBM) e a respiração basal (RB) e o qCO<sub>2</sub> não foram afetados ( $p < 0.05$ ) pela deposição da lama ou rejeito. Por outro lado, a atividade da enzima β-glucosidase teve redução ( $p < 0.05$ ) de 46% e 16% devido a deposição da lama e do rejeito de mineração, respectivamente. A glomalina também foi afetada ( $p < 0.05$ ) pela deposição da lama e do rejeito de mineração, em ambos os casos levando a reduções de cerca de 19% ( $p < 0.05$ ) em seus teores quando comparado ao solo não impactado (Tabela 2).

Com os dados dos atributos biológicos foi analisada a correlação de Pearson. o CBM foi negativamente correlacionado (negativamente ( $p < 0.05$ ) com RB,  $qCO_2$  e GFE. A RB teve correlação positiva ( $p < 0.05$ ) com  $qCO_2$ . O  $qCO_2$  foi negativamente correlacionado ( $P < 0.05$ ) com a  $\beta$ -Glucosidase, e positivamente correlacionado ( $P < 0.05$ ) com a GFE. O  $qCo_2$  apresentou uma correlação significativamente negativa com esse parâmetro.

A MSPA de *U. decumbens* não foi afetada significativamente após três meses de cultivos em solo impactado pela lama ou rejeito de mineração de ferro (Tabela 3). Efeito semelhante foi observado para MSPA e MSR de *E. incanus*, mesmo após um ano de cultivo sobre solos impactados pela lama e rejeito. Por outro lado, a lama afetou negativamente os valores de MSPA e MSR de *S. terebinthifolius*, com redução de 21% e 24%, respectivamente, quando comparados com os valores observados em plantas cultivadas em solo não impactado.

Em relação às trocas gasosas, não houve diferenças significativa nas taxas e fotossíntese líquida, na transpiração e na condutância estomática em plantas de *U. decumbens* cultivadas no solo não impactado e nos solos impactados pela lama ou pelo rejeito de mineração de ferro (Tabela 4).

## 5 Discussão

Nossos resultados mostraram valores elevados para o CBM indicando que de alguma forma a microbiota original do solo foi resistente à deposição da lama e do rejeito de mineração, mantendo os valores próximos daqueles observados para o solo não impactado (Tabela 2). Embora diversos trabalhos tenham demonstrado redução na biomassa microbiana em solos impactados devido a atividades de mineração (Wang et al, 2007; Carneiro et al, 2008; Santos et al, 2013), também tem sido relatado que quando ocorrem adaptações da microbiota remanescente, em áreas impactadas, ela é capaz de manter-se ou ainda de recolonizar o solo, e conseqüentemente pode elevar a os valores do CBM (Carneiro et al, 2008; Santos et al, 2016), mesmo que esse aumento na biomassa microbiana não signifique manutenção da diversidade microbiana (Wang et al, 2007; Wang et al, 2008; Santos et al, 2016).

A taxa de RB também demonstrou equilíbrio entre os tratamentos, porém os altos valores indicam intensa atividade da microbiota (Tabela 2). Alta taxa respiratória tem relação direta com consumo de compostos orgânicos prontamente assimiláveis pelos microrganismos do solo, direcionando o metabolismo microbiano mais para a manutenção do que para o aumento da biomassa microbiana, o que ocorre comumente em condições estressantes para a microbiota do solo (Carneiro et al, 2008; Santos et al, 2013; Silva et al, 2018). Esse aspecto é bastante relevante pois o aumento na emissão de  $CO_2$  implica em redução no estoque de carbono do solo ao longo do tempo.

A atividade da  $\beta$ -glucosidase, enzima que está envolvida com o metabolismo de carbono e obtenção de energia pela célula microbiana, foi bastante impactada pela deposição da lama (Tabela 2). A menor atividade devido a deposição da lama pode ser

explicada pela presença de metais em excesso como o manganês e o próprio ferro, além de elementos potencialmente tóxicos, comumente presentes em sua composição, conforme relatado neste trabalho (tabela 1) e também verificado por outros autores (Segura et al, 2016; Santos et al, 2019). Outro aspecto importante é a condição física tanto do rejeito, quanto da lama, devido aos elevados teores de areia (55 %), e silte (95 %), respectivamente (tabela 1), aspectos já discutidos em outros estudos (Carmo et al, 2017), e que reduz a porosidade total do solo, especialmente os macroporos, limitando a aeração do solo e conseqüentemente as atividades microbianas desempenhadas por microrganismos aeróbios (De Neve e Hoffman, 2000; Pupin et al, 2009; Nawaz et al, 2013).

A lama afetou negativamente as concentrações de glomalina (Tabela 2). Este efeito é explicado pelo fato de a lama ser um material inerte no ponto de vista biológico, e por isto, teve um efeito diluidor nas concentrações de glomalina durante o revolvimento e deposição sobre o solo natural.

Efeito semelhante ocorreu com o rejeito. No entanto, diferentemente da lama, o rejeito é um material misto, uma vez que em decorrência do rompimento da barragem, a lama originalmente foi sendo revolvida e, conseqüentemente, misturada ao solo natural ao longo da margem do Rio Gualaxo. Assim, o rejeito foi alterando as características químicas e físicas, além de componentes biológicos dos solos naturais dos locais por onde passou (Segura et al, 2016; Carmo et al, 2017; Prado et al, 2019; Santos et al, 2019). Desta maneira o rejeito foi incorporando parte das características químicas, físicas e biológicas do solo das áreas afetadas. Portanto, diferente da lama, o rejeito, coletado às margens do rio Gualaxo do Norte, um ano após o acidente, apresentava alguma carga microbiana e esta deve ter contribuído com os valores intermediários em relação a lama e o controle. De fato, a glomalina é uma glicoproteína considerada persistente no solo (6 - 92 anos), e toma parte da cimentação de partículas do solo desempenhando papel chave na sua agregação (Wright e Upadhyaya, 1998, Rillig et al, 2001; Preger et al, 2007; Zhang et al, 2017). Portanto, este atributo biológico tem papel chave para melhorias nas propriedades físicas do solo de áreas impactadas por mineração, e por isto pode ser um importante indicador da evolução dos processos de reabilitação do solo.

A *U. decumbens* é conhecida por ser uma planta muito agressiva em termos de competição com outras espécies, e capacidade de se desenvolver em solos com baixa fertilidade e limitações físicas (Neto et al, 2015; Monteiro et al, 2016; Silva et al, 2019). Essas características explicam a ausência de diferenças significativas na MSPA da planta em solo impactado com lama e rejeito de mineração de mineração de ferro, comparada com o tratamento não impactado (Tabela 3). Uma das características que possibilitam as *U. decumbens* tais vantagens competitivas em diferentes ambientes é o alto desempenho fotossintético devido ao metabolismo C4. Plantas com esse metabolismo necessitam de menor concentração de CO<sub>2</sub>, são mais eficientes no uso da água e mais efetivas na produção de biomassa. Tais características permitem melhor

resistência a adversidades abióticas e podem ser uma justificativa pela ausência de diferenças significativas na MSPA.

Diante de apresentado, os resultados da matéria seca estão em conformidade aos obtidos ao avaliar as trocas gasosas em *U. decumbens*, uma vez que as alterações causadas no solo e em sua microbiota devido a lama e o rejeito não causará influência significativa nas relações ecofisiológicas (Tabela 4). As características ecofisiológicas podem justificar sua capacidade competitiva agressiva e não ter havido redução da biomassa seca, mesmo com a presença de metais em excesso no solo e as alterações de capacidade hídrica e de porosidade do solo.

Esses resultados corroboram com outros estudos que demonstram a capacidade dessa gramínea em se desenvolver em solos com algum tipo de estresse, por isso, ser adotada em projetos de revegetação de áreas impactadas por atividade mineração (Melloni et al, 2003; Leal et al, 2016; Santos et al, 2016). De fato, Zago et al. (2019), avaliando estratégias de fitorremediação das áreas impactadas pelo rompimento da Barragem de Mariana, MG, tem sugerido que o uso de gramíneas é o mais recomendado para o processo de reabilitação inicial, pois auxilia na contenção dos sedimentos nas áreas afetadas, evitando que sejam arrastados para aos rios, principalmente, devido ao seu sistema radicular vigoroso.

Assim como a *U. decumbens*, a espécie *E. incanus* também demonstrou capacidade de se estabelecer em solos impactados por lama e rejeito de mineração e, portanto, pode ser de interesse em programas de revegetação de áreas impactadas, principalmente por ser uma espécie arbórea nativa da região (Accioly et al, 2000; Araújo et al, 2018). Por outro lado, a *S. terebinthifolius* foi afetada negativamente pela deposição da lama (Tabela 3). Esse resultado indica a presença de fatores limitantes na lama, conforme comentado anteriormente, que podem ter atuado reduzindo o sistema radicular (MSR) dessa espécie e por consequência o desenvolvimento da parte aérea da planta (MSPA) (Tabela 3).

## 6 Conclusão

A deposição de lama e de rejeito de mineração de ferro sobre solo natural, reduz a atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase e o teor de glomalina no solo.

As espécies vegetais *U. decumbens* e *E. incanus* apresentaram capacidade de se estabelecer em solos impactados pela deposição de lama e rejeito de mineração.

A espécie *S. terebinthifolius* também foi capaz de se desenvolver na presença da lama e rejeito, embora com certa limitação na presença de lama.

## 7 Referências

Accioly AMA, Siqueira JO, Novais RF, Alvarez VH, Schaefer CEGR (2000) Contaminação química e biorremediação do solo: tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa.

- Adetunji, Adewole T. et al. The biological activities of  $\beta$ -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. *Journal of soil science and plant nutrition*, v. 17, n. 3, p. 794-807, 2017.
- Alef K (1995) Estimation of soil respiration. In: Alef K, Nannipieri P (eds) *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic, New York.
- Araújo FV, Silva EB, Silva AC, Barbosa MS, Nardis BO, Pereira IM (2018). Initial Growth of *Eremanthus incanus* (Less.) Less in Soil with Manganese. *Floresta Ambient* 25(1), e20150226. <https://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.022615>.
- Barreto, P.A.B; Gama-Rodrigues, E.F; Gama-Rodrigues, A.C. Carbono das frações da matéria orgânica em solos sob plantações de eucalipto de diferentes idades. *Sci. Flor.*, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 581-590, 2014.
- Bradford DMM. (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem.* 72:248–254
- Bowles TM, Acosta-Martinez V, Calderon F, Jackson LE (2014). Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. *Soil Biol. Biochem.* 68:252–262. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.10.004
- Burns RG, Dick RP (2002) *Enzymes in the Environment: Activity, Ecology and Applications*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Carneiro MAC, Siqueira JO, Moreira FMS (2008) Soil organic carbon, total nitrogen, microbial biomass and activity in two rehabilitation chronosequences after bauxite mining. *Rev Bras Cienc Solo* 32:621–632.
- Carmo FF, Kamino LHH, Tobias R, Jr, Campos IC, Silvino G, Castro KJSX, Mauro ML, Rodrigues NUA, Miranda PS, Pinto CEF (2017) Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. In: *Perspectives in ecology and conservation* 15:145–151.
- Childs, GriselMariom Fernandez. Efeitos de herbicidas na microbiota do solo em sistema fechado. 2007.
- CONAMA (2005). Resolução CONAMA Nº 357/2005. Disponível em ([https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2005\\_Res\\_CONAMA\\_357.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2005_Res_CONAMA_357.pdf)) , ACESSADO EM 01/03/2022.
- Couto, F. R., Ferreira, A. M., Pontes, P. P., & Marques, A. R.(2021). Physical, chemical and microbiological characterization of the soils contaminated by iron ore tailing mud after Fundão Dam disaster in Brazil. *Applied Soil Ecology*, 158, 103811. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103811>
- Costa OYA, Raaijmakers JM, Kuramae EE (2018) Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. *Frontiers in microbiology* 9, 1636.
- Deng J, Orner EP, Chau JF, Anderson EM, Kadilak AL, Rubinstein RL, Bouchillon GM, Goodwin RA, Gage DJ, Shor LM (2015). Synergistic effects of soil

- microstructure and bacterial EPS on drying rate in emulated soil micromodels. *Soil Biol Biochem* 83:116–124. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.12.006
- Dzionaek, A, Wojcieszynska D, Guzik U (2016) Natural carriers in bioremediation: a review. *Electron. J Biotechnol* 23: 28– 36, DOI: 10.1016/j.ejbt.2016.07.003
- Eivazi F, Tabatabai MA (1988) Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biol Biochem* 20:601–606.
- Epron, D.; Nouvellon, Y.; Deleporte, P.; Ifo, S.; Kazotti, G.; Thongo M’bou, A.; Mouvondy, W.; Saint-André, L.; Roupsard, O.; Jourdan, C.; Hamel, O. Soil carbon balance in a clonal Eucalyptus plantation in Congo: effects of logging on carbon inputs and soil CO<sub>2</sub> efflux. *Global Change Biology*, v. 12, p. 1021-1031, 2006.
- Ferreira DF (2014) Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciênc Agrotec* 38:109–112
- Ferreira, E. A.; Fialho, C. M. T.; Bibiano, C. S.; Braga, R. R.; Pereira, G. A. M.; Silva, D. V.; Santos, J. B. Atividade microbiana de solos cultivados com mandioca em sistema de policultivo, *Rev. Mag., Cruz das Almas – BA*, n. 27, n.3/4, p. 406-411, 2015.
- García, C., Hernández, M.T., Costa, F., 1997. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28, 123–134.
- Garcia LC, Ribeiro DB, de Oliveira Roque F, Ochoa-Quintero JM, Laurance WF (2017) Brazil’s worst mining disaster: corporations must be compelled to pay the actual environmental costs. *Ecol Appl* 27:5–9.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M., Seoane, S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*. 37, 877-887.
- Gomes, S. S; Gomes, M. S; Gallo, A. S; Mercante, F. M; Batistote, M; Silva, R. F. Bioindicadores de qualidade do solo cultivado com milho em sucessão a adubos verdes sob bases agroecológicas. *Rev. Fac. Agron. La Plata*, v. 114, p. 30-37, 2015.
- Hatje V, Pedreira RMA, Rezende CE, Schettini CAF, Souza GC, Marin DC, Hackspacher PC, (2017) The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Sci Rep* 7:10706. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x> Article number: 10706.
- Herzberger AJ, Duncan DS, Jackson RD (2014) Bouncing back: plant-associated soil microbes respond rapidly to prairie HOFFMANN, R. B.; MOREIRA, E. E. A.; Hoffmann, G. S. S.; Araújo, N. S. F. Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. *Braz. J. Anim. Env. Res., Curitiba*, v. 1, n. 1, p. 168-178, jul./set. 2018. establishment. *PLoS ONE*, 9:e115775.
- Hojati S, Nourbakhsh F (2006) Enzyme activities and microbial biomass carbon in a soil amended with organic and inorganic fertilizer. *J Agron* 5:563-579.

- IBAMA, (2015) Laudo Técnico Preliminar. Disponível em ([http://ibama.gov.br/phocadownload/noticias/noticias2015/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf](http://ibama.gov.br/phocadownload/noticias/noticias2015/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf).) Acesso em: 02/02/2022).
- IBAMA, (2020) Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. <http://www.ibama.gov.br/cites-e-comercio-externo/cites?id=117>. (Acessado 20/01/2022).
- Instituto Mineiro De Gestão Das Águas. Acompanhamento da Qualidade das Águas da Rio Doce após Rompimento da Barragem da Samarco no Distrito de Bento Rodrigues - Mariana/MG: tabelas de resultados. Belo Horizonte: IGAM, 2018. Planilha.
- Izquierdo, I. et al. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Applied Soil Ecology*, v. 30, n. 1, p. 3-10, 2005.
- Jacoby R, Peukert M, Succurro A, Koprivova A, Kopriva S (2017) The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition — current knowledge and future directions. *Front Plant Sci* 10.3389/fpls.2017.01617. 1-19.
- Jakelaitis, A.; Silva, A. A.; Santos, J. B.; Vivian, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 38, p. 118-127, 2008.
- Kandeler, E.; Tschirko, D.; Spiegel, H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biology and fertility of soils*, v. 28, n. 4, p. 343-351, 1999.
- Leal PL, Varón-López M, Prado IGO, Santos JV, Soares CRFS, Siqueira JO, Moreira FMS (2016) Enrichment of arbuscular mycorrhizal fungi in a contaminated soil after rehabilitation. *Braz J Microbiol* 47:853-862. doi: 10.1016/j.bjm.2016.06.001.
- Lehmann A, Zheng W, Rillig MC (2017) Soil biota contributions to soil aggregation. *Nat Ecol Evol* 1:1828-1835.
- Lenart-Boroń A, Boroń P (2014) The effect of industrial heavy metal pollution on microbial abundance and diversity in soils — a review. In: Hernandez-Soriano MC (ed) *Environmental risk assessment of soil contamination*, InTech, Rijeka 759–784.
- Laroca, Jackeline Vieira dos Santos et al. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, p. 1248-1258, 2018.
- Ma Y, Oliveira RS, Nai F, Rajkumar M, Luo Y, Rocha I, Freitas H (2015) The hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* harbors metal-resistant endophytic bacteria that improve its phytoextraction capacity in multi-metal contaminated soil. *J Environ Manage* 156:62-69.
- Martinez, C., Tabatabai, M. 1997. Decomposition of biotechnology by-products in soils. *Journal of Environmental Quality*. 26, 625-632.

- Medeiros, E. J. T; Cavalcante, F. G; Silva, M. A; Silveira, S. C; Martins, C. M. Diversidade cultura de Cepas de actinobactérias do semiárido. *Enci. Bio.*, v.15n.27.2018
- Mehrer, Ingrid; MOHR, Hans. Ammonium toxicity: description of the syndrome in *Sinapis alba* and the search for its causation. *Physiologia plantarum*, v. 77, n. 4, p. 545-554, 1989.
- Melloni R, Siqueira JO, Moreira FMS (2003) Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração de bauxita em reabilitação. *Pesq Agropec Bras* 38:267-276.
- Merino, C., Godoy, R., Matus, F. 2016. Soil enzymes and biological activity at different levels of organic matter stability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 16, 14-30.
- Mendes, I. C.; Fernandes, M. F.; Chaer, G. M.; Reis Junior, F. B. Biological functioning of brazilian cerrado soils under different vegetation types. *Plant and Soil*, v. 359, p. 183-195, 2012
- Monteiro LC, Verzignassi JR, Barrios SCL, Valle CB, Fernandes CD, Benteo GL and Libório CB (2016) *Brachiaria decumbens* intraspecific hybrids: characterization and selection for seed production. *Journal of Seed Science* 38:62-67.
- Morgan JB, Connolly EL (2013) Plant-soil interactions: nutrient uptake. *Nat Educ Knowl* 4:2
- Morgan, R.P.C., 1986. *Soil Erosion and Conservation*. Longman Scientific & Technical, London
- Mroczkowski, W.; Stuczyński, T. Toxic Effects of Ammonia Volatilizing from Sandy Soil Fertilized with Ammonium Salts and Urea on Barley Crop Decreases. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 15, n. 5, 2006.
- Nawaz MF, Bourrié G, Trolard F (2013) Soil compaction impact and modelling. A review, *Agron Sustainable Dev* 33:291–309. doi:10.1007/s13593-011-0071-8.
- De Neve S, Hofman G (2000) Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biol Fertil Soils* 30:544–549.
- Neto JF, Severiano EC, Costa KAP, Guimarães Júnnyor WS, Gonçalves WG, Andrade R (2015) Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci-Agron* 37:375-383. DOI: 10.4025/actasciagron.v37i3.19392
- Nogueira, M. A.; Albino, U. B.; Brandão-Júnior, O.; Braun, G.; Cruz, M. F.; Dias, B. A.; Duarte, R. T. D.; Gioppo, N. M.R.; Menna, O.; Orlandi, J. M.; Raimam, M. P.; Rampazo, L. G. L.; Santos, M. A.; Silva, M. E. Z.; Vieira, F. P.; Torezan, J. M. D.; Hungria, M.; Andrade, G. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural reforested and agricultural land use in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 115, p. 237-247, 2006
- Odum, E. P. The strategy of ecosystems development. *Science*, v. 164, p. 262-270, 1969.

- De Oliveira, Julyana Braga et al. Efeito da aplicação de biochar sobre o carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com melão. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 4, n. 1, p. 368-377, 2021.
- Pedroso DF, Barbosa MV, Santos JV, Pinto FA, Siqueira JO, Carneiro MAC (2018) Arbuscular mycorrhizal fungi favor the initial growth of *Acacia mangium*, *Sorghum bicolor*, and *Urochloa brizantha* in soil contaminated with Zn, Cu, Pb, and Cd. *Bull Environ Contam Toxicol* 101:386–391
- Pilon-Smits E (2005) Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology* 56:15–39 (2005).
- Pires APF, Rezende CL, Assad ED, Loyola R, Scarano FR (2017) Forest restoration can increase the Rio Doce watershed resilience. *Perspect Ecol Conserv* 15: 187–193.
- Prado IGDO, Silva MCS, Kimmelmeier K, Prado DGO, Pedrosa BG, Silva CC, Kasuya MCM (2019) Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. *Appl Soil Ecol* 141:84-95. 10.1016/j.apsoil.2019.05.008
- Pragana, R. B.; Nobrega, R. S. A.; Ribeiro, M. R.; Lustosa Filho, J. F. Atributos biológicos e dinâmica da matéria orgânica em latossolos amarelos na região do cerrado piauiense sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 851-858, 2012
- Preger AC, Rillig MC, Johns AR, Du Preez CC, Lobe I, Amelung W (2007) Losses of glomalin-related soil protein under prolonged arable cropping: a chronosequence study in sandy soils of the South African Highveld. *Soil Biol Biochem* 39:445–453.
- Pupin B, Freddi O, Nahas E (2009) Microbial alterations of the soil influenced by induced compaction. *Rev Bras Cienc Solo* 33:1207–1213.
- Rillig MC (2004) Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Can J Soil Sci* 84:355–363.
- Rillig MC, Wright SF, Nichols KA, Schmidt WF, Torn MS (2001) Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant Soil* 233:167–177.
- Santos JV, Rangel WM, Guimaraes AA, Jaramillo PMD, Rufini M, Marra LM, Lopez MV, Silva MAP, Soares CRFS, Moreira FMS (2013) Soil biological attributes in arsenic-contaminated gold mining sites after revegetation. *Ecotoxicology* 22:1526-1537.
- Santos JV, Varon-Lopez M, Soares CRFS, Leal PL, Siqueira JO, Moreira FMS (2016) Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. *Environ Sci Pollut Res* 23:6735-6748.
- Santos OSH, Avellar FC, Alves M, Trindade RC, Menezes MB, Ferreira MC, França GS, Cordeiro J, Sobreira FG, Yoshida IM, Moura PM, Baptista MB, Scotti M. R (2019) Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. *J Environ Qual* 48:439–449.
- Segura FR, Nunes EA, Paniz FP, Paulelli ACC, Rodrigues GB, Braga GUL, Pedreira Filho WR, Barbosa Jr F, Cerchiaro G, Silva FF, Batista BL (2016) Potential risks of

- the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environ. Pollut* 218:813–825. doi:10.1016/j.envpol.2016.08.005
- Silva AO, da Costa AM, Teixeira AFS, Guimarães AA, Santos JV, Moreira FMS (2018) Soil microbiological attributes indicate recovery of an iron mining area and of the biological quality of adjacent phytophysiognomies. *Ecol Indic* 93:142–151.
- Silva, Aline Oliveira et al. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193, n. 8, p. 1-18, 2021.
- Silva JFG, Gonçalves WG, Costa KAP, Neto JF, Brito MF, Silva FC, Severiano EC (2019) Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. *Semin-Cienc Agrar* 40:2973-2990.
- Silva, Mariana Misquita. Responsabilidade por danos ambientais: Os Desastres de Brumadinho e Mariana–Minas Gerais. 2019.
- Da Silva, Danielle Letícia; FERREIRA, Matheus Carvalho; SCOTTI, Maria Rita. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). *Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG*, v. 24, n. 1-2, 2015.
- Da Silva, Cassio Roberto; CUNHA, Fernanda Gonçalves; VIGLIO, Eduardo Paim. Rompimento da barragem de mineração de ferro em Mariana-Minas Gerais, Brasil: Impactos físico-químicos. In: III Congresso da Sociedade de Análise de Risco Latino Americana, São Paulo. 2016. p. 136151.
- Santoyo G, Moreno-Hagelsieb G, Orozco-Mosqueda Mdel C, Glick BR (2016) Plant growth-promoting bacterial endophytes *Microbiol Res* 183:92-99.
- Tak H.I., Ahmad F., Babalola O.O. (2013) Advances in the Application of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Phytoremediation of Heavy Metals. In: Whitacre D. (eds) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 223. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (Continuation of Residue Reviews)*, vol 223. Springer, New York. doi: 10.1007/978-1-4614-5577-6\_2
- Tabatabai MA (1994) Soil Enzymes. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*, Weaver, R.W., J.S. Angle and P.S. Bottomley (Eds.). Soil Sci Soc Am, Madison. 775-833.
- Tótola, M. R.; Chaer, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. *Tópicos em ciência do solo*, v. 2, n. 3, p. 195-276, 2002.
- Utobo, E., Tewari, L. 2015. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. *Applied Ecological Environmental Research*. 13, 147-169.
- Valencia-Cantero E, Hernández-Calderón E, Velázquez-Becerra C, López-Meza JE, Alfaro-Cuevas R, López-Bucio J (2007) Role of dissimilatory fermentative iron-reducing bacteria in Fe uptake by common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants grown in alkaline soil. *Plant Soil* 291:263-273.

- Valentim Dos Santos, Jessé et al. Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 7, p. 6735-6748, 2016.
- Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol Biochem*. 19:703–707
- van der Heijden MGA, Bardgett RD, Van Straalen NM (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecol Lett* 11:296–310. doi: 10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x
- Veena, V., Poornima, P., Parvatham, R., Sivapriyadharsini Kalaiselvi, K. 2011. Isolation and characterization of  $\beta$ -glucosidase producing bacteria from different sources. *African Journal of Biotechnology*. 10, 14907-14912.
- Wang W, Wang H, Feng Y, Wang L, Xiao X, Xi Y, Luo X, Sun R, Ye X, Huang Y, Zhang Z, Cui Z (2016). Consistent responses of the microbial community structure to organic farming along the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Sci Rep* 6:35046. doi: 10.1038/srep35046
- Wang YP, Li QB, Shi JY, Lin Q, Chen XC, Wu W, Chen YX (2008) Assessment of microbial activity and bacterial community composition in the rhizosphere of a copper accumulator and a non-accumulator. *Soil Biol Biochem* 40:1167–1177.
- Wang Y, Shi J, Wang H, Lin Q, Chen X, Chen Y (2007) The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter. *Ecotoxicol Environ Saf* 67:75–81
- Wright SF, Franke-Snyder M, Morton JB, Upadhyaya A (1996) Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant Soil* 181:193–203.
- Wright SF, Upadhyaya A (1996) Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein from arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci* 161:575–586.
- Wright SF, Upadhyaya A (1998) A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198:97-107.
- Zanchi, Carin Sgobi et al. Recovering soils affected by iron mining tailing using herbaceous species with mycorrhizal inoculation. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 232, n. 3, p. 1-13, 2021.
- Zhang J, Tang X, Zhong S, Yin G, Gao Y, He X (2017) Recalcitrant carbon components in glomalin-related soil protein facilitate soil organic carbon preservation in tropical forests. *Sci Rep* 7:2391

## 8 Anexos A

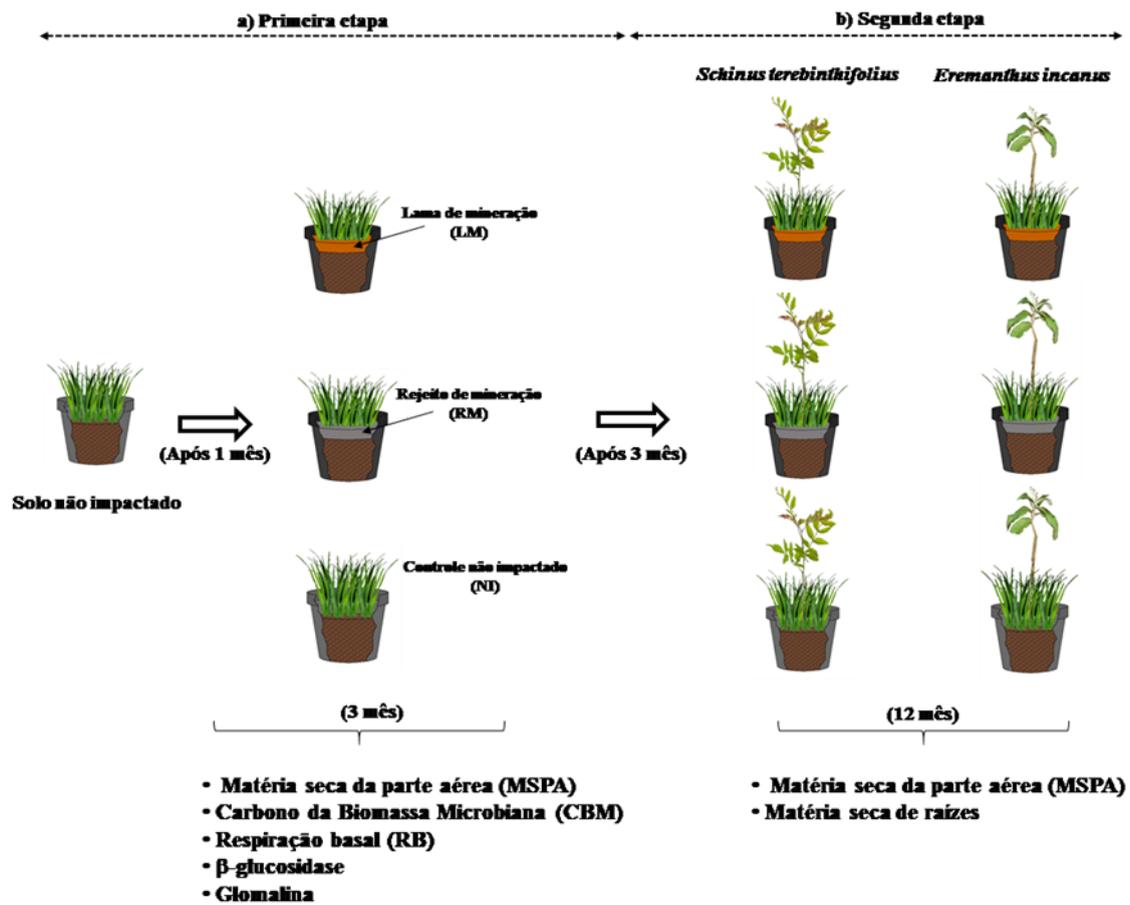


Figura 1. Descrição do experimento em casa de vegetação para se verificar o impacto da deposição de lama e rejeito de mineração de ferro sobre a atividade microbiana do solo e o estabelecimento de *U. decumbens* e *S. terebinthifolius* e *E. incanus*.

## 9 Anexos B

Tabela 1. Análise química de lama e rejeito de mineração de ferro e de um Latossolo Vermelho Distrófico utilizados no experimento.

Tratamento	pH	P	K	Ca	Mg	Zn	Fe	Mn	Cu	MO	Argila	Silte	Areia
	(H <sub>2</sub> O)	mg dm <sup>-3</sup>	-----	cmolc dm <sup>-3</sup>	-----	-----	mg dm <sup>-3</sup>	-----	-----	g kg <sup>-1</sup>	-----	%	-----
Rejeito	8,4	10,24	0,19	1,21	0,1	1,26	221,08	168,41	0,95	7,00	8,00	36,60	55,40
Lama	8,7	17,46	0,04	2,24	0,1	1,17	199,85	321,67	0,80	3,30	4,00	95,00	1,00
Controle	5,8	0,28	0,04	0,10	0,1	0,90	19,00	5,60	1,00	6,50	68,00	14,00	18,00

Tabela 2. Análises Bioquímicas de solo cultivado com *U. decumbens* impactado pela deposição de lama e rejeito de mineração de ferro em casa de vegetação.

Tratamentos	CBM ( $\mu\text{g C/g solo seco}$ )	Respiração basal ( $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )	QCO <sub>2</sub> ( $\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$ )	$\beta$ -Glucosidase ( $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$ )	Glomalina ( $\text{mg g}^{-1}$ )
Lama	633,28 a	18,79 a	41,20 a	456,82 c	2,88 b
Rejeito arenoso	698,46 a	20,96 a	32,12 a	712,46 b	2,91 b
Controle	790,02 a	17,44 a	23,19 a	842,53 a	3,57 a

Os resultados seguidos da mesma letra na coluna não diferem entre si no teste Scott-Knott com 5% de probabilidade.

Tabela 3. Parâmetros vegetativos de plantas cultivadas em solo impactado pela deposição de lama e rejeito de mineração de ferro em casa de vegetação.

Tratamentos	MSPA			MSR	
	U. decumbens*	S. <i>terebinthifolius</i>	E. <i>incanus</i>	S. <i>terebinthifolius</i>	E. <i>incanus</i>
----- g.vaso <sup>-1</sup> -----					
Lama	53,71 a	4,04 b	2,51 a	3,89 b	2,24 ad
Rejeito	53,20 a	5,47 a	3,15 a	4,36 a	2,63 a
Controle	55,57 a	5,11 a	2,75 a	5,12 a	2,12 a

\* *U. decumbens* foi avaliada após três meses de cultivo; *S. terebinthifolius* e *E. incanus* – avaliadas após 12 meses de cultivo. Os resultados seguidos da mesma letra na coluna não diferem entre si no teste Scott-Knott com 5% de probabilidade.

Tabela 4. Avaliação de trocas gasosas de *U. decumbens* cultivada em solo impactado pela deposição de lama e rejeito de mineração de ferro em casa de vegetação.

Tratamentos	A	Gs	E
	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{gs} - \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Rejeito	2,53 a	0,003 a	0,30 a
Solo não impactado	2,49 a	0,005 a	0,40 a
Lama	2,05 a	0,006 a	0,35 a

Os resultados seguidos da mesma letra na coluna não diferem entre si no teste Scott-Knott com 5% de probabilidade.

Tabela 5. Correlação de Pearson entre os atributos bioquímicos estudados.

	CBM	RB	$q\text{CO}_2$	$\beta\text{-gluc}$	GFE
CBM	1				
RB	-0,80*	1			
$q\text{CO}_2$	-0,90*	0,80*	1		
$\beta\text{-gluc}$	-	-	-0,50*	1	
GFE	-0,50*	-	0,60*	-	1

\*P < 0.05.

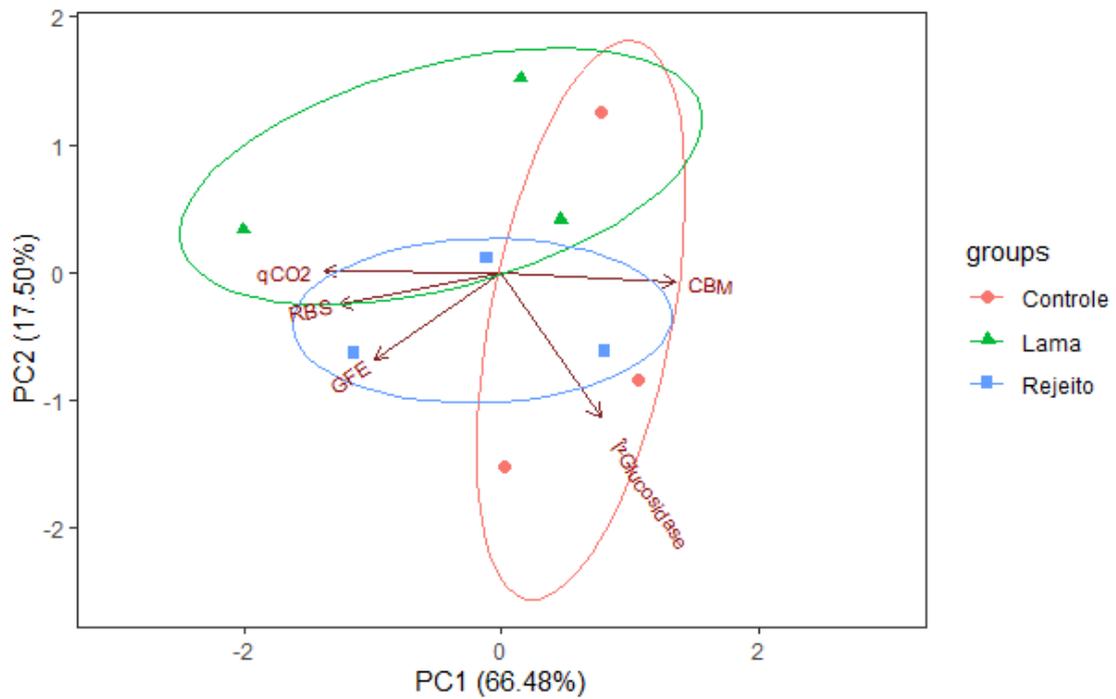


Figura 3. Análise de Componentes Materiais dos parâmetros bioquímicos Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), Respiração Basal do Solo (RBS), Quociente de CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>), Glomalina Facilmente Extraível (GFE) e β-Glucosidase.