



**MARIA CLARA SOARES**

***Acaulospora morrowiae* E BIOCÁRVÃO DE CASCA DE CAFÉ:  
EFEITOS A CURTO PRAZO SOB A QUALIDADE DE SOLOS  
IMPACTADOS POR REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

**LAVRAS - MG  
2025**

**MARIA CLARA SOARES**

***Acaulospora morrowiae* E BIOCÁRVÃO DE CASCA DE CAFÉ: EFEITOS A CURTO  
PRAZO SOB A QUALIDADE DE SOLOS IMPACTADOS POR REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO**

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

Prof. Dr. Marcos Aurélio Carbone Carneiro  
Orientador

Dr. Davi Santos Tavares  
Coorientador

**LAVRAS- MG**

**2025**

**MARIA CLARA SOARES**

***Acaulospora morrowiae* E BIOCARVÃO DE CASCA DE CAFÉ: EFEITOS A CURTO  
PRAZO SOB A QUALIDADE DE SOLOS IMPACTADOS POR REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO**

***Acaulospora morrowiae* AND COFFEE PEEL BIOCHARN: SHORT-TERM EFFECTS ON  
THE QUALITY OF SOILS IMPACTED BY IRON ORE REJECTING**

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

APROVADA em 16 de janeiro de 2025

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro (UFLA)

MS. Vinicius de Assunção Coelho (UFLA)

Dra Ingrid Fernanda Santana Alvarenga (UFLA)

Profa DraMeire Aparecida Silvestrini Cordeiro (UFMS)

Dr. Arnon Afonso de Souza Cardoso (UFLA)

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro  
Orientador

Dr. Davi Santos Tavares  
Coorientador

**LAVRAS- MG**

**2025**

## RESUMO

A qualidade do solo envolve sua capacidade de gerar serviços ecossistêmicos considerando seus aspectos físicos, químicos e biológicos, os quais foram afetados pela deposição de rejeito oriundo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana – MG), trazendo prejuízos agrícolas e ambientais para a região. A introdução de uma fonte de carbono, como o biocarvão, e a inoculação de microrganismos benéficos como os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), contribuem positivamente para a qualidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar se a inoculação de FMA associada ao biocarvão de casca de café pode aumentar a atividade microbiana e promover a melhoria da qualidade de solos afetados pela deposição de rejeito da mineração de ferro. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação na UFLA, em esquema fatorial com delineamento inteiramente casualizado, sendo o primeiro fator diferentes doses de biocarvão (0, 5, 10, 15 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>) e o segundo fator a presença ou ausência de *Acaulospora morrowiae*, com 4 repetições. Duas plantas de *Urochloa brizantha* cv. Piatã foram cultivadas em vasos de 2 L contendo solo afetado pelo rejeito de minério de ferro coletado em junho de 2023 nas coordenadas 20°18'01" S e 43°13'56" O. Foram determinadas a altura total das plantas, a altura de inserção da última folha (AIUF), o diâmetro do caule e a massa seca das raízes e da parte aérea. Quantificou-se também as enzimas β-glicosidase e FDA, a respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (CBM), o parâmetro  $qCO_2$  e a colonização micorrízica das raízes. Foi realizada análise estatística através do programa estatístico Sisvar®. A AIUF foi menor na dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup> e na presença de FMA, o que é positivo considerando que não houve diferença significativa nas demais avaliações de crescimento da planta. Não houve diferença estatística para colonização micorrízica. A enzima β-glicosidase apresentou maior atividade com 15 e 20 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarvão. Quanto aos parâmetros CBM e  $qCO_2$ , havendo interação entre os fatores, observou-se que com a inoculação de FMA na dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup> foi mais eficiente, por outro lado o tratamento sem a inoculação de *Acaulospora morrowiae* com a dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup> apresentou melhores respostas em relação aos demais. A não inoculação de *Acaulospora morrowiae* associada a dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup>, mostrou-se a mais promissora no aumento da atividade, da biomassa microbiana, na mitigação de estresse e conseqüentemente, na melhora da qualidade do solo. A associação entre biocarvão e FMA também demonstrou potencial em auxiliar na recuperação de áreas afetadas por rejeito de mineração de ferro a curto prazo, e para isso a dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup> foi mais efetiva.

**Palavras-chave:** fungo micorrízico arbuscular; qualidade do solo; biocarvão; microbioma; minério de ferro.

## ABSTRACT

Soil quality involves its capacity to generate ecosystem services considering its physical, chemical and biological aspects, which were affected by the deposition of tailings from the Fundão dam collapse (Mariana - MG), causing agricultural and environmental damage to the region. The introduction of a carbon source, such as biochar, and the inoculation of beneficial microorganisms such as arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), contribute positively to soil quality. The objective of this study was to evaluate whether the inoculation of AMF associated with coffee husk biochar can increase microbial activity and promote the improvement of the quality of soils affected by the deposition of iron mining tailings. The experiment was developed in a greenhouse at UFLA, in a factorial scheme with a completely randomized design, the first factor being different doses of biochar (0, 5, 10, 15, and 20 Mg ha<sup>-1</sup>) and the second factor the presence or absence of *Acaulospora morrowiae*, with 4 replicates. Two *Urochloa brizantha* cv. Piatã plants were grown in 2 L pots containing soil affected by iron ore tailings collected in June 2023 at coordinates 20°18'01" S and 43°13'56" W. The total height of the plants, the height of the last leaf insertion (AIUF), the stem diameter, and the dry mass of the roots and shoots were determined. The enzymes β-glucosidase and FDA, soil basal respiration (SBR), microbial biomass carbon (MBC), the qCO<sub>2</sub> parameter, and mycorrhizal colonization of the roots were also quantified. Statistical analysis was performed using the Sisvar® statistical program. The AIUF was lower at the dose of 5 Mg ha<sup>-1</sup> and in the presence of AMF, which is positive considering that there was no significant difference in the other plant growth evaluations. There was no statistical difference for mycorrhizal colonization. The enzyme β-glucosidase showed greater activity with 15 and 20 Mg ha<sup>-1</sup> of biochar. Regarding the CBM and qCO<sub>2</sub> parameters, with interaction between the factors, it was observed that the inoculation of AMF at the dose of 15 Mg ha<sup>-1</sup> was more efficient. On the other hand, the treatment without the inoculation of *Acaulospora morrowiae* with the dose of 5 Mg ha<sup>-1</sup> showed better responses compared to the others. The non-inoculation of *Acaulospora morrowiae* associated with the dose of 5 Mg ha<sup>-1</sup> showed the most promising in increasing the activity, microbial biomass, stress mitigation and consequently, improving soil quality. The association between biochar and FMA also demonstrated potential in assisting in the recovery of areas affected by iron mining waste in the short term, and for this purpose the dose of 15 Mg ha<sup>-1</sup> was more effective.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungus; soil quality; biochar; microbiome; iron ore.

## LISTA DE GRÁFICOS E TABELAS

<b>Tabela 1. Significância estatística da Análise de Variância (ANOVA).....</b>	<b>23</b>
<b>Tabela 2. Média da altura de inserção da última folha (cm) a partir da presença ou ausência de FMA no solo.....</b>	<b>30</b>
<b>Gráfico 1. Efeito de doses crescentes na altura de inserção da última folha (cm) das plantas.....</b>	<b>30</b>
<b>Gráfico 2. Efeito de doses crescentes na atividade enzimática da <math>\beta</math>-glucosidase (<math>\mu\text{g}</math> p-nitrofenol g solo seco <math>\text{h}^{-1}</math>).....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 3. Média do teor FDA (<math>\mu\text{g}</math> fluoresceína <math>\text{g}^{-1}</math> solo seco <math>\text{h}^{-1}</math>) no solo para diferentes doses de biocarvão de casca de café x presença ou ausência de FMA.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 4. Média do teor CBM (<math>\mu\text{g}</math> C <math>\text{g}^{-1}</math> solo) no solo para diferentes doses de biocarvão de casca de café x presença ou ausência de FMA.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabela 5. Média da RBS em (<math>\text{mg.C-CO}_2</math> <math>\text{g}^{-1}</math> <math>\text{h}^{-1}</math>) a partir da presença ou ausência de FMA no solo.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 6. Média do parâmetro <math>q\text{CO}_2</math> para diferentes doses de biocarvão de casca de café x presença ou ausência de FMA.....</b>	<b>34</b>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>10</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>17</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>20</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>27</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>28</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2015, o rompimento da barragem Fundão, contendo rejeitos de processamento de minério de ferro da mineradora Samarco, liberou na bacia hidrográfica do rio Doce cerca de 60 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos ricos em oxi-hidróxidos de ferro (Marta-Almeida et al., 2016; Silva et al., 2017). Esse evento trouxe muitos prejuízos ambientais como a morte de centenas de peixes e invertebrados e aumento do conteúdo de elementos potencialmente tóxicos do solo e ao longo dos cursos hídricos adjacentes à barragem (Fonseca, 2016; Gomes et al., 2017; Queiroz et al., 2018).

Devido a baixa fertilidade e reduzida capacidade de infiltração do rejeito, plantas cultivadas nesse substrato têm seu crescimento comprometido, além de baixo acúmulo de biomassa (Esteves et al., 2020). A partir disso, o cultivo inicial de espécies mais adaptáveis como os capins braquiária (Takamori, 2018) seriam uma alternativa para a revegetação dessas áreas. As gramíneas do gênero *Urochloa* são amplamente utilizadas em pastagens no Brasil (Costa et al., 2007) e caracterizam-se por apresentarem fácil adaptação em diferentes condições de solo e clima, além de possuírem baixa exigência de fertilidade e resistência a manejos inadequados (Fagundes et al., 2006).

O rejeito, além de prejudicar o desenvolvimento vegetal, também prejudica a biomassa e a atividade microbiana nos solos afetados (Santos et al., 2019). Esses fatores estão intimamente ligados à qualidade do solo (Islam & Well, 2000), e conseqüentemente ao seu potencial de sustentar a produtividade de espécies vegetais (Doran & Parkin, 1994). A partir disso, a introdução de organismos benéficos que auxiliam no crescimento das plantas em ambientes estressantes podem estimular o desenvolvimento vegetal e reflorestamento dessas áreas.

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), realizam associações mutualísticas com as raízes da maioria das plantas, cumprindo um papel fundamental na sobrevivência, no crescimento e no desenvolvimento vegetal (Silveira et al., 2002; Nunes et al., 2008a). As micorrizas potencializam a absorção de nutrientes das plantas, permitindo uma maior exploração do solo pelas raízes e conferindo maior tolerância aos estresses bióticos e abióticos. (Schreiner, 2007; Nunes et al., 2008b). Os FMA podem atuar como biocontroladores ao aumentar a tolerância das plantas aos metais tóxicos, atenuando os danos causados por eles, além de reduzirem a disponibilidade desses elementos para as plantas (Turnau et al., 2006; Soares; Carneiro, 2010).



Esses organismos formam a mais ampla simbiose entre fungos e plantas na natureza e podem ser encontrados nos mais variados biomas e ecossistemas (Smith & Read, 1997), acredita-se que cerca de 80% das espécies vegetais são capazes de interagir com os FMA (Redecker et al., 2013). Apesar disso, fatores como o teor de matéria orgânica no solo, pH, temperatura e teor de oxigênio podem afetar a eficiência da colonização micorrízica (Allen et al., 1995; Silveira & Freitas, 2007), comprometendo os benefícios gerados por essa interação.

O biocarvão pode favorecer a presença desses microrganismos no solo, uma vez que atua como condicionador, melhorando diversos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Albuquerque et al., 2014), tendo grande potencial no aumento da qualidade do solo e interferindo, conseqüentemente, na colonização micorrízica. Biocarvão ou biochar é qualquer material rico em carbono obtido de biomassa carbonizada sob baixa atmosfera de oxigênio (Dodor et al., 2018) podendo ser de origem vegetal ou animal, como borra de café, casca de café, cama de aviário, restos de podas de árvores, entre outros resíduos orgânicos (Canuto et al. 2019).

A partir disso, a hipótese desse trabalho é que a associação entre biocarvão e FMA auxiliará na recuperação das áreas afetadas por rejeito de mineração de ferro aumentando a atividade, a biomassa microbiana, o crescimento vegetal, e conseqüentemente, a qualidade desse solo. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da inoculação com *Acaulospora morrowiae* associado a aplicação de biocarvão de casca de café na qualidade de solos impactados por rejeito de minério de ferro.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

Dia 05 de novembro de 2015, com o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, ocorreu o maior desastre gerado pela atividade mineradora no mundo em termos de volume de rejeito liberado e de extensão geográfica atingida (Carmo et al., 2017). Contabiliza-se que 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito da mineração de ferro foram lançados no meio ambiente, percorrendo os rios Gualaxo do Norte, Rio Carmo e Rio Doce, chegando até o Oceano Atlântico, afetando diretamente cerca de 37 municípios mineiros e 4 capixabas, removendo mais de 2.000 ha de vegetação nos primeiros 77 Km (IBAMA, 2015).

A deposição do rejeito nos cursos d'água gerou o sufocamento dos peixes impactando a atividade pesqueira na região, e milhares de cidadãos tiveram interrupção do abastecimento de água, somado a isso, houve a inundação de áreas agrícolas e pastagens, prejudicando a atividade agropecuária da região. A fauna, a flora e a geomorfologia da região foram prejudicadas, áreas de reserva legal foram removidas, afetando cerca de 324 hectares de Mata Atlântica. Quanto aos prejuízos humanos, contabilizou-se 19 mortes, entre trabalhadores da mineradora e moradores de Bento Rodrigues, além disso, estima-se que 1200 pessoas ficaram desabrigadas, afetando malhas urbanas na bacia do Rio Doce. (Porto, 2016 ; Costa, 2018).

A interferência na atividade agrícola da região foi gerada pela deposição do rejeito em áreas anteriormente agricultáveis, sobretudo devido à sua composição que dificulta o desenvolvimento vegetal. Além disso, alguns autores retratam uma possível bioacumulação de metais em níveis potencialmente tóxicos nas plantas, invisibilizando seu consumo por seres humanos, (Silva et al., 2015; Fernandes et al., 2016), já outros estudos demonstram que as concentrações de elementos potencialmente tóxicos estão abaixo do limite recomendado pelo Regulamento Brasileiro e, apesar da alta concentração de ferro e manganês no rejeito, estes não estão totalmente disponíveis para as plantas (EMBRAPA, 2018), e o consumo de alimentos cultivados nesse solo não trará implicações à saúde humana.

Para o sucesso de uma atividade agrícola é essencial que o plantio seja realizado em solos adequados química, física e biologicamente, mas o solo resultante da deposição do rejeito teve sua composição e estrutura alterada, sendo agora classificados como tecnosolo por possuir um mosaico complexo de materiais e fatores, devido a influência humana na sua constituição, refletindo em uma alta heterogeneidade e diversidade (IUSS WORKING GROUP WRB, 2006)

A composição e as propriedades de rejeitos advindos da atividade mineradora dependem da mineralogia do corpo do minério, dos produtos usados para extrair os metais de interesse, da eficiência do método de extração e do grau de intemperismo durante o armazenamento (Kossoff et al., 2014). O rejeito de minério proveniente da barragem de Fundão é pobre em matéria orgânica, possui baixa fertilidade, é deficiente em muitos nutrientes essenciais com teores muito baixos de P, Zn, Ca, Mg e Cu, além disso, apresenta pH alcalino, o que reduz a disponibilidade dos micronutrientes para as plantas (Esteves, 2020; De Almeida, 2020). Em análises químicas determinou-se que o teor de Na trocável é de 14,4 (cmolc kg<sup>-1</sup>), indicando alta salinidade (Costa, 2018), além disso, Fe e Mn têm sido detectados em elevadas concentrações no rejeito (Cruz et al.

2020) .

Do ponto de vista físico, o rejeito apresenta textura franco-siltosa, com 88 g/kg de argila, 550 g/kg de areia e 362 g/kg de silte. Devido a alta concentração no substrato de areia fina e silte, o tamanho dos poros é menor, assim como a permeabilidade, o que dificulta a aeração. A porosidade total, estimada pela umidade na saturação, é relativamente baixa, semelhante a solos de textura mais fina. Devido essas características o rejeito tem menor retenção de umidade, menor capacidade de troca catiônica (CTC) e, conseqüentemente maior perda de nutrientes por lixiviação (Costa, 2018).

## 2.2 PASTAGENS

O tecnosolo gerado com a liberação do rejeito não possui condições ideais ao desenvolvimento vegetal, principalmente devido a baixa disponibilidade de alguns elementos essenciais e excesso de outros (Cruz et al., 2020) . Somado a isso, a textura gerada dificulta o desenvolvimento radicular, devido a baixa infiltração de água e baixa aeração. O plantio de espécies mais adaptáveis a essas condições é a melhor alternativa para a retomada da atividade agropecuária nessa região, a exemplo das gramíneas do gênero *Urochloa* (Costa et al., 2007), que vêm sendo utilizadas, com relativo sucesso, na recuperação de áreas degradadas pela mineração.

O gênero *Urochloa* está inserido na tribo Paniceae, subfamília Panicoideae e família Poacea (Catasus Guerra, 1997), sendo popularmente classificado como gramínea. Essas plantas apresentam um rápido crescimento, cobrindo rapidamente a superfície do solo, o que diminui seu tempo de exposição (Almeida, 2002), além disso, têm facilidade em se estabelecer em diferentes ambientes, persistência, bom valor nutritivo, poucos problemas com doenças, alta produção de matéria seca, boa adaptabilidade, além de apresentar bom crescimento durante a maior parte do ano, inclusive no período seco (Costa et al., 2005).

Estima-se que aproximadamente 193 milhões de hectares do território brasileiro é formado por pastagens, seja de espécies nativas ou cultivadas (ABIEC, 2023), dessas, cerca de 80% das áreas utilizadas para a produção pecuária apresentam pastagens formadas por plantas do gênero *Urochloa* (Paula et al., 2017), sendo a principal fonte de alimento para bovinos de corte e de leite no país (Silva; Corrêa Landgraf; Oliva Machado, 2013).

Há uma grande diversidade de cultivares de braquiária no país, entre elas o capim- piatã (*Urochloa brizantha* cv. Piatã) que foi lançado em 2007. Possui hábito de crescimento ereto, com a formação de touceiras que variam de 0,85 m a 1,10 m de altura, com colmos finos e verdes. Suas folhas medem até 45 cm de comprimento e 1,8 cm de largura, não havendo pelos na lâmina foliar, que se mostra áspera na face superior e tem bordas serrilhadas e cortantes. O que o diferencia das demais cultivares é a sua inflorescência, que possui até 12 ráceros. (Valle et al., 2007).

O capim-piatã pode ser cultivado em todo o país, mas para alcançar seu potencial produtivo certos fatores de qualidade do solo devem ser considerados. O capim-piatã é indicado para solos de média fertilidade e apresenta grau moderado de tolerância ao alagamento do solo, sendo mais indicado para solos arenosos (Valle et al., 2007).

### 2.3 BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

Define-se por qualidade do solo a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens (Doran & Parkin, 1994). Esse conceito se baseia na capacidade do solo de exercer suas funções na natureza, funcionando como meio para o crescimento das plantas, atuando no estoque e ciclagem de nutrientes na biosfera e servindo como tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de compostos prejudiciais ao ambiente (Larson & Pierce, 1994; Karlen et al., 1997) e considera também os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo que possibilitam suas funções ecológicas (Vezzani, 2009).

Este parâmetro, devido a sua complexidade, ainda não é bem estabelecido. Apesar disso, a identificação de um índice de qualidade do solo (IQS) é de extrema importância para quantificar e definir manejos adequados para diversas situações. Um IQS deve ser prático, fácil de medir e reprodutível, além disso, deve identificar um conjunto de propriedades do solo, atendendo aos seguintes critérios: elucidar processos do ecossistema e relacionar aos processos-modelo; integrar propriedades biológicas, físicas e químicas do solo e os respectivos processos; ser acessível a muitos usuários e aplicável a condições de campo; ser sensível a variações de manejo e de clima

ao longo do tempo; e, quando possível, ser componente de banco de dados já existente (Doran & Parkin, 1994), devendo descrever a maioria dos processos ecológicos do solo (Doran, 1997).

Porém, estabelecer os parâmetros adequados para a quantificação do índice de qualidade do solo não é tão simples, devido à complexidade do solo e a grande variação de fatores químicos, físicos e biológicos que controlam os processos biogeoquímicos e suas variações em função do tempo e do espaço, o que dificulta a identificação de parâmetros chave que sirvam como indicadores de seu funcionamento (Mendes, 2009).

Alguns autores tendem a considerar os aspectos químicos, físicos e biológicos na quantificação da qualidade do solo (Doran & Parkin, 1994; Larson & Pierce, 1994), já outros observaram um destaque dos parâmetros microbiológicos em relação aos demais (Schloter et al., 2003; Bending et al., 2004; Monokrousos et al., 2006), uma vez que a atividade da microbiota é extremamente sensível às mudanças dos solo.

Os microrganismos, juntamente com os outros componentes da matéria orgânica do solo como raízes e a fauna, são utilizados como bioindicadores. Eles estão intimamente ligados ao funcionamento do solo e sua dinâmica, além de apresentarem uma estreita relação com os componentes químicos e físicos. Além disso, são responsáveis por diversos serviços ambientais como formação dos solos, decomposição de resíduos orgânicos, biorremediação de compostos tóxicos, entre outros. A base de informação sobre dados biológicos ainda é muito pequena, por isso em algumas situações ainda é difícil interpretar seus valores (Tótola & Cher, 2002) apesar disso, algumas análises têm demonstrado potencial na quantificação e medição da qualidade do solo.

A biomassa microbiana do solo é a parte viva mais ativa da matéria orgânica e é constituída principalmente por fungos, bactérias e arqueas (Kaschuk et al., 2009). Apesar de sua importância, essa parcela representa apenas de 1 a 5% do carbono total do solo, e suas alterações são detectadas com facilidade (Smith & Paul, 1990), a outra fração é mais estável, composta principalmente de matéria morta e resistentes à mudanças (Rice et al., 1996). A biomassa é a fração mais dinâmica do C orgânico do solo, por essa razão, esse aspecto tem sido proposto como um indicador do estado e das alterações da matéria orgânica total do solo e sugerido como uma medida sensível do aumento ou decréscimo de sua quantidade.

A quantidade de CO<sub>2</sub> liberada pela respiração dos microrganismos é um dos métodos mais tradicionais e mais utilizados para avaliar a atividade metabólica da população microbiana

do solo (Zilske, 1994). Os ensaios para respiração microbiana são comumente realizados em vasos hermeticamente fechados, incubados sob condições controladas de temperatura e umidade em laboratório. A partir de seus dados é possível quantificar o quociente metabólico ( $qCO_2$ ), sendo este um índice que expressa a relação entre a respiração basal do solo e o tamanho da biomassa microbiana. Esse quociente, em teoria prediz que comunidades microbianas sob estresse (metais pesados, limitações de nutrientes, baixo pH, etc.) ou expostas a qualquer tipo de perturbação (cultivo, queimada, etc.) serão menos eficientes em converter o C assimilado em nova biomassa, pois uma maior parte desse C deverá ser utilizada para fornecer energia para processos metabólicos necessários à manutenção da homeostase celular. Por conseguinte, sob essas condições de estresse ou distúrbio, o  $qCO_2$  será maior quando comparado a ambientes mais estáveis, ou mais próximos do seu estado de equilíbrio (Anderson & Domsch, 1978).

As enzimas do solo participam das reações metabólicas, responsáveis por seu funcionamento e pela manutenção dos seres vivos, elas também atuam como catalisadoras de várias reações que resultam na decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação da matéria orgânica e estruturação do solo (Mendes; Vivaldi, 2001). Os ensaios para determinação da atividade enzimática são simples e rápidos e baseiam-se na adição de substratos específicos para cada tipo de enzima a uma amostra de solo suspensa em um tampão (Dick et al., 1996). Após um curto período de incubação, as amostras são filtradas e é realizada a determinação do produto, por colorimetria. Quanto maior a intensidade da coloração, maior a quantidade de produto formado e, conseqüentemente, maior a atividade enzimática do solo. Vários trabalhos têm demonstrado o grande potencial das análises enzimáticas como indicadores sensíveis para detectar diferenças entre solos e mudanças que variam em função da influência antrópica nos mesmos (Dick et al., 1996; Mendes et al., 2003).

## 2.4 FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES

Os microrganismos desempenham um papel essencial na ciclagem de nutrientes do solo; (Miransari, 2013), com essa intervenção as plantas têm um maior aproveitamento dos elementos, o que favorece seu crescimento. Neste ponto, as micorrizas merecem destaque.

O termo micorriza vem da junção das palavras gregas “mico”, que significa fungo e “riza” que quer dizer raiz (Oliveira, 2009), sendo assim, os fungos micorrízicos são aqueles que se

associam mutualisticamente com a as raízes das plantas gerando diversos benefícios como, melhor absorção de água e aproveitamento de nutrientes (Moreira et al., 2019). Dentro desse grupo de organismos, aqueles classificados no filo Glomeromycota, são amplamente distribuídos no ambiente em associação com as plantas (Schurbler et al., 2001; Saggin-Júnior & Silva, 2005), e interagem como aproximadamente 80% de espécies de plantas vasculares em todos os principais biomas terrestres (Smith et al., 2010).

Os FMA são organismos biotróficos obrigatórios, ou seja, dependem da associação com as raízes para sobreviverem (Souza et al., 2010). Sua capacidade de colonização depende do genótipo do fungo e de características do solo, como pH, conteúdo de nutrientes, temperatura, bactérias e pesticidas presentes. Todos esses pontos podem influenciar desde a germinação dos esporos até a formação de apressório e crescimento intra radicular (Giovannini et al., 2020), a partir disso, as áreas degradadas frequentemente apresentam baixo número de propágulos e diversidade de FMA.

Os organismos do filo Glomeromycota, produzem arbúsculo, estrutura intensamente ramificada, formada a partir de hifas que penetram as células da raiz vegetal acumulando glicogênio e lipídios (Back; Altmann; De Souza, 2016). Através do arbúsculo o fungo fornece nutrientes minerais e água do solo para a planta e, em troca, recebe compostos com carbono (Smith; Read, 2008).

Há um grande destaque da capacidade dos FMA em potencializar a absorção do fósforo, uma vez que os solos brasileiros que apresentam, em sua maioria, baixa concentração desse nutriente e alta capacidade de fixação, tornando-o menos disponível às plantas (Valadares; Mescolotti; Cardoso, 2016). Esses microrganismos são muito estudados para melhoria da nutrição fosfatada (Cruz et al., 2017).

Esses fungos são capazes de aumentar a resistência da planta a estresses bióticos e abióticos, incluindo tolerância à seca, a patógenos e a ambientes com altas concentrações de metais pesados (Cortat, 2022). Eles também produzem uma glicoproteína de natureza hidrofóbica denominada glomalina (Nobre et al., 2015). Dentre as principais funções desta proteína, cuja natureza é a resistência ao calor, a insolubilidade e a hidrofobicidade, estão o auxílio na proteção das hifas fúngicas à dessecação e na agregação das partículas minerais e orgânicas presentes no solo (Barto et al., 2010).

Esses organismos também são capazes de regular o teor de metais pesados na planta, e

diversos mecanismos podem explicar como os FMA desempenham esse papel, entre eles está a capacidade das micorrizas de reterem esses elementos em suas estruturas fúngicas e nas raízes, reduzindo sua translocação para a parte aérea (Silva, 2006), reduzindo, conseqüentemente sua toxicidade. A glomalina também apresenta a capacidade de reter esses metais (Silva et al., 2006; González-Chaves et al., 2004). Pode ocorrer também, entre outros mecanismos, a quelação desses elementos na zona radicular (Karldorf et al., 1999) e a compartimentalização dos metais pesados em órgãos específicos (González-Chaves, 2002)

A retenção desses metais pelas hifas pode ser feita pela fitoextração, quando as plantas micorrizadas exibem aumento na absorção de metais pesados e no transporte destes da raiz para a parte aérea, ou com a fitoestabilização, quando os FMA contribuem para imobilização dos metais pesados no solo (Wright et al., 2018). Além desses mecanismos, a própria melhoria nutricional das plantas associadas a micorrizas favorece o estabelecimento das plantas e sua tolerância a ambientes estressantes.

Somado a todos esses benefícios os FMA também interferem na formação e estabilização de agregados do solo (Rillig et al., 2015), uma vez que a rede de hifas, criam um esqueleto estrutural que atua na junção e adesão das partículas do solo (Vilela et al., 2014).

## 2.5 BIOCARVÃO

O biocarvão, conhecido como biochar, atua nas propriedades físicas do solo influenciando sua estrutura, porosidade, diâmetro dos poros e densidade (Brady & Weil, 2008), esses tópicos afetam diretamente a disponibilidade de água e aeração do solo, requisitos fundamentais para um bom desenvolvimento vegetal e microbiano.

O biocarvão é o produto da combustão incompleta de material orgânico. Possui alto teor de C e grande área superficial devido a sua porosidade, em consequência do processo de queima na ausência do oxigênio (Madari et al., 2009). Além disso, apresenta uma alta relação C:N devido ao baixo teor de nitrogênio, por este motivo sua degradação é lenta, podendo atuar no ambiente por milhares de anos (Bird et al. 1999). Porém, sua exata composição química e estrutural depende da matéria prima e das condições de pirólise (Souza, 2024).

Durante a pirólise a matéria orgânica se decompõe ao ser exposta a temperaturas entre 200-900 °C em um ambiente com baixa disponibilidade de oxigênio (Sanchez et al., 2020), esse



processo que consiste de uma série de reações simultâneas e sucessivas, que incluem desidratação, despolimerização, isomerização, aromatização, descarboxilação e carbonização (Xiao et al., 2020). A forma como essa pirólise ocorre influencia diretamente o material que será gerado de forma que biocarvões produzidos por meio de pirólise rápida tem uma taxa mais lenta de decomposição no solo do que os biocarvões produzidos por meio de pirólise lenta (OK et al., 2015)

O processo de fabricação do biocarvão deve ser cuidadoso, uma vez que estudos revelam efeitos adversos nas propriedades químicas e biológicas do solo, na produtividade das culturas e na viabilidade econômica de utilização em grandes áreas (Alvarez-CampoS, 2018), a depender da matriz utilizada. Relatos apontam para a presença de contaminantes orgânicos no biocarvão, incluindo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), compostos orgânicos voláteis (COV), e dioxinas, sendo uma questão de preocupação referida à contaminação do solo e aos riscos à saúde podendo ter efeito negativo nas propriedades e funções do solo (Brtnicky et al., 2021).

Por outro lado, o biocarvão atua na imobilização do carbono e aumenta a concentração de sítios quimicamente reativos, fazendo ligações com os nutrientes presentes no ambiente, e conseqüentemente, aumentando a CTC do solo (Glaser et al., 2003). Além disso, o biocarvão pode elevar o pH, auxiliando na neutralização de solos ácidos, resultando na melhoria da fertilidade do solo ao tornar os nutrientes mais acessíveis (Lima et al., 2015)

O biocarvão também exerce influência na composição, diversidade e atividade dos microrganismos presentes no solo (Purkayastha et al., 2015), favorece a abundância e diversidade de microrganismos benéficos ao solo, proporcionando um micro-habitat que neutraliza o ataque de microrganismos patogênicos (Ajema, 2018). Quanto ao enriquecimento do solo com carbono, os biocarvões, proporcionam aumento na biomassa microbiana, elevando os teores de carbono orgânico do solo (Lehmann; Joseph, 2015). Portanto, esse material apresenta potencial para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, proporcionando o incremento da produtividade das culturas e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Diatta et al., 2020).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação no Departamento de Ciências do

Solo da UFLA (21°13'35" S; 44°58'43" O), em fevereiro de 2024, sendo conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial dispendo de dois fatores, o primeiro fator é composto por diferentes doses de biocarvão (0, 5, 10, 15 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>) e o segundo fator é a inoculação do FMA *Acaulospora morrowiae* (presença e ausência), totalizando dez tratamentos com 4 repetições e 40 unidades experimentais.

Inicialmente, foi realizada a coleta de solo na cidade de Mariana – MG em uma região afetada pelo rompimento da barragem de fundão (20°18'01" S; 43°13'56" O), o material coletado foi seco e peneirado, formando terra fina seca ao ar, sendo submetido, em seguida, às análises químicas. Foram analisados os parâmetros pH em água e CaCl<sub>2</sub> como descrito em (Donagemma et al., 2011), já o teor de macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) foram determinados por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) de acordo com Martins e Reissmann (2007). Em seguida, o solo foi peneirado e distribuído em vasos de 2 L.

As doses de biochar correspondentes foram incorporadas e a adubação feita a partir das informações fornecidas pela 5ª Aproximação (Alves, 2019). A fonte de nitrogênio utilizada foi uréia em uma dose de 220 Kg ha<sup>-1</sup> em duas parcelas, para potássio usou-se o cloreto de potássio aplicando-se 100 Kg ha<sup>-1</sup> e para o fósforo utilizou-se o fertilizante superfosfato simples na metade da dose indicada pelo manual, ou seja, 170 Kg ha<sup>-1</sup> com o objetivo de potencializar o desenvolvimento do FMA. Para a fertilização de micronutrientes usou-se 0,064 g de cloreto de cobre, 0,16 g de cloreto de zinco e 4,57 g de ácido bórico, todos os nutrientes foram dissolvidos em 200 ml de água destilada, formando uma solução nutritiva e sua aplicação foi realizada com o auxílio de uma pipeta na dose de 5 ml por vaso.

Os esporos de *Acaulospora morrowiae* (UFLA 226) foram obtidos na coleção do Setor de Microbiologia do Solo da UFLA, o teor de esporos em uma amostra foi determinado com o auxílio de um microscópio estereoscópico (Schenck & Pérez, 1990) após sua extração pelo método do peneiramento úmido (Gerdemann & Nicolson, 1963). Em sequência, a dose de inóculo por tratamento foi calculada a fim de aplicar-se 180 esporos por vaso.

No dia 23 de fevereiro foram plantadas dez sementes por vaso de *Brachiaria brizantha* da cultivar Piatã, anteriormente desinfestadas superficialmente com hipoclorito de sódio (1,25% por 2 min) e peróxido de hidrogênio (33% por 1 min). Cerca de oito dias após a germinação foram desbastadas, mantendo-se apenas duas plantas por vaso. Realizou-se o teste de capacidade de

campo do solo de forma a obter o volume de água necessário para manter o vaso a 60 % da capacidade de campo, inicialmente as amostras foram secas em estufa a 105°C, em seguida utilizou-se copos plásticos de 250 ml com o fundo perfurado, estes foram preenchidos com 100 g de solo, as amostras foram saturadas com água e pesada, a partir da diferença entre o peso do solo saturado e do solo seco foi calculada a capacidade de campo. Os vasos foram irrigados periodicamente através de um sistema de irrigação por gotejamento instalado na casa de vegetação.

Decorridos 60 dias após a emergência das sementes foram medidos os parâmetros de crescimento da planta. Avaliou-se sua altura total e a altura de inserção da última folha (AIUF) com auxílio de uma trena, já o diâmetro do caule foi observado através de um paquímetro. Com auxílio de uma proveta de álcool etílico 70%, mediu-se o volume da raiz, a diferença entre o volume inicial e aquele obtido após a imersão das raízes caracterizou seu volume. A massa seca das raízes e da parte aérea foi determinada com o auxílio de uma balança analítica após passarem pela estufa a 105°C por 24h. O solo rizosférico retirado dos vasos foi devidamente peneirado e armazenado em câmara fria.

Posteriormente foram realizadas as análises bioquímicas do solo. A análise da atividade da enzima  $\beta$ -glucosidade foi feita de acordo com a metodologia proposta por (Eivazi & Tabatabai, 1988). Foi pesado 1,0 g de solo, e acrescentado 4 ml de MUB (pH 6,0), 1,0 ml de solução de  $\rho$ -nitrofenil- $\beta$ -D-glucopiranosídeo (PNG). Os frascos foram agitados por alguns segundos, vedados, e em seguida incubados a 37° C por 1 hora. Após o período de incubação, foi removida a vedação, adicionado 1,0 ml de  $\text{CaCl}_2$  e 4,0 ml de tampão (THAM, pH 12), e então foram agitados. Após a agitação foi feita a filtração em filtro de papel Whatman 42, e a atividade enzimática foi determinada em espectrofotômetro a 410 nm.

O CBM foi determinado pelo método de fumigação – extração (Vance et al.1987), que tem como princípio a lise das células microbianas pelo clorofórmio e extração pelo sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ , esta porém foi adaptada de forma que a fumigação foi realizada por meio da radiação emitida por um aparelho microondas, a potência e o tempo são determinadas de acordo com a metodologia de Islam et al. (1998). Após a fumigação e a aplicação de  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , as amostras foram agitadas em agitador horizontal a 220 rpm e deixadas em repouso por uma hora, em sequência filtrou-se a solução com papel Whatman 42. Adicionou-se à 8 ml do extrato filtrado 2 ml de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , 10 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e 5 ml de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , essa mistura foi aquecida em chapa

por 5 minutos após o aparecimento das primeiras bolhas. Já resfriada, adicionou-se 10 ml de água destilada, e a titulação foi realizada com sulfato ferroso, sendo a difenilamina usada como indicador. O CBM foi obtido pela diferença entre os valores das amostras irradiadas e não irradiadas.

Já a RBS foi avaliada pela quantificação do CO<sub>2</sub> liberado durante a incubação do solo em sistema fechado por 72 h, onde o CO<sub>2</sub> foi capturado em solução de NaOH 0,05 mol L<sup>-1</sup> e posteriormente titulado com HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> (Isermeyer, 1952). A partir desses dados foi obtido o quociente metabólico do solo ( $q_{CO_2}$ ) pela razão entre a RBS por unidade de CBM e tempo (Anderson & Domsch, 1993)

Também foi quantificada a atividade da FDA, (Alef, 1995). Para isso, adicionou-se em 2,5 g de solo de cada amostra, 40 ml de solução tampão com fluoresceína, sendo, posteriormente incubados em rotação, numa temperatura de 35°C por 24h . Após esse processo, adicionou-se 2 ml de acetona para paralisar a reação, a suspensão foi filtrada em filtro Whatman 42 e, em seguida, realizada a leitura da absorbância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 490nm.

Para determinar a colonização micorrízica (CM) as raízes foram clareadas em KOH a 2,5% por 20 min em banho maria, foram devidamente lavadas e coradas de acordo com a metodologia adaptada por Grace et al. (1991). A quantificação foi realizada pelo método da interseção, onde observou-se a presença de estruturas fúngicas na região do córtex radicular, com auxílio de um microscópio estereoscópico (Giovannetti & Mosse, 1980).

Em seguida, os resultados foram testados quanto a sua normalidade e homocedasticidade, foram então submetidos à análise de variância (ANOVA), e ao teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro, por meio do software SISVAR.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os valores obtidos em altura total da planta, diâmetro do caule, massa seca da parte aérea e das raízes, volume radicular e colonização micorrízica não apresentaram diferenças estatisticamente significativas (Tabela 1). A massa seca das raízes e da parte aérea apresentaram um valor médio de 2,61 e 5,95 g, respectivamente, para o diâmetro do caule esse valor foi de 2,98 cm, a média do volume radicular foi de 25,5 m, e a colonização micorrízica observada apresentou um valor médio de 18%.

A média da altura total das braquiárias foi de 89,64 cm, enquadrando-se dentro dos valores estimados para essa planta (Valle et al., 2007), comprovando o potencial da *Brachiaria brizantha* cv. piatã na revegetação de áreas afetadas por rejeito de minério de ferro, uma vez não ocorreu grande mudança em seu crescimento, apesar das condições não serem ideais.

**Tabela 1.** Significância estatística da Análise de Variância (ANOVA).

Variável	FMA	DOSE	FMA x DOSE	CV,%
Altura Total da Planta	NS	NS	NS	10,74
Altura de Inserção da Última Folha	*	**	NS	21,26
Diâmetro do Caule	NS	NS	NS	10,09
Massa Seca da Parte Aérea	NS	NS	NS	24,31
Massa Seca das Raízes	NS	NS	NS	22,87
Volume Radicular	NS	NS	NS	2,07
$\beta$ -glucosidase	NS	**	NS	25,29
FDA	NS	NS	*	7,67
CBM	*	**	**	18,99
RBS	**	NS	NS	19,62
$q\text{CO}_2$	*	**	**	28,88
CM	NS	NS	NS	41,16

\*\*Estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,01).

\* Estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,05).

NS Estatisticamente não significativo

O parâmetro AIUF não apresentou interação entre os fatores, entretanto, observou-se que a resposta foi maior quando o *Acaulospora morrowiae* não foi inoculado (Tabela 2). Para o fator dose, houve uma maior AIUF com o aumento da dose de biocarvão, sendo que o maior valor foi obtido na dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup> (Gráfico 1). Tendo em vista que não houve variação significativa na altura total da planta, a AIUF relaciona-se diretamente à proporção folha-colmo.

A relação folha-colmo é uma variável de grande importância para o manejo das plantas forrageiras. Uma baixa AIUF, neste caso, acarreta em uma alta relação folha-colmo que representa forragens de maior área foliar e fotossintética, demonstrando um maior potencial de desenvolvimento vegetal. Nesta situação os meristemas apicais estão mais próximos ao solo e menos vulneráveis a intempéries, o que confere à gramínea melhor adaptação a condições ambientais adversas, além de maior tolerância ao corte e ao pastejo. (Pinto et al., 1994). Considerando esses pontos, a inoculação do FMA, assim como a dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup>, mostram-se

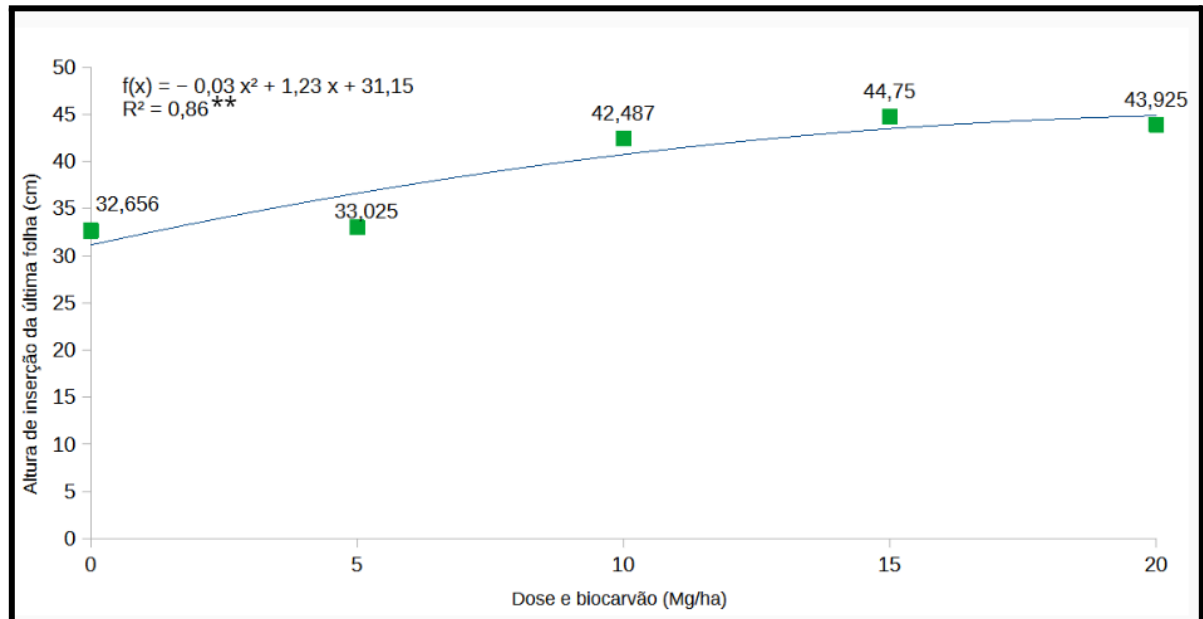
mais interessantes para o crescimento da planta.

**Tabela 2.** Média da altura de inserção da última folha (cm) a partir da presença ou ausência de FMA no solo.

FMA	Altura de inserção da última folha (cm)	Desvio padrão
Com	36,61 b	9,70
Sem	42,13 a	9,09

\*Letras distintas nas colunas são estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,05).

**Gráfico 1.** Efeito de doses crescentes na altura de inserção da última folha (cm) das plantas.

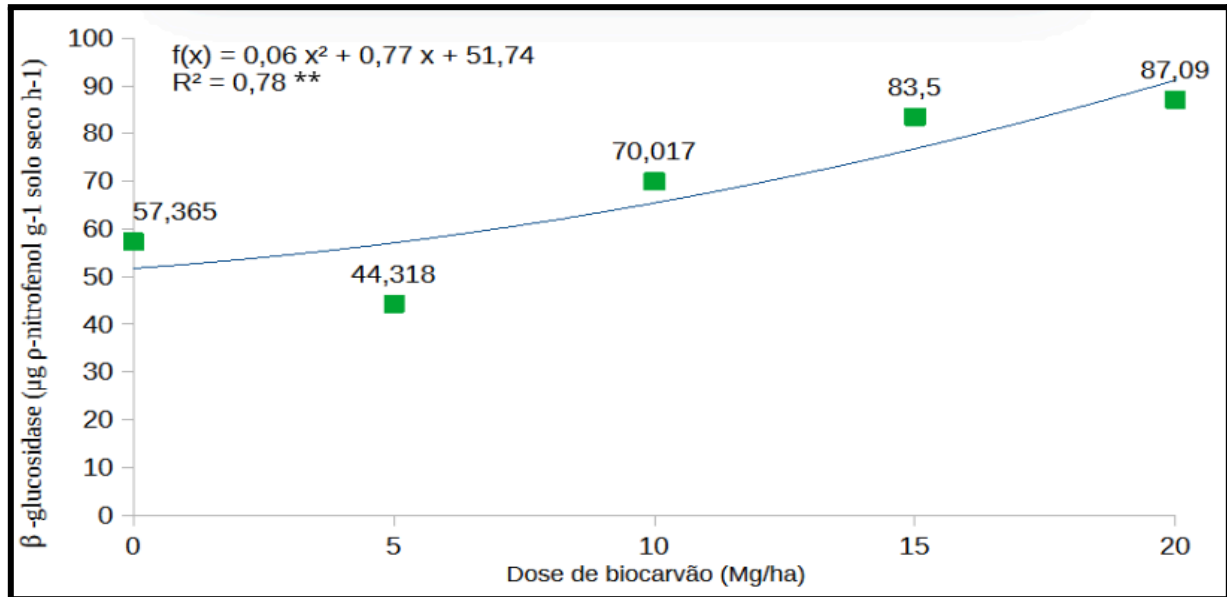


\*\* Estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,01).

A atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase está relacionada à mineralização do carbono a partir da degradação da matéria orgânica exógena (Kader et al., 2017), associando-se à disponibilidade de substrato de carbono facilmente mineralizado sendo um condutor para as alterações da atividade enzimática (Luo; Gu, 2016). Neste trabalho, a atividade desta enzima não foi afetada pela inoculação do FMA, por outro lado foi influenciada positivamente com o aumento da dose de biocarvão (Gráfico 2), ou seja, a atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase nas doses de 15 e 20 Mg ha<sup>-1</sup> foi significativamente superior às doses de 0 e 5 Mg ha<sup>-1</sup>, isso se deve a natureza do biocarvão, que é rico em carbono (Madari et al., 2009), desta maneira, maiores doses tendem a

estimular a atividade dos microrganismos produtores desta enzima.

**Gráfico 2.** Efeito de doses crescentes na atividade enzimática da  $\beta$ -glucosidase ( $\mu\text{g}$   $p$ -nitrofenol  $\text{g}$  solo seco  $\text{h}^{-1}$ ).



\*\* Estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor- $p < 0,01$ ).

Souza et al. (2024) verificou que a implantação da braquiária e a manutenção das aplicações de biocarvão e microrganismos proporcionou aumento na atividade de  $\beta$ -glucosidase para todos os sistemas de produção, demonstrando o potencial dessa enzima como indicador de mudanças no solo a curto prazo. Assim como Demisie et al. (2014) que analisou o efeito diferentes tipos de biocarvão na atividade enzimática da  $\beta$ -glucosidase, demonstrando o estímulo desse substrato sobre as atividades microbianas no solo.

Quanto ao FDA, houve interação entre os fatores e notou-se uma relação divergente entre as doses de 0 e de 5  $\text{Mg ha}^{-1}$  de forma que na primeira houve uma maior atividade enzimática na inoculação do FMA, já na segunda o valor foi maior para a não inoculação do fungo (Tabela 3).

As enzimas que catalisam a hidrólise do FDA representam o potencial heterotrófico da biota do solo, pois incluem enzimas que atuam em processos de biodegradação de substâncias orgânicas como proteases, lipases e esterases (Dick et al., 1996). Tendo isso em mente, a resposta observada demonstra o potencial da inoculação de *Acaulospora morrowiae* em mitigar os efeitos negativos gerados pelo rejeito em situação natural, por outro lado, com a dose de 5  $\text{Mg}$

ha<sup>-1</sup> a inoculação reduziu essa atividade comparando-se a não inoculação, o que sugere que a associação entre uma baixa dose de biocarvão (5 Mg ha<sup>-1</sup>) e o FMA não são indicadas para a recuperação dessas áreas.

**Tabela 3 .** Média do teor FDA ( $\mu\text{g}$  fluoresceína g<sup>-1</sup> solo seco h<sup>-1</sup>) no solo para diferentes doses de biocarvão de casca de café x presença ou ausência de FMA.

FMA	COM	SEM
DOSE		
0	31,3 a A	27,5 a B
5	27,9 a B	31,9 a A
10	31,2 a A	30,2 a A
15	28,0 a A	28,8 a A
20	28,9 a A	27,8 a A

\*Letras distintas nas colunas são estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,05). As letras maiúsculas para linhas e as minúsculas para colunas.

Para a quantificação de CBM do solo houve interação entre os fatores dose e biocarvão (Tabela 4). Nota-se que quando inoculou-se o FMA os tratamentos de 0 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarvão geraram um aumento na comunidade microbiana, na ausência do fungo a dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup> representou um maior CBM. Para as doses de 0 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> foi observado que na inoculação de *Acaulospora morrowiae* a quantidade de CBM foi maior, já para 5 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarvão a não inoculação acarretou em um maior CBM, sendo que este último tratamento gerou uma resposta superior aos demais.

O parâmetro CBM associa-se à presença de microorganismos que possuem um papel essencial na decomposição e ciclagem de nutrientes, sendo assim, é considerado um excelente bioindicador da qualidade do solo (Doran & Linn 1994). Nesta situação, o tratamento com a dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup> sem a inoculação do FMA mostrou-se promissor no crescimento da comunidade microbiana.

Em seu trabalho, Santos et al. (2013) concluiu que o biocarvão foi capaz de estimular o crescimento microbiano até a dose de 8 Mg ha<sup>-1</sup>, e que doses maiores a essa diminuem esse incremento. Uma resposta semelhante foi observada para a não inoculação de *Acaulospora morrowiae*, por outro lado, quando o fungo foi inoculado a dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup>, gerou um



incremento da comunidade microbiana em relação às outras doses.

**Tabela 4 .** Média do teor CBM ( $\mu\text{g C g}^{-1}$  solo) no solo para diferentes doses de biocarvão de casca de café x presença ou ausência de FMA.

<b>FMA</b>	<b>COM</b>	<b>SEM</b>
<b>DOSE</b>		
<b>0</b>	259,91 a A	103,89 c B
<b>5</b>	150,08 bc B	508,82 a A
<b>10</b>	76,96 c A	110,05 c A
<b>15</b>	315,66 a A	200,23 b B
<b>20</b>	163,33 b A	214,11 b A

\*Letras distintas nas colunas são estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,05). As letras maiúsculas para linhas e as minúsculas para colunas.

Quanto à RBS, não houve interação entre os fatores, a análise estatística demonstrou que a inoculação do fungo micorrízico acarretou no seu aumento, mas não houve interferência da dosagem de biocarvão (Tabela 5).

**Tabela 5.** Média da RBS em ( $\text{mg.C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) a partir da presença ou ausência de FMA no solo.

<b>FMA</b>	<b>RBS</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>Com</b>	3,56 a	1,03
<b>Sem</b>	2,92 b	0,64

\*Letras distintas nas colunas são estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,05).

A RBS é definida pela soma de todas as funções metabólicas nas quais o  $\text{CO}_2$  é produzido, além disso, possui estreita relação com as condições abióticas do solo (Da Silva, 2007). A partir disso, observa-se a inoculação de *Acaulospora morrowiae*, gerou uma maior atividade metabólica nesse solo, esta pode ser uma resposta positiva ou negativa, para determinar essa questão é necessária a comparação deste parâmetro com a dimensão da comunidade microbiana, obtendo-se o  $q\text{CO}_2$ .

Em relação ao parâmetro  $q\text{CO}_2$ , houve interação entre os fatores, notou-se que com a inoculação dos FMA a dose 10  $\text{Mg ha}^{-1}$  apresentou uma resposta superior às demais, assim como

na não inoculação dos fungos, em que também foi maior se igualando ao tratamento controle. Na ausência de biocarvão, a não inoculação de FMA provocou um aumento no parâmetro em relação à inoculação do fungo. Já nas doses 10 Mg.ha<sup>-1</sup> e 5 Mg ha<sup>-1</sup> o parâmetro foi maior na presença dos *Aciculospora morrowiae* (Tabela 6).

**Tabela 6.** Média do parâmetro  $q\text{CO}_2$  para diferentes doses de biocarvão de casca de café x presença ou ausência de FMA.

FMA	COM	SEM
DOSE		
0	13,7 b B	29,9 a A
5	22,3 b A	5,4 b B
10	48,9 a A	28,1 a B
15	11,6 b A	11,9 b A
20	22,7 b A	17,7 ab A

\*Letras distintas nas colunas são estatisticamente significativas pelo teste de Tukey (valor-p < 0,05). As letras maiúsculas para linhas e as minúsculas para colunas.

Valores mais baixos para  $q\text{CO}_2$  são atribuídos a áreas em maior equilíbrio (Anderson E Domsch, 1990), de forma que quando os microorganismos estão em ambientes mais estressantes o  $q\text{CO}_2$  tende a ser maior. Dessa maneira, observou-se neste trabalho que na inoculação do FMA a dose de 10 Mg ha<sup>-1</sup> gerou um ambiente mais estressante em relação aos demais tratamentos, na não inoculação do fungo essa dose também foi alta, se igualando ao tratamento controle.

O tratamento com 5 Mg ha<sup>-1</sup> sem a inoculação do FMA apresentou um grande potencial na mitigação do estresse microbiano em solos afetados por rejeito de mineração de ferro, em seguida, destaca-se também a dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup>, com e sem inoculação micorrízica.

Estudos indicam que o uso do biocarvão potencializa a ação dos FMA (Luo et al., 2017; Mickan et al., 2016), ao modificar as propriedades físicas e químicas do solo, o que facilitaria a germinação dos esporos e o crescimento e ramificação das hifas (Hammer et al., 2015). Além disso, outros trabalhos apontam que altas doses de biocarvão podem prejudicar a atividade desses microorganismos (Akhter et al., 2015; Hall; BelL, 2015), porém, os dados deste trabalho apontam para uma discussão diferente: os parâmetros FDA, CBM e  $q\text{CO}_2$  tiveram respostas negativas no tratamento com baixa dose de biocarvão (5 Mg ha<sup>-1</sup>) associados a inoculação do FMA, demonstrando que a inoculação de FMA é mais recomendada quando associada a doses altas de

biocarvão (15 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>).

Os resultados deste trabalho reforçam a complexidade e a importância de intervenções estratégicas para a melhoria da qualidade do solo afetado por rejeitos de mineração. Esses achados indicam que a integração entre biocarvão e FMA é uma abordagem promissora para o manejo de solos impactados por rejeito de minério de ferro, com potencial de promover a resiliência do solo em curto prazo, ainda que o impacto no crescimento vegetal tenha sido limitado.

A inoculação do *Acaulospora morrowiae*, embora não tenha impactado de forma significativa todos os parâmetros estudados, desempenhou um papel importante no aumento da qualidade do solo na ausência de biocarvão, como notou-se nos parâmetros FDA, CBM e  $qCO_2$ .

Estudos futuros devem aprofundar a compreensão dos mecanismos subjacentes a essas interações e avaliar os efeitos em longo prazo sobre a produtividade vegetal e a sustentabilidade do ecossistema.

## 5. CONCLUSÃO

A associação entre biocarvão e FMA é capaz de auxiliar na recuperação de áreas afetadas por rejeito de mineração de ferro a curto prazo, e para isso a dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup> foi mais eficiente, considerando os resultados obtidos na  $\beta$ -Glucosidase, CBM e  $qCO_2$ . Por outro lado, o tratamento sem a inoculação de *Acaulospora morrowiae* com a dose de 5 Mg ha<sup>-1</sup>, mostrou-se o mais promissor no aumento da atividade, da biomassa microbiana, na mitigação de estresse, no aumento da área foliar da planta e conseqüentemente, na melhora da qualidade do solo, observado nos parâmetros FDA, CBM,  $qCO_2$  e AIUF.

## 7. REFERÊNCIAS

- ABIEC (Brasil). Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. BEEF REPORT 2023: perfil da pecuária no Brasil. PERFIL DA PECUÁRIA NO BRASIL. 2023. Disponível em: <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2023/>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- AJEMA, L. Effects of Biochar Application On Beneficial Soil Organism Review. *International Journal Of Research Studies In Science, Engineering And Technology*, v. 5, n. 5, p. 9-18. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15186.66247>, 2018.
- AKHTER, Adnan et al. Compost and biochar alter mycorrhization, tomato root exudation, and development of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Frontiers in Plant Science*, v. 6, p. 529, 2015.
- ALBURQUERQUE, J. A. et al. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 177, p. 16-25, 2014.
- ALEF, K. Estimation of the hydrolysis of fluorescein diacetate. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Ed.). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. New York: Academic, 1995. p. 232-233.
- ALLEN, E. B.; ALLEN, M. F.; HELM, D. J.; TRAPPE, J. M.; MOLINA, R.; RINCON, E. Patterns and regulation of mycorrhizal plant and fungal diversity. *Plant and Soil*. Hague, v. 170, p. 47-62, 1995.
- ALMEIDA, R. O. P. O. Revegetação de áreas mineradas: estudos dos procedimentos aplicados em mineração de areia. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002. 160 p.
- ALVAREZ, V.V.H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.V.H. (Eds.) *Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais*. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ALVAREZ-CAMPOS, O.; LANG, T. A.; BHADHA, J. H.; McCRAY, J. M.; GLAZ, B.; DAROUB, S. H. Biochar and mill ash improve yields of sugarcane on a sand soil in Florida. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 253, p. 122-130, 2018.
- ALVES, J. D. N. et al. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade, 2019. p. 74.
- ANDERSON, J. P.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 10, p. 215-221, 1978.
- ANDERSON, Traute-Heidi; DOMSCH, K. H. Application of eco-physiological quotients (qCO<sub>2</sub> and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 22, n. 2, p. 251-255, 1990.
- ANDERSON, Traute-Heidi; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (q CO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. 1993.
- BACK, M. M.; ALTMANN, T.; DE SOUZA, P. V. D. Influência de fungos micorrízicos arbusculares no desenvolvimento vegetativo de porta-enxertos de citros. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, p. 407-412, 2016.
- BARTO, E. Kathryn et al. Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 42, n. 12, p. 2316-2324, 2010.

- BENDING, G.D.; TURNER, M.K.; RAYNS, F.; MARX, M.C.; WOOD, M. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biol. Biochem.*, v. 36, p. 1785-1792, 2004.
- BEZERRA, Maria Eloneide de Jesus et al. Biomassa, atividade microbiana e FMA em rotação cultural milho/feijão-de-corda utilizando-se águas salinas. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, p. 562-570, 2010.
- BIRD, M. I.; MOYO, C.; VEENENDALL, E. M.; LLOYD, J.; FROST, P. Stability of elemental carbon in savanna soil. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 13, n. 4, p. 923-932, 1999.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. *The Nature and Properties of Soils*. 14th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, p. 975, 2008.
- CANUTO, Crislany et al. Biochar e esterco bovino aumentam a eficiência no uso de água da alface. *Diversitas Journal*, v. 4, n. 3, p. 1082-1091, 2019.
- CARMO, F. F.; Kamino, L. H. Y.; Junior, R. T.; de Campos, I. C.; do Carmo, F. F.; Silvino, G.; ... & Pinto, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environmental tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2017.
- CATASUS GUERRA, L. Las gramíneas (Poaceae) de Cuba, 1. *Fontqueria*, v. 46, p. 259, 1997.
- CORTAT, Lucas Henrique et al. Fungos micorrízicos arbusculares (FMA): alternativa agroecológica para recuperação biológica dos solos degradados.
- COSTA, K. A. P. et al. Efeito da estacionalidade na produção de matéria seca e composição bromatológica da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. 2005.
- COSTA, N. L. et al. Considerações sobre o manejo de pastagens na Amazônia Ocidental. *Revista do Conselho Federal de Medicina Veterinária*, v. 40, p. 37-56, 2007.
- COSTA, T. C. et al. Estabelecimento de espécies arbóreo-arbustivas no rejeito de minério de ferro da barragem de Fundão em Mariana-MG, tratado com calcário, fertilizantes e microrganismos. 2018.
- CRUZ, E.; SOBREIRA, A. C.; BARROS, D. L. de; GOMIDE, P. H. O. Doses de fósforo e fungos micorrízicos arbusculares no crescimento e produção do feijão-caupi em Roraima. *Boletim do Museu Integrado de Roraima (Online)*, v. 11, n. 01, p. 21-28, 2017.
- CRUZ, Fernanda Vieira da Silva et al. Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest?. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 189, p. 110021, 2020.
- DA SILVA, Edmilson Evangelista; DE AZEVEDO, Pedro Henrique Sabadin; DE-POLLI, Helvécio. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO<sub>2</sub>). 2007.
- DE ALMEIDA, Humberto Araújo et al. Potencial de uso do rejeito de minério de ferro oriundo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) para o cultivo de espécies agrícolas. 2020.
- DIATTA, A. A.; FIKE, J. H.; BATTAGLIA, M. L.; GALBRAITH, J. M.; BAIG, M. B. Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 13, n. 14, Article 595, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05586-2>.
- DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. Soil enzyme activities and biodiversity measurements. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 247-272. (Special publication number, 49).
- DODOR, E. D. et al. Co-application of biochar and cattle manure counteract positive priming of carbon mineralization in a sandy soil. *Environmental Systems Research*, Basel, v. 7, n. 5, p. 1-9, 2018.
- DONAGEMMA, Guilherme Kangussú et al. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2ª ed. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2011. E-book.

- DORAN, J. W. & D. M. LINN. Microbial ecology of conservation management systems. In: J. L. Hatfield & B. A. Stewart (Ed.). *Soil Biology: Effects on soil quality*. Advanced Soil Science, p. 3-21, 1994
- DORAN, J. W. & PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F. & STEWART, B. A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: SSSA, 1994. p. 1-20. (Special publication number, 35).
- DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. *Anais*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988.
- ESTEVEZ, Gisele de Fátima et al. Vermicompost improves maize, millet and sorghum growth in iron mine tailings. *Journal of Environmental Management*, v. 264, p. 110468, 2020.
- FAGUNDES, J. L. et al. Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 35, n. 1, p. 21-29, 2006.
- FERNANDES, Geraldo Wilson et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Natureza & Conservação*, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.
- GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, Cambridge, v. 6, p. 235-246, 1963.
- GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques to measure vesicular-arbuscular mycorrhizal infection on roots. *New Phytologist*, v. 84, n. 3, p. 489-500, 1980.
- GIOVANNINI, L.; PALLA, M.; AGNOLUCCI, M.; AVIO, L.; SBRANA, C.; TURRINI, A.; GIONANNETTI, M. Arbuscular mycorrhizal fungi and associated microbiota as plant biostimulants: research strategies for the selection of the best performing inocula. *Agronomy*, v. 10, n. 1, p. 106, 2020.
- GLASER, B.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; RUIVO, M. L. Soil organic matter stability in Amazonian Dark Earths. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WODOS, W. I. (Eds.). *Amazonian dark earths: origin, properties, management*. Dordrecht: Springer, 2003. p. 141-158.
- GONZÁLEZ-CHÁVEZ, C. Copper sorption and accumulation by the extraradical mycelium of different *Glomus* spp. (arbuscular mycorrhizal fungi) isolated from the same polluted soil. *Plant and Soil*, v. 240, n. 2, p. 287-297, 2002.
- GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. C. et al. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, v. 130, n. 3, p. 317-323, 2004.
- GRACE, Carol; STRIBLEY, David P. A safer procedure for routine staining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research*, v. 95, n. 10, p. 1160-1162, 1991.
- HALL, David et al. Long term effects of claying on non-wetting and plant nutrition. *Agribusiness crop updates*, Perth'. (Department of Agriculture and Food/Grains Research and Development Corporation: Perth, Western Australia), 2015.
- HAMMER, Edith C. et al. Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Applied soil ecology*, v. 96, p. 114-121, 2015
- HAMMER, Edith C. et al. Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Applied soil ecology*, v. 96, p. 114-121, 2015.
- IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Ministério do Meio Ambiente. Diretoria de Proteção Ambiental e DIPRO e Coordenação Geral de

- Emergências Ambientais - CGEMA. *Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Novembro de 2015*, 2015. Acesso em: 21/10/2024. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf)
- ISERMEYER, H. Eine einfache methode zur bestimmung der bodenatmung und der karbonate im boden. *Z. Pflanzenernäh Bodenk*, v. 56, p. 26-38, 1952.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems and Environment*, v. 79, n. 1, p. 9-16, 2000.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biology and Fertility of Soils*, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s003740050>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- IUSS WORKING GROUP WRB. *World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication*. Rome: FAO, 2006. p. 145. (World Soil Resources Reports, 103).
- KADER, Mohammad Abdul et al. Mulching type-induced soil moisture and temperature regimes and water use efficiency of soybean under rain-fed condition in central Japan. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 5, n. 4, p. 302-308, 2017.
- KARLDORF, M. et al. Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. *Journal of Plant Physiology*, v. 154, n. [incomplete citation].
- KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009.
- KESKE, Catherine M. H. et al. Biochar application as a soil amendment for improved crop yield: an economic analysis. *Carbon Research*, v. 9, p. 1-20, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44243-019-00010-z>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; HUDSONEDWARDS, K. A. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 229-245, 2014.
- LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: SSSA, 1994. p. 37-51. (Special, 35).
- LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, v. 11, p. 403-427, 2006.
- LIMA, L. M.; OLIVEIRA, A. M. K.; CARLETTI FILHO, P. T.; FERRARI, R. C.; CAIXETA FILHO, J. V. Avaliação da viabilidade técnica e econômica da utilização de biomassas como fonte energética alternativa em fornos industriais. *Revista de Economia e Agronegócio*, n. 1, v. 4, 2015.
- LUO, Zhongkui et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global change biology*, v. 23, n. 10, p. 4430-4439, 2017.
- MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. de M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (Ed.). *As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste*

- conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188.
- MARTINS, Ana Paula Lang; REISSMANN, Carlos Bruno. Material vegetal e as rotinas laboratoriais nos procedimentos químico-analíticos. *Scientia Agraria*, v. 8, n. 1, p. 1–17, 2007.
- MENDES, I. C.; SOUZA, L. V.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Propriedades biológicas em agregados de um LE sob plantio convencional e direto no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 435-443, 2003.
- MENDES, I. C.; VIVALDI, L. Dinâmica da biomassa e atividade microbiana em uma área sob mata de galeria na região do DF. In: RIBEIRO, J. F.; FONSECA, C. E. L. da; SOUSASILVA, J. C. (Ed.). *Cerrado: caracterização e recuperação de Matas de Galeria*. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 2001. p. 664-687.
- MENDES, I. de C. et al. Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade? 2009.
- MICKAN, Bede S. et al. Interactions between biochar and mycorrhizal fungi in a water-stressed agricultural soil. *Mycorrhiza*, v. 26, n. 6, p. 565-574, 2016.
- MIRANSARI, M. Soil microbes and the availability of soil nutrients. *Acta Physiologiae Plantarum*, Paris, v. 35, p. 3075-3084, 2013.
- MONOKROUSOS, N.; PAPTAEODOROU, E. M.; DIAMANTOPOULOS, J. D.; STAMOU, G. P. Soil quality variables in organically and conventionally cultivated field sites. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 38, p. 1282-1289, 2006.
- MOREIRA, F. W.; OLIVEIRA, C. M. de; MAIA, J. L. Z.; OLIVEIRA, L. A. de. Fungos micorrízicos arbusculares nas plantas e características químicas dos solos de clareiras da Província Petrolífera de Urucu, Am. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 10, n. 5, p. 56–68, 2019. <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2019.005.0006>
- NOBRE, C. P. et al. Agregação, glomalina e carbono orgânico na chapada do Araripe, Ceará, Brasil. *Revista Caatinga*, v. 28, n. 1, p. 138-147, 2015.
- NUNES, J. L. S. et al. Incremento no desenvolvimento do porta-enxerto de pessegueiro "Aldrighi" por fungos micorrízicos arbusculares autóctones. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, p. 1787-1793, 2008a.
- NUNES, J. L. S. et al. Inoculação de fungos micorrízicos arbusculares em porta-enxerto de pessegueiro cv Okinawa. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 30, p. 1100-1106, 2008b.
- OK, Y.S.; UCHIMIYA, S.M.; CHANG, S.X.; BOLAN, N. Biochar: production, characterization and applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- OLIVEIRA, J. R. G.; SOUZA, R. G.; SILVA, F. S. B.; MENDES, A. M. S.; MELO, A. M. O papel da comunidade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) autóctones no desenvolvimento de espécies vegetais nativas em área de dunas de restinga revegetadas no litoral do Estado da Paraíba. Disponível em: <[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- OLMO, Manuel et al. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. *Plant and Soil*, v. 399, p. 333-343, 2016.
- PAULA, L. C. de et al. Manejo e adaptação de pastagens do gênero *Urochloa* em solos do cerrado. *Colloquium Agrariae*, v. 13, n. Especial 2, p. 2763-288, 1 jun. 2017.
- PINTO, J. C.; GOMIDE, J. A.; MAESTRI, M. Produção de MS e relação folha/caule de gramíneas forrageiras tropicais, cultivadas em vasos, com duas doses de nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 23, n. 3, p. 313-326, 1994.
- PORCEL, R.; AROCA, R.; RUIZ-LOZANO, J. M. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 32, p. 181-200, 2012.



- PURKAYASTHA, M.D.; DUTTA, G.; BARTHAKUR, A.; MAHANTA, C.L. Tackling correlated responses during process optimisation of rapeseed meal protein extraction. *Food Chemistry*, v. 170, p. 62-73, 2015.
- REDECKER, D.; SCHÜBLER, A.; STOCKINGER, H.; STÜRMER, S.; MORTON, J.; WALKER, C. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, v. 23, n. 7, p. 515-531, 1 out. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>. Acesso em: 13 dez. 2024.
- RICE, C. W.; MOORMAN, T. B.; BEARE, M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 203-216. (Special Publication, 49).
- ROSA, N. M. G. et al. Implicações do rompimento da barragem de Fundão nos usos da água e da terra na bacia do Alto Rio Doce-MG. 2020.
- SANCHEZ-REINOSO, A. D.; ÁVILA-PEDRAZA, E. A.; RESTREPO, H. Use of biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, v. 25, n. 2, p. 327-338, 2020. Doi: 10.15446/abc.v25n2.79466.
- SANTOS, JANNE LOUIZE SOUSA; MADARI, BEATA EMOKE; TSAI, S. M. Efeito da biocarvão após seis anos de cultivo de soja (*Glycine max* L.) na biomassa microbiana do solo, em cerrado. Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas, v. 10, p. 348-350, 2013.
- SANTOS, Reginaldo Ferreira; CARLESSO, Reimar. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.
- SCHLOTTER, M.; DILLY, O.; MÜNCH, J.C. Indicators for evaluating soil quality. In: M. (org.). *Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil*. Lavras: UFLA, 2010.
- SCHREINER, R. P. Effects of native and nonnative arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient uptake of 'Pinot noir' (*Vitis vinifera* L.) in two soils with contrasting levels of phosphorus. *Applied Soil Ecology*, v. 36, p. 205-215, 2007.
- SILVA, A. B.; CORRÊA LANDGRAF, P. R.; OLIVA MACHADO, G. W. Germinação de sementes de braquiária sob diferentes concentrações de giberelina. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 34, n. 2, 2013.
- SILVA, D.L.; FERREIRA, M.C.; SCOTTI, M.R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). *Arq. Mus. Hist. Nat. Jardim Bot.*, v. 157, p. 136-158, 2015.
- SILVA, S. D.; SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S. Fungos micorrízicos no crescimento e na extração de metais pesados pela braquiária em solo contaminado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 21, n. 12, p. 1749-1757, 2006.
- SILVA, S. Fungos micorrízicos arbusculares no crescimento, extração de metais pesados e características anatômicas da *Brachiaria decumbens* Stapf. em solo contaminado. 2006. 82 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- SILVEIRA, A. P. D. da; FREITAS, S. dos S. Microbiota do solo e qualidade ambiental. Instituto Agrônomo, 2007.
- SILVEIRA, S. V.; SOUZA, P. V. D.; KOLLER, O. C. Influência de fungos micorrízicos arbusculares sobre o desenvolvimento vegetativo de abacateiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, p. 303-309, 2002.
- SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J.; STOTZKY, D.G., eds. *Soil biochemistry*, v. 6, p. 357-396, 1990.
- SMITH, S. E.; EVELINA, F.; SUZANNE, P.; SMITH, A. F. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant and Soil*, v. 326, n. 1, p. 3-20, 2010.

- SMITH, S. E.; READ, D. J. Mycorrhizal Symbiosis. 2. ed. London: Academic Press, 1997.
- SMITH, S. E.; READ, D. Mycorrhizal Symbiosis. 3. ed. Academic Press, 2008. p. 80.
- SOARES, C. R. F. S.; CARNEIRO, M. A. C. Micorrizas arbusculares na recuperação de áreas degradadas. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M., eds. *Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil*. Lavras: Ed da UFLA, 2010. p. 15-73.
- SOUZA, Oleriana Santos de et al. BRAQUIÁRIA, BIOCÁRVÃO E MICRORGANISMOS-INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO. 2024.
- SOUZA, M. C. C. de; PESSOA, M. L. Biocarvão. 2024.
- TABATABAI, M. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. pt. 2, p. 778-835. (Soil Science Society of America. Book Series 5).
- TAKAMORI, Luciana Midori et al. Transformação genética de *Urochloa brizantha* para tolerância ao déficit hídrico e validação de genes normalizadores para estresses abióticos. 2018.
- TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.) *Tópicos em Ciência do Solo*, v. 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 195-276.
- TURNAU, K. et al. Role of arbuscular mycorrhiza and associated microorganisms in phytoremediation of heavy metal polluted sites. In: PRASAD, M. N. V.; SAJWAN, K. S.; NAIDU, R. (eds.). *Trace Elements in the Environment: Biogeochemistry, Biotechnology, and Bioremediation*. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- VALADARES, R. B. da S.; MESCOLOTTI, D. L. C.; CARDOSO, E. J. B. N. Micorrizas. In: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. *Microbiologia do Solo*. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. p. 181-194.
- VALLE, C. B.; EUCLIDES, V. P. B.; VALÉRIO, J. R.; MACEDO, M. C. M.; FERNANDES, C. D.; DIAS-FILHO, M. B. Brachiaria brizantha cv. Piatã: uma forrageira para diversificação de pastagens tropicais. *Seed News*, v. 11, n. 2, p. 28-30, 2007.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 19, p. 773-777, 1987.
- VEZZANI, Fabiane Machado; MIELNICZUK, João. Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 743-755, 2009.
- VILELA, L. A. F.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; PAULINO, H. B.; SIQUEIRA, J. A.; SANTOS, V. L. da S.; CARNEIRO, M. A. C. Arbuscular mycorrhizal fungus in microbial activity and aggregation of a Cerrado Oxisol in crop sequence. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 38, n. 1, p. 34-42, 2014.
- WANG, Haizhen et al. Efficient biodegradation of phenanthrene by a novel strain *Massilia* sp. WF1 isolated from a PAH-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, p. 13378-13388, 2016.
- WRIGHT, S. J.; TURNER, B. L.; YAVITT, J. B.; HARMS, K. E.; KASPARI, M.; EDMUND, V. J.; TANNER, E. V. J.; BUJAN, J.; GRIFFIN, E. A.; MAYOR, JR.; PASQUINI, S. C.; SHELDRAKE, M.; GARCIA, M. N. Plant responses to fertilization experiments in lowland, species-rich, tropical forests. *Ecology*, n. 99, p. 1129-1138, 2018. <https://doi.org/10.1002/ecy.2193>.

XIAO, R.; YANG, W.; CONG, X.; DONG, K.; XU, J.; WANG, D.; YANG, X. Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis. *Energy*, v. 201, Article 117537, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117537>.

ZIBILSKE, L. M. Carbon mineralization. In: WEAVER, R. W.; SCOTT, A.; BOTTOMLEY, P. J. (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. pt. 2, p. 836-864. (Special Publication, 5).