

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**TACIANA DA SILVA PARAIZO**

**MELHORIA DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E MICROBIOLÓGICOS DO  
SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO**

**RECIFE**

**2025**

Taciana da Silva Paraizo  
Engenheira Florestal

**Melhoria dos atributos físicos e microbiológicos do solo cultivado com eucalipto**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestra em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Ademir de Oliveira  
Ferreira

Coorientador: Dr. William Ramos da Silva

**Recife**  
**2025**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

P222m Paraizo, Taciana da Silva  
Melhoria dos atributos físicos e microbiológicos do solo cultivado com eucalipto /  
Taciana da Silva Paraizo. – 2025.  
61 f.: il.

Orientador(a): Ademir de Oliveira Ferreira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE,  
2025.  
Inclui referências.

1. Solos e Nutrição de Plantas 2. Degradação ambiental 3. Glomalina  
4. Estabilidade de agregados 4. Sequestro de carbono I. Ferreira, Ademir de  
Oliveira, orient. II. Título

CDD 631.4

TACIANA DA SILVA PARAIZO

**Melhoria dos atributos físicos e microbiológicos do solo cultivado com eucalipto**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestra em ciência do solo.

Aprovada em 27 de junho de 2025

---

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira  
Orientador  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Renisson Neponuceno de Araújo Filho  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Felipe José Cury Fracetto  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

De uma única coisa tenho certeza nesta vida, ninguém vive sozinho. Ninguém constrói nada sozinho. Precisamos uns dos outros, do dia em que nascemos, ao dia que morremos. E como tudo na minha vida, não estive sozinha neste projeto. A todos que estiveram comigo antes, durante e estarão depois da conclusão deste projeto, meu muito obrigada.

E com certeza, no cerne da caminhada, está minha família. Primeiro meus filhos, que são definitivamente a coisa mais importante da minha vida e nossa como sou abençoada, eles são o melhor que a maternidade poderia oferecer, muito obrigada aos meus corações fora de mim.

Depois vem meu suporte eterno, quem me deu a vida, minha mãe que é a luz nos meus dias, minha parceira, meu ombro, meu eterno porto seguro, e meu pai, que se foi, levando um pedaço de mim, que olhou pra mim com aquele sorriso de satisfação que nunca irei esquecer no dia da minha colação da graduação, e sei que de onde estiver, ele estará com o mesmo sorriso, e feliz por mim, meu eterno muito obrigada a vocês dois.

Minha família é enorme kkkkkkk e não poderia pedir por pessoas melhores. Minhas irmãs, meus sobrinhos, cunhados, tias e primos, vivemos todos juntos e estar sempre juntos de vocês, me fez ser quem sou, muito obrigada por me dar tanto orgulho. Meu genro também merece minha eterna gratidão, por cuidar tão bem do meu tesouro mais precioso e me deixar tranquila para seguir meus caminhos.

Nem sei o que falar dos meus amigos, sou realmente muito abençoada, tenho os melhores ao meu lado. Carlos e Aline, amigos que conheci na academia, mas que hoje são quase irmãos, muito obrigada por tanto, sempre. Andrezza, que apesar da distância, sempre me dá o devido conforto que só a confiança proporciona. As minhas amigas da época de escola, que me são próximas até hoje e que também são minha válvula de escape das preocupações da vida. Muito obrigada a todos por serem meu ombro para chorar e a voz que me incentiva.

Os amigos que fiz ao longo destes dois anos, os que entraram junto comigo esse caminho da pós-graduação, Daniel, André, Lohana, Steffany, Laura, os Paulos, e os que conheci no laboratório de Manejo e conservação do solo, Aline, Belchior, Arthur, Júlio, Givanilson, Mateus e as irmãs acadêmicas Rafa e Amanda, meu mais profundo agradecimento por todo suporte, apoio e conselhos.

Aos parceiros de Maceió que acolheram nosso projeto e nos deram todo suporte para coleta das amostras e sempre se mostraram dispostos a ajudar, meu muito obrigada.

Ao meu coorientador, Willian, muito obrigada por toda contribuição e incentivo, seu conhecimento e comprometimento foram cruciais para que esse trabalho fosse concluído.

Ao meu orientador, meu mais profundo agradecimento, obrigada por ter acolhido minhas ideias, obrigada por ser um modelo de como outros orientadores devem agir, obrigada por ter confiado no meu trabalho e ter me apoiado todo esse tempo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## **Melhoria dos atributos físicos e microbiológicos do solo cultivado com eucalipto**

### **RESUMO**

O surgimento de áreas degradadas é um processo complexo que envolve o desgaste dos atributos do solo e resulta em mudanças indesejáveis em suas propriedades físicas, químicas e biológicas. O cultivo do eucalipto surge como uma forma de valorizar e recuperar essas áreas, devido, principalmente, às suas características de rápido desenvolvimento e poucas exigências nutricionais. As hipóteses do estudo são: i) O tempo de cultivo do eucalipto influencia positivamente na maior distribuição dos macroagregados grandes e extragrandes; ii) Os atributos microbiológicos são influenciados positivamente pelo tempo de cultivo do eucalipto; iii) O tempo de cultivo de eucalipto aumenta os estoques de carbono, no solo e no interior dos agregados. Este estudo teve como objetivo avaliar as variações dos atributos físicos, químicos e microbiológicos nos diferentes tempos de cultivo do eucalipto na melhoria do solo. Foram realizadas coletas para análise de atributos físicos, químicos e microbiológicos, em uma empresa de base florestal, na região metropolitana de Maceió-AL. As coletas foram realizadas em áreas com quatro diferentes tempos de cultivo: três, seis, nove e onze anos. Foram coletadas ainda, amostras de solo de área com cultivo de cana-de-açúcar, para ser utilizada como referência. Em cada área foram realizadas coletas nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm de amostras deformadas e indeformadas. Foram analisadas as propriedades químicas e o carbono orgânico e seu estoque no solo. Além disso, determinou-se a classificação de agregados e os estoques de C em seu interior, o carbono da biomassa microbiana, a respiração basal, o quociente metabólico e microbiano, a abundância de glomalina e a atividade das enzimas (betaglicosidase, arilsulfatase e fosfatase alcalina. Com apenas três anos de plantio de eucalipto já houve aumento no estoque de carbono nos solos, além disso, obteve-se uma maior quantidade de macroagregados extragrandes nos seis anos de cultivo na camada mais superficial, indicando uma melhora na estrutura do solo. Já na camada mais profunda, a maior quantidade de macroagregados extragrandes sob 11 anos de cultivo, indica uma maior estabilização do ecossistema. Em três anos de cultivo, houve maior tendência na atividade enzimática. A correlação entre a glomalina total e a massa proporcional de agregados grandes sob 11 anos de cultivo de eucalipto indica uma maior tendência de regeneração dos solos. Os resultados deste estudo demonstram que o cultivo do eucalipto, mesmo em períodos relativamente curtos, contribui significativamente para a recuperação de solos degradados, promovendo o aumento dos estoques de carbono total e sua estabilização dentro dos macroagregados além de favorecer a eficiência metabólica da microbiota e a formação de estruturas físicas mais estáveis. A melhoria simultânea de atributos físicos e microbiológicos ao longo do tempo evidencia o papel do eucalipto como agente restaurador, capaz de desencadear processos regenerativos no solo e fortalecer sua resiliência ecológica.

Palavras-chave: Áreas degradadas. Glomalina. Estabilidade de agregados. Estoque de carbono.

## **Improvement of the physical and microbiological attributes of soil cultivated with eucalyptus**

### **ABSTRACT**

The emergence of degraded areas is a complex process involving the depletion of soil attributes and resulting in undesirable changes in its physical, chemical, and biological properties. Eucalyptus cultivation emerges as a way to enhance and restore these areas, mainly due to its rapid growth characteristics and low nutritional requirements. The study hypotheses are: i) The duration of eucalyptus cultivation positively influences the greater distribution of large and extra-large macroaggregates; ii) Microbiological attributes are positively influenced by the duration of eucalyptus cultivation; iii) The duration of eucalyptus cultivation increases carbon stocks, both in the soil and within aggregates. This study aimed to evaluate the variations in physical, chemical, and microbiological attributes at different eucalyptus cultivation periods for soil improvement. Samples for physical, chemical, and microbiological analyses were collected at a forestry-based company in the metropolitan region of Maceió-AL. Collections were made in areas with four different cultivation periods: three, six, nine, and eleven years. Soil samples were also collected from an area cultivated with sugarcane, to be used as a reference. In each area, samples were collected from the 0-10, 10-20, and 20-40 cm layers, both disturbed and undisturbed. Chemical properties and organic carbon and its stock in the soil were analyzed. Additionally, aggregate classification and C stocks within them, microbial biomass carbon, basal respiration, metabolic and microbial quotient, glomalin abundance, and enzyme activities (beta-glucosidase, arylsulfatase, and alkaline phosphatase) were determined. After only three years of eucalyptus planting, there was already an increase in soil carbon stock; moreover, a greater amount of extra-large macroaggregates was obtained after six years of cultivation in the most superficial layer, indicating an improvement in soil structure. In the deeper layer, the greater amount of extra-large macroaggregates after 11 years of cultivation indicates greater ecosystem stabilization. After three years of cultivation, there was a greater tendency for enzymatic activity. The correlation between total glomalin and the proportional mass of large aggregates after 11 years of eucalyptus cultivation indicates a greater tendency for soil regeneration. The results of this study demonstrate that eucalyptus cultivation, even over relatively short periods, contributes significantly to the recovery of degraded soils, promoting an increase in total carbon stocks and their stabilization within macroaggregates, as well as favoring the metabolic efficiency of the microbiota and the formation of more stable physical structures. The simultaneous improvement of physical and microbiological attributes over time highlights the role of eucalyptus as a restorative agent, capable of triggering regenerative processes in the soil and strengthening its ecological resilience.

**Keywords:** Degraded áreas. Glomalin. Aggregate stability. Carbon stock.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Localização da distribuição dos pontos amostrados de solo em área de eucalipto, Maceió. 24
- Figura 2** - Coleta de amostras de solo em plantios de eucalipto e área de referência, em Maceió-AL 26
- Figura 3** - Determinação de densidade do solo pelo método do torrão parafinado em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 28
- Figura 4** - Separação das classes de agregados pelo método de Yoder em solos cultivados com eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 30
- Figura 5** - Análises de rotina de solos em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 31
- Figura 6** - Análise de Carbono da Biomassa Microbiana e Respiração Basal do Solo em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 35
- Figura 7** - Glomalina facilmente extraível e total no solo em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 36
- Figura 8** - Estoque de carbono em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 37
- Figura 9** - Carbono orgânico particulado e Estoque de carbono orgânico particulado em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 38
- Figura 10** - Valores de estoque de carbono orgânico e estoque de carbono orgânico particulado, na profundidade 20-40 cm, em cultivo de eucalipto. 39
- Figura 11** - Valores de estoque de carbono orgânico e estoque de carbono orgânico particulado, na profundidade 0-40 cm, em cultivo de eucalipto. 39

**Figura 12** - Carbono da biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico, quociente microbiano e quociente de mineralização, em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 43

**Figura 13** - Atividade enzimática em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 44

**Figura 14** - Glomalina facilmente extraível e total em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 45

**Figura 15** - Análise de componentes principais com as variáveis mais representativas, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL 46

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Nomeação, tempo, práticas de manejo, coordenadas geográficas e imagens das áreas de coleta 25
- Tabela 2** - Frações granulométricas, classificação textural e densidade do solo, em áreas com plantios de eucalipto e área de cana, nas diferentes profundidades. 28
- Tabela 3** - Caracterização química de solos em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL 32
- Tabela 4** - Médias do peso proporcional de agregados (g) em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL 40
- Tabela 5** - Estoque de carbono orgânico em agregado, em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL. 41

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Hipóteses .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.1 <i>Objetivo geral</i>.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>.....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Eucaliptocultura .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Solos degradados e sua utilização para plantios de eucalipto.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Macroagregação do solo como indicativo de regeneração .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Índices biológicos e sua sensibilidade as alterações do manejo.....</b>	<b>19</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Caracterização da área experimental.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Amostragem de solo.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3 Atributos físicos do solo .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.1 <i>Caracterização física do Solo</i>.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.1.1 <i>Análise granulométrica</i>.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.1.2 <i>Densidade do solo</i>.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.2 <i>Classificação e estabilidade de agregados</i>.....</b>	<b>27</b>
<b>3.4 Caracterização química dos solos.....</b>	<b>28</b>
<b>3.5 Carbono orgânico particulado .....</b>	<b>29</b>
<b>3.6 Determinação do estoque de carbono em nível de macroagregados.....</b>	<b>31</b>
<b>3.7 Estoques de carbono orgânico, carbono orgânico particulado e carbono em nível de macroagregado.....</b>	<b>31</b>
<b>3.8 Análise dos atributos microbiológicos do solo.....</b>	<b>32</b>
<b>3.8.1 <i>Determinação de carbono da biomassa microbiana, respiração basal do solo e quociente metabólico e microbiano</i>.....</b>	<b>32</b>
<b>3.8.2 <i>Quantificação da Glomalina e atividade enzimática</i>.....</b>	<b>33</b>
<b>3.9 Análise estatística.....</b>	<b>34</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Estoque de carbono no solo.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Estoque de carbono orgânico particulado no solo.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Distribuição proporcional de macroagregados.....</b>	<b>38</b>

<b>4.4</b>	<b>Estoque de carbono em nível de macroagregados.....</b>	<b>39</b>
<b>4.5</b>	<b>C biomassa, respiração basal, quociente metabólico, quociente microbiano e quociente de mineralização.....</b>	<b>40</b>
<b>4.6</b>	<b>Atividade enzimática e Glomalina.....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>O eucalipto influenciou positivamente na dinâmica do carbono nas áreas degradadas.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2</b>	<b>A distribuição de macroagregados do solo é influenciada pelo tempo de cultivo do eucalipto.....</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>Atributos microbiológicos do solo são influenciados pelo tempo do cultivo do eucalipto.....</b>	<b>48</b>
<b>5.4</b>	<b>Relação entre distribuição proporcional de agregados e glomalina.....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A intervenção do homem na paisagem natural, impulsionada pelo aumento populacional e consumo em geral, propiciou o surgimento de áreas degradadas, caracterizada por um processo complexo que envolve a deterioração dos atributos do solo, resultando em mudanças indesejáveis nas suas propriedades físicas e biológicas. O manejo intensivo do solo na agricultura é uma das principais causas dessa degradação, levando a compactação, erosão, salinização, redução da matéria orgânica, desequilíbrio da microbiota e alteração nos ciclos biogeoquímicos no solo, sendo responsáveis por diminuir a sua capacidade de resiliência com o passar do tempo.

Em áreas degradadas o cultivo do eucalipto surge como uma estratégia de valorar e recuperar os atributos dos solos, devido, principalmente, ao rápido desenvolvimento e à baixa exigência nutricional desta espécie. O crescimento dos plantios de eucalipto no Brasil, vem de uma demanda cada vez maior pelo uso de madeira e seus produtos. O eucalipto vem cumprindo seu papel fundamental de reduzir a pressão sobre as florestas nativas, que ainda são muito usadas como matriz energética e para a produção de móveis, diminuindo a ilegalidade da comercialização de madeiras nobres ou que pertençam a áreas de reserva legal.

No contexto da restauração de solos degradados, torna-se relevante investigar como o tempo de cultivo do eucalipto influencia a melhoria do solo. Parte-se da hipótese de que o avanço temporal do cultivo favorece tanto a formação de macroagregados estáveis quanto o incremento das atividades microbiológicas, processos que refletem em uma melhora estrutural e funcional do solo. Dessa forma, o monitoramento de atributos físicos e biológicos ao longo do tempo, pode revelar evidências do progresso na regeneração do ecossistema edáfico.

Os estoques de carbono no solo representam um dos principais indicadores de recuperação de ambientes degradados. A maior contribuição de resíduos orgânicos e o incremento da biomassa microbiana parecem estar associados a esse acúmulo, revelando um avanço na reestruturação do sistema edáfico. Além do acúmulo total de carbono, a distribuição desse elemento dentro dos agregados do solo fornece evidências sobre sua estabilidade e proteção física. A maior proporção de macroagregados extragrandes pode indicar que o carbono está sendo fisicamente protegido ao longo do tempo. Esse comportamento sugere não apenas a melhoria estrutural do solo, mas também um avanço na formação de compartimentos mais resilientes à decomposição.

A associação entre estoques de carbono, agregação do solo e atividade de enzimas microbianas aponta para uma regeneração progressiva em solos sob cultivo de eucalipto. Além disso, menores quocientes metabólicos, resultantes de menores emissões de dióxido de carbono indicam uma microbiota mais eficiente, enquanto os altos teores de glomalina (proteína produzida por fungos micorrízicos arbusculares) e sua correlação com agregados maiores sugerem que os mecanismos de estabilização do solo estão em desenvolvimento. Esses resultados reforçam o potencial do eucalipto como ferramenta de restauração funcional em áreas anteriormente degradadas.

Este estudo é fundamental por evidenciar como práticas de uso da terra, como o cultivo do eucalipto, podem influenciar na regeneração de ambientes degradados. Assim, esse estudo contribui para a compreensão dos mecanismos que sustentam a recuperação da funcionalidade do solo ao longo do tempo. Tais evidências podem auxiliar na busca por estratégias de manejo sustentável, orientando políticas de restauração ecológica dos sistemas florestais.

## 1.1 Hipóteses

- O tempo de cultivo do eucalipto influencia positivamente na maior distribuição dos macroagregados grandes e extragrandes;
- Os atributos microbiológicos são influenciados positivamente pelo tempo de cultivo do eucalipto;
- O tempo de cultivo de eucalipto aumenta os estoques de carbono, no solo e no interior dos agregados.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivo Geral*

- Avaliar as variações dos atributos físicos, químicos e microbiológicos nos diferentes tempos de cultivo do eucalipto na melhoria do solo.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Estimar os estoques de C e no solo e nos macroagregados em áreas com diferentes tempos de cultivo do eucalipto;
- Avaliar a distribuição de macroagregados do solo;
- Quantificar o C microbiano, as emissões de C-CO<sub>2</sub>, os quocientes microbiano e metabólico, produção de enzimas do ciclo do C, N, P e Glomalina em áreas com diferentes tempos de cultivo do eucalipto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Eucaliptocultura

Em escala global, houve uma expansão nos plantios florestais com objetivo de produzir madeira e seus derivados, para suprir a demanda da indústria da madeira. Atualmente, as florestas plantadas cobrem cerca de 131 milhões de hectares em todo mundo, sendo 45% destas geridas para fins comerciais, a maior parcela desses plantios está na América do Sul, onde também se encontra o maior percentual de plantações de espécies exótica (FAO, 2020). Florestas plantadas contribuem para a conservação ambiental, pois melhoram os diversos atributos do solo, liberam níveis baixos de gases do efeito estufa e são reservatórios naturais de carbono por meio da deposição da serrapilheira, com maior acúmulo de carbono orgânico (DOMKE et al., 2020).

No Brasil, o estado de Minas Gerais possui a maior área de florestas plantadas do país e do total de 10.228,282 milhões de hectares de floresta plantada até o ano de 2023, 76,55% se referem à eucaliptocultura, que se destaca pelo incremento médio anual (IMA) muito acima das espécies nativas brasileiras (IBA, 2024). Com utilização que vai desde a polpa de celulose até madeira serrada, suprimindo assim a demanda interna e diminuindo a pressão sobre florestas nativas (AMORIM et al., 2021). A produtividade do eucalipto atingiu o maior nível desde 2014, com 38,9 m<sup>3</sup>/ha/ano. O crescimento deste setor se dá comumente em áreas antes degradadas e, atualmente, gera cerca de 2,69 milhões de postos de trabalho diretos e indiretos ligados às florestas plantadas. A região nordeste participa com 13% da produção florestal do Brasil, destacando-se os estados da Bahia e Maranhão, que estão entre as 10 maiores áreas cultivadas do país, ocorrendo na Bahia aproximadamente o dobro da produção maranhense, que tem só na cidade de Caravelas, município com maior área plantada, 74.297 ha de plantios de eucalipto (SNIF, 2025).

Alagoas é o quarto maior estado do Nordeste em área com plantios florestais. Os cultivos neste estado tiveram origem nos anos 2000, com uma plantação de 88 ha, na Usina Marituba, município de Igreja Nova. Essa área era degradada devido aos muitos anos de cultivo intensivo de cana-de-açúcar e, mesmo o com o manejo inadequado em relação às operações necessárias para uma boa condução do plantio, verificou-se produtividade com aproveitamento da madeira para uso da lenha, venda de estacas para a construção civil e madeira para serraria (MADEIROS, 2019). De acordo com o IBGE, em 2023, Alagoas já contava com 27.692 ha plantados de Eucalipto.

O uso de áreas já degradadas, assim como a adoção de técnicas como o mosaico florestal, onde corredores ecológicos são criados pela intercalação de áreas de cultivo comercial, buscando o equilíbrio com o meio ambiente e as certificações florestais, necessárias para uma boa comercialização da madeira, agregando valor comercial ao produto. O aproveitamento de áreas declivosas e com dificuldade de implementação de espécies para plantios florestais; é uma realidade em vários países, como Índia, Vietnã, Portugal, Angola e China (BICH et al., 2019; JINUYE et al., 2022; NGUYEN et al., 2019).

## **2.2 Solos degradados e sua utilização para plantios de eucalipto**

A degradação do solo ocorre por vários motivos, sendo o principal deles é a má conservação como consequência de atividades humanas. E, por definição, um solo degradado que sofreu perda ou diminuição das qualidades física, química e biológica, ou seja, tornou-se incapaz de realizar adequadamente as suas funções ecossistêmicas (MOREAS et al., 2022). De acordo com a FAO (2021), cerca de 33% dos solos no mundo são considerados moderados ou altamente degradados; na América Latina esse número chega a 60%. São diversas as causas que levam à degradação, tais como o desmatamento, a agricultura e a pecuária com manejo inadequado e a superexploração vegetal (MOARES et al., 2022).

A degradação do solo interrompe os ciclos naturais de nutrientes, tornando-os menos disponíveis e afetando negativamente a produtividade agrícola. A estrutura do solo também sofre danos, com a destruição dos agregados, resultando em solo menos friável e mais compactado. Sinais visíveis de erosão, como sulcos e ravinas, tornam-se evidentes, e tanto a retenção quanto a capacidade de infiltração de água são reduzidas. Isso aumenta o risco de erosão superficial e diminui a disponibilidade de água para as plantas. Além disso, a degradação do solo resulta na perda de nutrientes essenciais, diminuindo sua fertilidade e capacidade de sustentar o crescimento saudável de plantas. A redução da matéria orgânica, que é vital para a fertilidade e estrutura do solo, também ocorre (VOLTR et al., 2021). A biodiversidade do solo é drasticamente afetada pela degradação, impactando microfauna, mesofauna e macrofauna, e diminuindo o acúmulo e a decomposição de matéria orgânica, além da ciclagem de nutrientes (TIBBETT et al., 2020).

É imprescindível investigar as razões da baixa fertilidade de um solo, e procurar métodos alternativos de produção para conter o avanço da degradação (OLIVEIRA et al., 2021). A restauração destas áreas é um processo de constante aprimoramento, que demanda conhecimento, tecnologia e monitoramento contínuo para estabelecer condições para reativar

redes de interações ecológicas entre solos, plantas, animais e microclima, possibilitando o reequilíbrio dinâmico nestas áreas (CHITERO et al., 2020).

O manejo inadequado das culturas com aplicação de forças externas, como pisoteio, tráfego de máquinas e ação mecânica de equipamentos, podem causar a compactação do solo, pois causam a aproximação destas partículas e consequentemente aumentam a densidade do solo (SUZUKI et al., 2022). A redução do volume do solo ocorre devido à diminuição do espaço poroso, resultante da transformação de poros de maior diâmetro em poros de diâmetro cada vez menor. Nesse processo de compactação, o aumento da densidade está associado à redução da porosidade total e macroporosidade (DE LIMA et al., 2022). Alterações nos atributos físicos do solo, como o aumento da densidade, redução da condutividade hidráulica saturada e aumento do grau de compactação em solos cultivados com cana-de-açúcar são observados em diversos trabalhos encontrados na literatura (CAVALCANTI et al., 2020; DE OLIVEIRA et al., 2022; GRAVINA et al., 2021).

Um solo com maior compactação possui sistema poroso comprometido e indica que uma macroporosidade de  $0,10 \text{ cm}^{-3}$ , pode comprometer a aeração adequada do solo para as plantas (SUZUKI et al., 2022). Em cultivos sob diferentes classes de solo, Reichert et al. (2022) observaram maior produtividade do Eucalipto Argissolos, devido a maior profundidade e capacidade de armazenamento de água, corroborando que um solo que propicia crescimento de raízes em profundidade, eleva a produtividade nos plantios. França et al. (2021) verificou o aumento do crescimento de árvores de eucalipto em solos argilosos em áreas declivosas, devido ao maior crescimento das raízes.

### **2.3 Macroagregação do solo como indicativo de regeneração**

Os atributos físicos do solo estão envolvidos no suporte ao crescimento radicular, armazenagem e suprimento de água e nutrientes, trocas gasosas e atividade biológica (MÜLLER et al., 2020), destacam-se a agregação, densidade e estabilidade de agregados (SILVA et al., 2020). Por ser muito sensível às mudanças no manejo e estar intimamente ligada a atividade microbiana, a agregação do solo é um dos índices mais encontrados na literatura e consiste na principal forma de proteção física do C no solo (LIAO et al., 2022).

Os agregados do solo consistem na união de partículas primárias do solo em pequenas estruturas que se formam através da ação de organismos como cadeias gelatinosas de polissacarídeos (agentes transientes), raízes de plantas, hifas de fungos (agentes temporários) e também pela atuação do húmus e íons de Fe, Al e Ca (agentes persistentes) (TISDALL;

OADES, 1982). Os agregados consistem na principal forma de proteção física do C do solo contra os processos de oxidação pela biomassa microbiana. A sua presença nos sistemas agrícolas, dessa forma, garante a boa estrutura do solo para desenvolvimento das plantas, além de promover o sequestro de C na agricultura (TIVET et al., 2013A; TIVET et al., 2013B; DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2018).

Os macroagregados podem ser divididos em classes de acordo com o seu tamanho. Em áreas onde é realizado o revolvimento do solo por operações de aração e gradagem, tem sido reportado a maior presença de macroagregados pequenos, com tamanhos variando de 0,25 a 2 mm de diâmetro, enquanto em áreas de agricultura conservacionista de longa duração é encontrado com maior frequência macroagregados grandes (2-8 mm) e extragrandes (8-19 mm). Eventos de revolvimento do solo, promovem a quebra dos macroagregados, expondo a matéria orgânica previamente protegida em seu interior à processos de decomposição pela biomassa microbiana, resultando na degradação dos estoques de C do solo (DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2018).

Dessa forma, a agregação do solo tem sido amplamente utilizada como parâmetro de avaliação de qualidade de sistemas de produção agrícola, como no caso de Pinto et al. (2025) que concluiu que os bioagregados são importante fonte de nutrientes para o solo, aumentando a fertilidade, um dos principais fatores de influência na qualidade dos ambientes. Da mesma forma, a estabilidade de agregados é indicada por Poeplau et al. (2024) como indicador útil em escala nacional, que deve ser incluído em inventários de solo, e que vai além dos proxies indiretos como o estoque de carbono.

## **2.4 Índices biológicos e sua sensibilidade as alterações do manejo**

A biota do solo é uma comunidade viva e altamente dinâmica, fazendo com que os indicadores biológicos sejam extremamente sensíveis as alterações do manejo e perturbações ambientais, demonstrando mudanças significativas em um espaço de tempo mais curto que as propriedades físicas e químicas. Os indicadores biológicos refletem diretamente a atividade e diversidade dos organismos vivos do solo, respondendo as alterações na matéria orgânica, nutrientes e presença de substâncias tóxicas de forma direta (KANG et al., 2023).

Os indicadores biológicos constituem ferramentas eficazes para a quantificação da atividade microbiana no solo, sendo amplamente utilizados na avaliação da qualidade de ambientes edáficos, especialmente em áreas degradadas. A dinâmica da sucessão florestal está

fortemente associada à disponibilidade de matéria orgânica, que atua como substrato energético e nutricional para os microrganismos do solo, e irá condicionar a abundância e riqueza da microbiota (HU et al., 2024). Indicadores microbianos como C da biomassa microbiana, atividades enzimáticas e respiração basal, são frequentemente utilizados, com comprovada sensibilidade às modificações na paisagem (TONON-DEBIASI et al., 2023). O carbono da biomassa microbiana varia de acordo com a quantidade de matéria orgânica disponível para os microrganismos, refletindo mudanças no manejo do solo, como adubação e rotação de culturas.

A respiração basal do solo reflete a atividade metabólica dos microrganismos, quantificando o dióxido de carbono liberado pelo solo. Estes dois atributos podem ser relacionados e gerando um outro indicador, o quociente metabólico, que mede perturbações da microbiota do solo, sendo um potencial indicador de decomposição da matéria orgânica (RISCH et al., 2023). Mudanças na qualidade da matéria orgânica adicionada podem ser um fator limitante ou favorável ao carbono da biomassa microbiana, a relação que surge entre o teor carbono da biomassa microbiana e o teor carbono orgânico, denominado quociente microbiano, fornece uma medida de qualidade da matéria orgânica, refletindo estados de equilíbrio ou desequilíbrio do solo (SILVA et al., 2021). E da relação entre a respiração basal e o carbono orgânico obtém-se o quociente de mineralização, que indica a porcentagem de carbono potencialmente mineralizado dentro do carbono orgânico, refletindo a eficiência na degradação, fornecendo informações sobre a estabilidade da matéria orgânica (RUTIGLIANO et al., 2023).

Outro indicador de melhoria nos atributos do solo de grande destaque é a glomalina, uma proteína produzida no micélio de fungos micorrízicos arbusculares que é de suma importância para a agregação do solo, sendo associada a melhoria na estruturação, maior retenção de água, maior capacidade de fixar carbono no solo e com maior disponibilidade de nutrientes para as plantas. Essa glicoproteína armazena carbono no solo, ajudando a diminuir a emissão de gases de efeito estufa e contribuindo para a sustentabilidade ambiental (SILVA, 2023).

A atividade enzimática se refere as reações químicas catalisadas por enzimas que ocorrem no solo. Microrganismos como bactérias, fungos e outros organismos do solo, produzem enzimas que são cruciais para a ciclagem de nutrientes e decomposição da matéria orgânica, elas ajudam a quebrar compostos complexos em forma mais simples, que podem ser assimiladas pelas plantas (BŁOŃSKA et al., 2021).

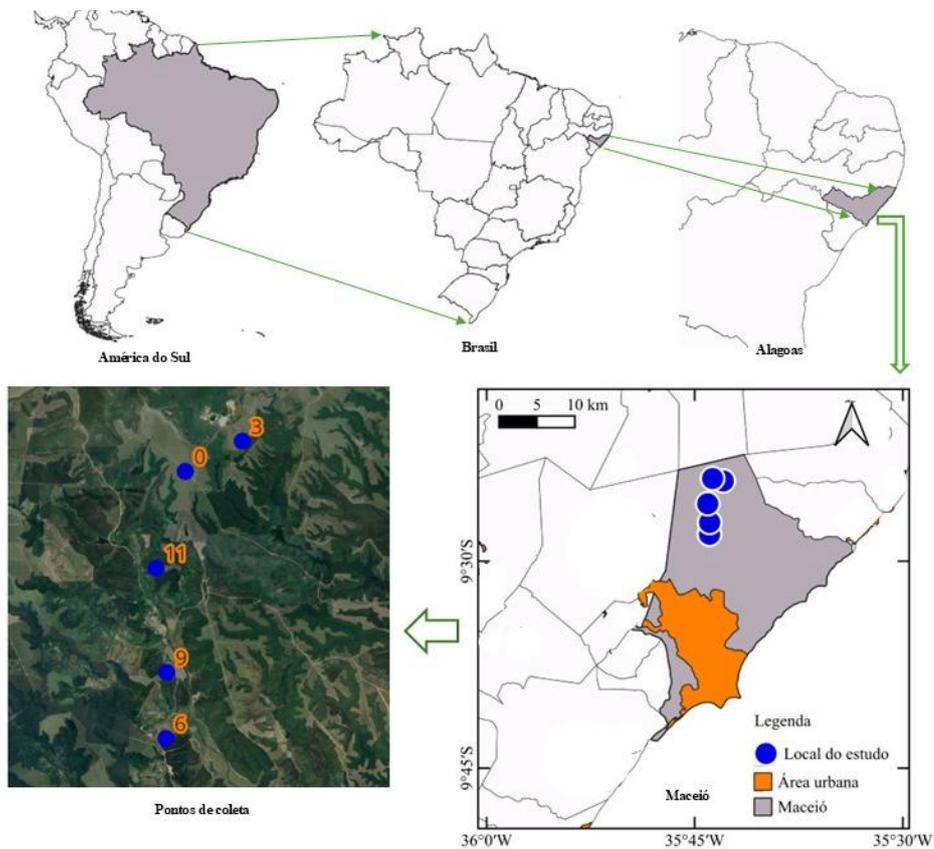
As enzimas mais comumente quantificadas são: a  $\beta$ -glicosidase, que participa da decomposição de carboidratos, liberando açúcares simples como a glicose, facilmente assimilados pelas plantas (FIGUEIREDO et al., 2023); a arilsulfatase, que participa do ciclo do enxofre, mineralizando ésteres de sulfato no solo, o aumento da arilsulfatase pode ser ligado a quantidade de fungos, pois esta enzima é correlacionada com o ergosterol, quase exclusivamente encontrado em fungos (YU et al., 2023); e a fosfatase alcalina, que está ligada ao ciclo do fósforo, sendo uma enzima que degrada fósforo orgânico em formas disponíveis para as plantas. A atividade das fosfatases é influenciada pelas propriedades do solo, da cobertura vegetal e pela presença de inibidores e indutores (XIAOMEI et al., 2024).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área experimental

A área de estudo está localizada na região metropolitana de Maceió, Alagoas, na região dos tabuleiros costeiros, em uma empresa de base florestal ( $9^{\circ}26'33.5''$  S,  $35^{\circ}44'01.4''$  W), com extensão de 21.125 ha, dentre estes, 13.546,51 ha com plantios de eucalipto.

**Figura 1** - Localização da distribuição dos pontos amostrados de solo em área de eucalipto, Maceió.



O clima é As (tropical litorâneo úmido), de acordo com a classificação de Köppen, tem temperatura  $25,6^{\circ}\text{C}$  e precipitação  $1.713\text{mm}$  de média anuais (BARROS et al., 2012). O solo foi classificado como Argissolo vermelho amarelo (SANTOS et al., 2018), com relevo de plano a fortemente ondulado.

Foram estudadas áreas com cultivo de *Eucalyptus sp.*, destinadas a produção para uso múltiplo da madeira. Foram definidas cinco áreas: A3 – três anos de cultivo, A6 – seis anos de cultivo, A9 - nove anos de cultivo, A11 – onze anos de cultivo e AC – área de referência com cultivo de cana-de-açúcar.

**Tabela 1** - Nomeação, tempo, práticas de manejo, coordenadas geográficas e imagens das áreas de coleta

ÁREAS	TEMPO DE CULTIVO	PRÁTICAS DE MANEJO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	IMAGENS DAS ÁREAS
A3	3 anos de plantio de eucalipto	Adubação de cobertura com um ano de plantio	9°24'10.75" S 35°42'56.70" W	
A6	6 anos de plantio de eucalipto	Sem adubação, irrigação ou controle de mato competição	9°28'2.68" S 35°43'55.97" W	
A9	9 anos de plantio de eucalipto	Sem adubação, irrigação ou controle de mato competição	9°27'11.12" S 35°43'55.41" W	
A11	11 anos de plantio de eucalipto	Sem adubação, irrigação ou controle de mato competição	9°25'49.89" S 35°44'3.75" W	
AC	Mais de 100 anos de plantio de cana-de-açúcar	Pousio por mais de 10 anos	9°24'0.18" S 35°43'42.72" W	

### 3.2 Amostragem do solo

As áreas de coleta foram selecionadas de forma a considerar a mesma classe de solo e nos plantios de eucalipto, o mesmo material genético. Foram definidas três repetições por área, e em cada repetição foi aberta uma trincheira de aproximadamente 50 cm (Figura 2). A amostragem foi realizada nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-40 cm, e foram definidas considerando a maior atividade microbiológica e acúmulo de matéria orgânica, além de diminuir custos de amostragem (HAO et al., 2021; YOST; HARTEMINK, 2020).

Em cada trincheira aberta foram coletadas amostras deformadas, armazenadas em sacos plásticos e transportadas para o laboratório, dentro de um prazo curto de tempo, não sendo necessário refrigeração durante o transporte. Posteriormente, em laboratório, as amostras coletadas foram divididas em porções iguais, onde uma parte do solo foi seca ao ar e passadas em peneiras de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), que seriam utilizadas nas análises químicas e físicas, e as amostras a serem utilizadas nas análises microbiológicas, foram passadas em peneira de 2 mm, porém com manutenção da umidade de campo e armazenadas em geladeira a aproximadamente 4° C.

As amostras indeformadas foram coletadas na forma de torrão, envoltas em filme PVC para manutenção da estrutura, e levadas ao laboratório com os devidos cuidados para evitar impactos e possíveis danos a estrutura dos torrões (Figura 2).

**Figura 2** - Coleta de amostras de solo em plantios de eucalipto e área de referência, em Maceió-AL



A= Perfil em Argissolo, com aproximadamente 50cm, aberto para coletas; B= amostra indeformada em formato de torrão; C= Agregados sendo envoltos em plástico filme para preservação da estrutura. Fonte: autor.

## 3.2 Atributos físicos do solo

### 3.2.1 Caracterização física do solo

#### 3.2.1.1 Análise granulométrica

Foram pesados 20 gramas de TFSA em uma lata pequena, previamente identificada, pesada e anotada a massa. Este material, foi colocado em estufa a 105° até peso constante, após retirada da estufa, o material foi disposto no dessecador por 10 min e realizada pesagem do material para obtenção de TFSE e posterior quantificação do fator F, cálculo da correção de umidade, através da equação  $F = TFSA / TFSE$ .

Foram pesados 50 g de TFSA de solo, adicionados água e dispersante (hidróxido de sódio 1 mol/L) e levados ao agitador tipo Wagner por 16 horas à 50rpm. Após a agitação, o conteúdo da garrafa foi transferido para uma proveta de 1000 ml, completadas com água até a marca de 940 ml e realizado agitação manual de 1 min cada amostra. Após repouso de 24 horas, o densímetro de Bouyoucos, ASTM 152 h, foi inserido nas provetas e anotado o valor. Após finalização das leituras, o conteúdo da proveta foi passado em peneira de 0,053 mm, com lavagem em abundância, de forma a descartar toda argila e silte, restando apenas a fração areia na peneira, que foi levada a estufa a 105° até obtenção de peso constante (BRADY; WEIL, 2010).

#### 3.2.1.2 Densidade do solo

Para determinar a densidade dos solos, as amostras indeformadas em torrões, foram deixadas expostas para secar ao ar. Após secagem, torrões com diâmetros entre 4 e 7cm, foram amarrados com fios previamente pesados, e mergulhados na parafina fundida entre 60 e 65°C, colocados para secar e pesados após resfriamento. Para mensurar o volume, um béquer contendo água foi acomodado em cima de uma balança e o torrão parafinado submerso (Figura 3). Para correção do fator umidade, amostras dos torrões após determinação foram levadas a estufa até peso constante (TEIXEIRA et al., 2017). Apresentaram as seguintes médias para cada área (Tabela 2).

**Figura 3** - Determinação de densidade do solo pelo método do torrão parafinado em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.



A= torrões entre 4 e 7 cm, prontos para imersão na parafina derretida; B= pesagem do conjunto torrão com fios e clips; C= revestimento do torrão na parafina derretida. Fonte: autor.

**Tabela 2** - Frações granulométricas, classificação textural e densidade do solo, em áreas com plantios de eucalipto e área de cana, nas diferentes profundidades.

Áreas	Areia	Silte	Argila	Classe Textural	Ds
	----- g kg <sup>-1</sup> -----				g cm <sup>3</sup>
<b>Profundidade 0-10 cm</b>					
A3	508,32 <sup>±7,94</sup>	69,68 <sup>±3,34</sup>	422,0 <sup>±10,22</sup>	Arg Ar	1,44 <sup>±0,04</sup>
A6	660,44 <sup>±3,25</sup>	60,55 <sup>±3,25</sup>	279,0 <sup>±0,00</sup>	Fr Arg Ar	1,57 <sup>±0,04</sup>
A9	656,87 <sup>±1,21</sup>	71,71 <sup>±1,21</sup>	265,4 <sup>±0,01</sup>	Fr Arg	1,50 <sup>±0,04</sup>
A11	609,51 <sup>±0,10</sup>	70,58 <sup>±1,22</sup>	319,9 <sup>±20,42</sup>	Fr Arg Ar	1,50 <sup>±0,01</sup>
AC	525,92 <sup>±6,92</sup>	85,86 <sup>±6,90</sup>	388,2 <sup>±0,02</sup>	Arg Ar	1,46 <sup>±0,05</sup>
<b>Profundidade 10-20 cm</b>					
A3	498,55 <sup>±0,86</sup>	72,6 <sup>±1,22</sup>	428,8 <sup>±0,03</sup>	Arg Ar	1,48 <sup>±0,12</sup>
A6	636,55 <sup>±0,00</sup>	64,02 <sup>±0,00</sup>	299,4 <sup>±0,00</sup>	Fr Arg Ar	1,60 <sup>±0,04</sup>
A9	626,05 <sup>±14,19</sup>	60,89 <sup>±3,98</sup>	313,1 <sup>±10,21</sup>	Fr Arg Ar	1,56 <sup>±0,06</sup>
A11	618,81 <sup>±11,31</sup>	61,26 <sup>±1,09</sup>	319,9 <sup>±10,22</sup>	Fr Arg Ar	1,52 <sup>±0,08</sup>
AC	523,5 <sup>±8,31</sup>	81,39 <sup>±1,88</sup>	395,1 <sup>±10,19</sup>	Arg Ar	1,48 <sup>±0,05</sup>
<b>Profundidade 20-40 cm</b>					
A3	484,21 <sup>±7,37</sup>	80,12 <sup>±7,38</sup>	435,7 <sup>±0,01</sup>	Arg Ar	1,49 <sup>±0,02</sup>
A6	621,59 <sup>±1,22</sup>	72,18 <sup>±3,88</sup>	306,2 <sup>±10,21</sup>	Fr Arg Ar	1,58 <sup>±0,00</sup>
A9	595,2 <sup>±2,31</sup>	64,48 <sup>±2,28</sup>	340,3 <sup>±0,03</sup>	Arg Ar	1,61 <sup>±0,05</sup>
A11	573,55 <sup>±33,44</sup>	92,77 <sup>±7,21</sup>	339,7 <sup>±10,26</sup>	Fr Arg Ar	1,54 <sup>±0,06</sup>
AC	461,98 <sup>±29,68</sup>	122,42 <sup>±43,60</sup>	415,6 <sup>±0,13</sup>	Arg Ar	1,54 <sup>±0,01</sup>

Fr Arg Ar = Franco Argilo Arenoso; Fr Ar = Franco Arenoso; Arg Ar = Argilo Arenoso; Ds = Densidade do solo. Em colunas as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%.

### 3.3.2 Classificação e estabilidade de agregados

Em laboratório, foi realizada a separação das classes de agregados e quantificação de macroagregados. Para isso, as amostras de campo foram submetidas a um pré-tratamento, em que os agregados foram desprendidos pelos pontos de fraqueza e foi utilizado o material retido entre peneiras de malhas 20 e 7mm, para padronização dos tamanhos dos agregados, de acordo com metodologia descrita por Barreto et al. (2009). Após a separação, amostras de 100g foram pesadas e umedecidas por capilaridade para não ocorrer rompimento dos agregados. Em seguida foram submetidas ao tamisamento úmido para determinação e distribuição das classes de agregados pelo método de Yoder (1936) modificado por Nimmo e Perkins (2002), em um oscilador horizontal, com aproximadamente 26 oscilações por minuto durante 15 minutos (Figura 5). Os macroagregados foram classificados em extragrandes (8 a 19 mm), grandes (2 a 8 mm) e pequenos (0,25 a 2 mm).

Após essa etapa, as amostras foram coletadas de cada peneira, dispostas em latas previamente pesadas, e levadas a estufa a 65°C até peso constante. Após secas, as amostras foram pesadas e armazenadas em sacos plásticos. De posse dos dados após secagem, foi calculada a massa proporcional de agregados (MPA), o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) de acordo com Castro Filho et al. (1998).

$$\text{Massa proporcional de agregados (\%)}: \frac{\text{Massa da classe}}{\sum \text{Massa da classe}} * 100 \quad (1)$$

$$\text{DMP (mm)}: \sum_{i=1}^n (xi \cdot wi) \quad (2)$$

$$\text{DMG (mm)}: \text{EXP} \frac{\sum_{i=1}^n wp \cdot \log xi}{\sum_{i=1}^n wi} \quad (3)$$

Onde:

- ✓ Xi é o diâmetro médio das classes em mm;
- ✓ Wi é a proporção de cada classe em relação ao total;
- ✓ Wp é o peso dos agregados de cada classe.

**Figura 4** - Separação das classes de agregados pelo método de Yoder em solos cultivados com eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.

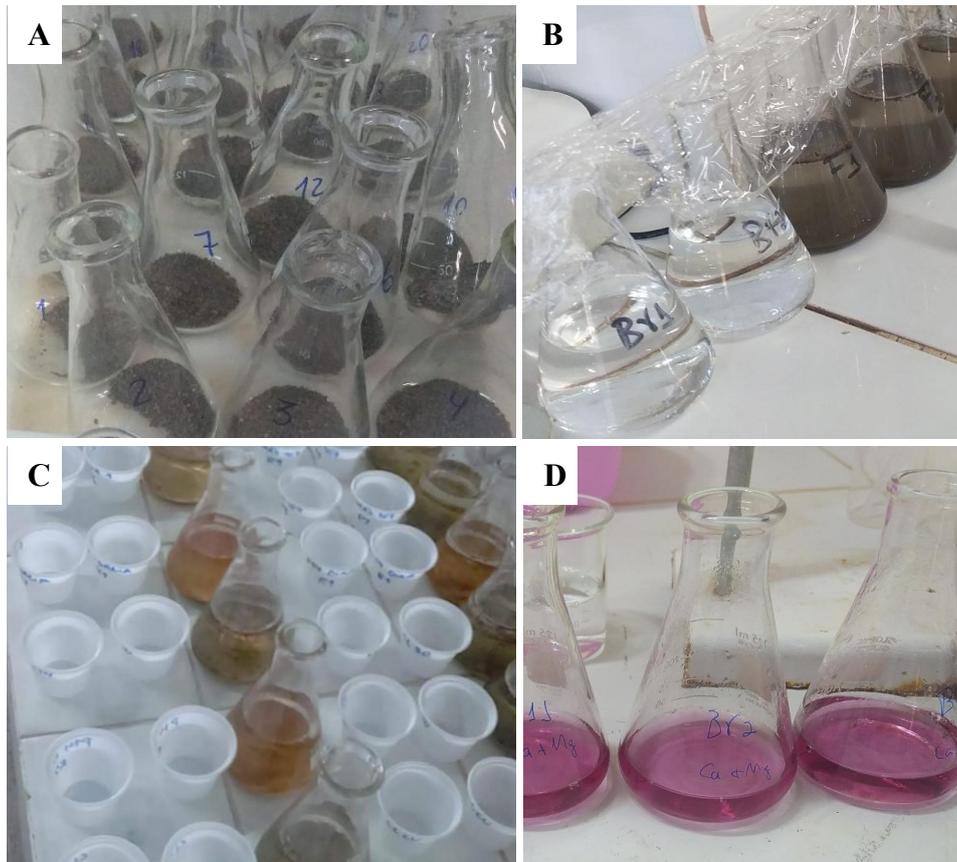


A= torrão sendo dividido em pontos de fraqueza; B= padronização do tamanho dos agregados, retidos em peneira de 7mm; C= agregados uniformes apresentando bioporos; D= oscilador horizontal utilizado na análise; E= detalhe das peneiras com macroagregados extragrandes, grandes e pequenos, retidos após oscilação por aproximadamente 15 min via úmida. Fonte: autor.

### 3.3 Caracterização química dos solos

Foram determinados os seguintes atributos químicos do solo: 1) pH, determinado em água na relação 1:2,5 (solo/água); 2)  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  trocáveis, extraídos com solução de KCl 1,0 mol/L, determinação por titulometria; 3)  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  trocáveis e P disponível, extraídos com solução Mehlich-1, com determinação em fotômetro de chamas (Na e K) e espectrofotometria UV/VIS (P). O carbono orgânico do solo foi extraído pelo método de oxidação via úmida com dicromato de potássio, determinado por titulometria; 4)  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ , extraído com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> pH 7,1 – 7,2, determinado por titulometria. Foram calculadas estimativas de soma de bases (SB), saturação por bases (V%), CTC efetiva e CTC total, e saturação por Al(m%) (TEIXEIRA et al., 2017).

**Figura 5** - Análises de rotina de solos em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.



A= Pesagem de solo em erlenmeyers para extração com melich-1, cloreto de cálcio e acetato de sódio; B= adição dos extratores e descanso após agitação para decantação; C= pipetagem para leituras de fósforo, sódio e potássio em solos; D= titulação para leitura de Ca e Mg. Fonte: autor.

### 3.4 Carbono orgânico particulado

O carbono orgânico particulado (COP) é a fração do carbono associada as partículas maiores, é a fração mais lábil do carbono, composto principalmente por estruturas vegetais e material fúngico (ROCCI et al., 2021). Para determinar o COP em tubos de centrifuga foram pesados 10g de TFSA e adicionados 25 ml de H<sub>2</sub>O e 0,18 g de hexametáfosfato de sódio. Após ligeira agitação manual, os frascos foram agitados durante 15 h em um agitador horizontal na frequência de 90 rpm, o conteúdo do frasco foi passado em peneiras de 250 e 53  $\mu$ m para obtenção da fração deste intervalo, após, foi realizada uma lavagem do frasco sobre a peneira de 53 $\mu$ m (Feller, 1994; Sá et al., 2001). O material retido na peneira foi colocado em um cadinho previamente pesado, identificado e levado à estufa sob temperatura de 60°C. Após a secagem o COP foi determinado por digestão de via úmida (Yeomans; Bremner, 1988).

**Tabela 3** - Caracterização química de solos em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL

Áreas	pH (água) 1:2,5	Ca	Mg	Al	Na	K	P	CO	H + AL	S	CTC Ef	CTC Total	V %
Profundidade 0-10 cm													
A3	5.5±0,16	2.40±0,00	0.50±0,00	0.25±0,0	0.35±0,01	2.27±0,40	6.6±0,56	33.69±1,96	5.58±0,35	5.51±0,40	5.76±0,40	11.09±0,21	49.7±3,21
A6	4.8±0,14	0.65±0,25	0.40±0,20	0.90±0,04	0.14±0,07	0.56±0,03	7.4±1,44	21.95±1,24	7.42±0,22	1.75±0,06	2.65±0,08	8.72±0,17	19.5±1,05
A9	4.7±0,09	0.50±0,00	0.20±0,15	1.15±0,12	0.18±0,04	0.43±0,06	30.6±0,11	28.12±2,33	8.75±0,26	1.31±0,13	2.46±0,41	10.06±0,38	12.57±0,05
A11	5.1±0,27	1.05±0,15	0.70±0,05	0.45±0,08	0.24±0,04	0.23±0,04	1.1±0,42	18.94±0,95	6.01±0,43	2.21±0,23	2.66±0,06	8.22±0,21	28.83±1,33
AC	5.7±0,24	2.70±0,1	1.00±0,05	0.05±0,0	0.35±0,05	1.44±0,02	25.8±1,71	24.37±0,49	5.32±0,43	5.49±0,07	5.54±0,07	10.81±0,49	50.8±1,77
Profundidade 10-20 cm													
A3	5.5±0,18	2.15±0,35	0.15±0,15	0.25±0,04	0.16±0,04	1.75±0,08	4.9±0,31	28.47±0,66	5.32±0,09	4.52±0,21	4.46±0,48	9.53±0,49	44.1±3,85
A6	4.7±0,20	0.30±0,00	0.15±0,05	0.80±0,04	0.08±0,03	0.50±0,11	2.2±1,05	12.43±1,25	6.39±0,30	1.03±0,06	1.83±0,00	7.72±0,55	13.4±1,63
A9	4.6±0,13	0.25±0,05	0.05±0,00	1.45±0,08	0.14±0,04	0.36±0,12	18.6±0,81	18.65±0,0	7.64±0,18	0.8±0,17	2.25±0,14	8.43±0,22	10.5±0,58
A11	5.3±0,10	1.80±0,00	0.80±0,05	0.25±0,04	0.26±0,04	0.19±0,06	1.3±0,49	10.56±1,87	5.32±0,43	3.05±0,09	3.3±0,12	8.37±0,51	36.5±1,29
AC	5.9±0,12	2.75±0,15	0.75±0,10	0.05±0,00	0.14±0,01	1.29±0,16	22.3±0,07	17.04±0,36	3.35±0,00	4.93±0,27	4.98±0,27	8.28±0,27	58.75±0,15
Profundidade 20-40 cm													
A3	5.2±0,32	2.75±0,75	0.05±0,05	0.25±0,00	0.13±0,03	1.64±0,15	2,3±0,39	21.37±1,53	5.67±0,26	4.2±0,22	4.45±0,12	9.87±0,03	44.5±4,15
A6	5.0±0,10	0.30±0,00	0.15±0,00	0.85±0,08	0.05±0,03	0.54±0,09	1.2±0,07	14.73±1,97	5.71±0,48	1.04±0,07	1.89±0,27	6.7±0,47	13.7±0,07
A9	4.8±0,41	0.50±0,05	0.20±0,05	1.35±0,00	0.05±0,03	0.15±0,02	2.3±0,40	10.14±0,65	6.44±0,35	0.44±0,09	1.79±0,09	6.88±0,28	7.27±0,07
A11	5.0±0,12	0.60±0,40	0.65±0,10	0.80±0,14	0.14±0,02	0.28±0,07	2.3±0,74	18.92±1,58	7.64±0,18	1.67±0,33	2.47±0,09	9.31±0,47	19.37±0,90
AC	5.8±0,08	2.20±0,00	0.55±0,10	0.05±0,00	0.03±0,16	1.36±0,16	7.3±1,40	20.83±1,54	3.44±0,09	4.19±0,21	4.24±0,21	7.63±0,29	54.94±0,62

A3=plantio de eucalipto de 3 anos de idade; A6=plantio de eucalipto de 6 anos de idade; A9=plantio de eucalipto de 9 anos de idade; A11=plantio de eucalipto de 11 anos de idade; e AC= área de plantio de Cana de açúcar.

### 3.5 Determinação de carbono em nível de macroagregados

Após a separação de agregados pelo método Yoder, o material devidamente seco foi macerado e peneirado em malha de 60 mesh. Na sequência subamostras entre 0,1 e 0,3 gramas foram transferidas para tubos de digestão e digeridas em bloco digestor com a adição de 5 ml de dicromato de potássio ( $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ ) e 7,5 ml de ácido sulfúrico concentrado, por 30 minutos a  $170^\circ\text{C}$ . Após resfriamento dos tubos, todo o volume foi vertido em erlenmeyers de 250 ml e o volume completado para aproximadamente 80 ml. Por fim, foi realizada a titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal a  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  e aproximadamente 0,3 ml do indicador Ferroin. Para o controle de qualidade, quatro amostras em branco, duas frias e duas aquecidas, foram adicionadas em cada bloco completo, conforme método Walkley-Black (Mendonça e Matos, 2005).

O cálculo de teor de carbono foi feito pela equação:

$$A = [(V_{ba} - V_{am}) * (V_{bn} - V_{ba}) / V_{bn}] + (V_{ba} - V_{am}) \quad (4)$$

$$\text{CO (dag Kg}^{-1}\text{)} = \frac{A.M.3.100}{pa} \quad (5)$$

Onde:

- ✓  $V_{ba}$  é o volume gasto na titulação do branco aquecido;
- ✓  $V_{bn}$  é o volume gasto na titulação do branco não aquecido;
- ✓  $V_{am}$  é o volume gasto na titulação da amostra;
- ✓  $A$  é o valor da equação anterior;
- ✓  $M$  é o valor da molaridade do sulfato ferroso;
- ✓ é a constante utilizada referente ao número de mols de  $\text{Cr}_2\text{O}_7^-$ ;
- ✓ 100 é o fator que vai converter o peso de  $\text{mg mg}^{-1}$  para  $\text{dag kg}^{-1}$ ;
- ✓  $P_a$  é o peso da amostra em mg.

### 3.6 Estoques de carbono orgânico, carbono orgânico particulado e carbono em nível de macroagregado

Com os dados dos teores de carbono orgânico e carbono orgânico particulado, foi calculado o estoque de C com base no método de massa equivalente de solo (Ellert; Bettany, 1995).

$$\text{Estoque de C (ton ha}^{-1}\text{): } C_{org}(\text{Kg ha}^{-1}) * VPA (m^3) \quad (6)$$

O estoque de carbono em nível de macroagregados foi calculado conforme De Oliveira Ferreira et al. (2018):

$$\text{Estoque COS na CA (Mg ha}^{-1}\text{): } \frac{\text{Estoque de COS (Mg) na amostra de solo} + \% \text{COS em CA}}{100} \quad (7)$$

$$\text{Porcentagem COS (\%): } \frac{\text{COS (gkg}^{-1}\text{) em cada CA} * 100}{\sum \text{COS (gkg}^{-1}\text{)}} \quad (8)$$

$$\text{Estoque COS (Mg ha}^{-1}\text{): } \text{COS (Mg) na amostra de solo} * Ds (\text{ton m}^{-3}) * VPA (\text{m}^{-3}) \quad (9)$$

Onde:

- ✓ COS = Carbono Orgânico do Solo;
- ✓ CA= Classe de agregados;
- ✓ Ds= Densidade do solo da camada;
- ✓ VPA= Volume por granulometria.

### 3.7 Análise dos atributos microbiológicos do solo

#### 3.7.1 Determinação de carbono da biomassa microbiana, respiração basal do solo e quociente metabólico e microbiano.

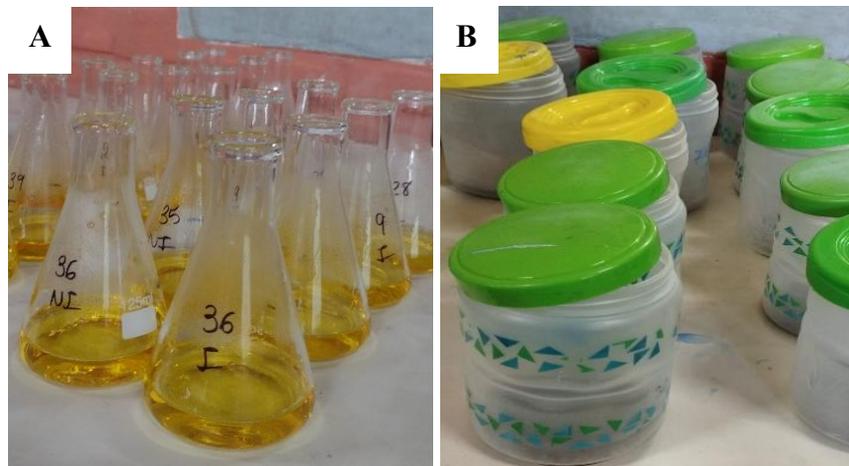
O carbono da biomassa microbiana ( $C_{mic}$ ) foi determinado pelo método da irradiação-extração. As amostras que estavam refrigeradas foram passadas em peneiras de 2 mm, e deste material 20 g foram pesados em Erlenmeyer, com amostras em duplicatas, onde uma foi levada para irradiação em micro-ondas de acordo com o tempo previamente calculado, obtendo as amostras irradiadas e não irradiadas. No mesmo momento, subamostras foram levadas a estufa por 24 horas a 105° para determinação de umidade.

Posteriormente foi adicionado 80 ml da solução extratora de dicromato de potássio 0,066 mol L<sup>-1</sup>, agitados por 30 min no agitador horizontal, deixados em repouso por 30 min e filtrado o sobrenadante. A determinação foi feita por titulação, usando 10 ml da solução filtrada, 2 ml de dicromato, 10 ml de ácido sulfúrico e 50 ml de água, o titulante usado foi o sulfato ferroso amoniacal a 0,03 mol L<sup>-1</sup> (MENDONÇA; MATOS, 2017).

A respiração basal do solo (RBS) (C-CO<sub>2</sub>) foi estimada pela quantificação do C-CO<sub>2</sub> em amostras de solos incubadas por sete dias. 50g de solo foram pesadas em recipientes plásticos com fechamento hermético, contendo um frasco com 30 ml de solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, após os 7 dias em incubação em local sem iluminação, foi realizada a titulação

utilizando 10 ml do hidróxido da incubação, 10 ml de  $\text{BaCl}_2$  0,05 mol  $\text{L}^{-1}$  e 3 gotas de fenolftaleína 1%, titulando com solução  $\text{HCl}$  0,25 mol  $\text{L}^{-1}$  (MENDONÇA; MATOS, 2017) (Figura 6). O quociente metabólico ( $q\text{CO}_2$ ), que mede perturbações no metabolismo microbiano, é medido pela relação entre  $\text{CO}_2$  e o carbono da biomassa microbiana. O quociente microbiano que mede a eficiência microbiana em degradar C foi calculado da relação entre o  $C_{\text{mic}}$  e o carbono do solo. O quociente de mineralização que estima a eficiência solo de degradar carbono com emissões de  $\text{CO}_2$ , foi calculado da relação entre a respiração basal do solo e o carbono orgânico (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

**Figura 6** - Análise de Carbono da Biomassa Microbiana e Respiração Basal do Solo em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.

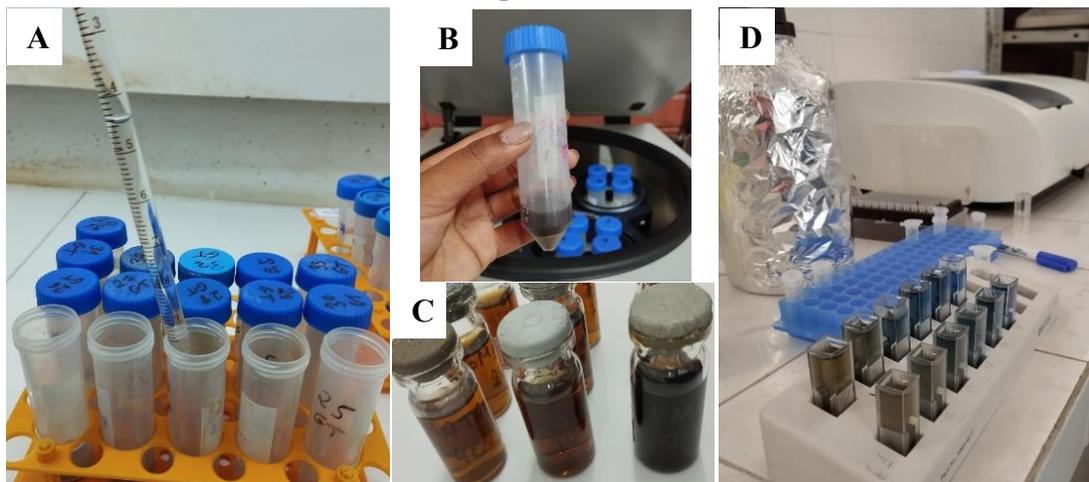


A= solução para ser titulada das amostras irradiadas e não irradiadas para análise de carbono da biomassa microbiana; B= solos incubados em frascos fechados contendo solução de hidróxido de sódio para captação de  $\text{CO}_2$ , para análise de respiração basal do solo. Fonte: autor.

### 3.7.2 *Quantificação da Glomalina e atividade enzimática*

Em cada amostra foi realizada a extração e determinação de glomalina facilmente extraível e total, seguindo o método de Bradford, (Wright; Upadhaya, 1996, 1998). As extrações foram feitas utilizando 1g de solo, e solução de citrato de sódio 20mM, com ajuste de pH (7 para facilmente extraível e 8 para total), e após agitação em Vortex, as amostras foram levadas a autoclave e, posteriormente, centrifugadas. Para a extração da Glomalina total, foram realizados 5 ciclos de extração e armazenamento. A determinação feita por colorimetria (Figura 7).

**Figura 7** - Glomalina facilmente extraível e total no solo em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.



A= adição de solução de citrato de sódio em tubos de centrifuga contendo as amostras de solo; B= amostras que já passaram pela autoclave sendo centrifugadas; C= amostras acondicionadas em vidros de penicilina; D= curva para leitura das amostras em espectrofotometria UV/VIS. Fonte: autor.

A atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase (ciclo do C) foi avaliada pesando inicialmente 1g de solo, adicionando solução tampão MUB (pH 6), penitrofenil- $\beta$ -D-glucopiranosídeo (50 mM), agitando em Vortex e incubando em banho maria a 37°C por 1 hora. Após o tempo decorrido, foram adicionadas as soluções de  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{NaOH}$  ambas a  $0,5\text{mol L}^{-1}$ , agitado em Vortex e filtrado; a Arilsulfatase (ciclo do S) foi avaliada usando 1g de solo, onde foram adicionados solução tampão acetato (pH 5,8) e solução de p-nitrofenil sulfato a 50 mM, os tubos foram agitados em Vortex e incubados em banho maria por 1 hora a 37°C, após esse período foram adicionadas as soluções de  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{NaOH}$  ambas a  $0,5\text{mol L}^{-1}$ , agitados em Vortex e filtrados; e fosfatase alcalina (ciclo do P) foi quantificada usando 1g de solo, adicionados solução tampão MUB (pH 11) e solução de p-nitrofenil fosfato  $0,05\text{mol L}^{-1}$ , os frascos foram agitados em Vortex e incubados em banho maria a 37°C por 1 hora, em seguida, adicionados solução de  $\text{CaCl}_2$  e  $\text{NaOH}$ , ambos a  $0,5\text{mol L}^{-1}$ , agitados em Vortex e filtrados (TABATABAI, 1994). Em todas as amostras, e as determinações foram feitas por colorimetria.

### 3.8 Análise estatística

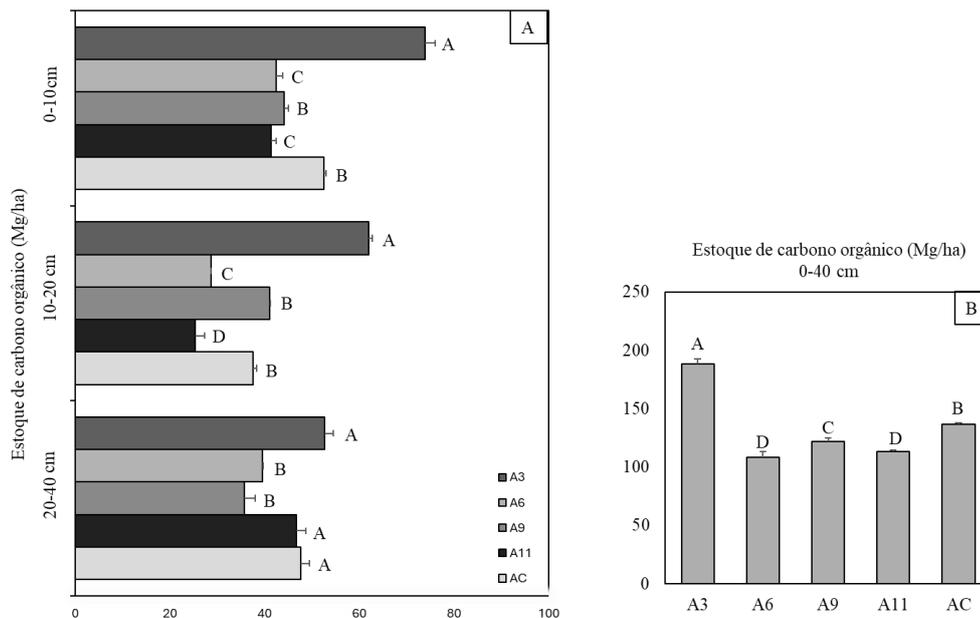
Os resultados foram submetidos à análise de variância utilizando o software SISVAR 5.0 (FERREIRA, 2010b), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. A análise multivariada de componentes principais (PCA) foi realizada utilizando o software R versão 4.4.3, os dados foram padronizados e a matriz de correlação foi utilizada para extração dos componentes principais. A significância das associações entre variáveis e componentes foi avaliada por meio de autovalores e da variância explicada por cada componente.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Estoque de carbono orgânico do solo

Na Figura 8A, na profundidade 0-10 cm, A3 e AC apresentaram os maiores estoques, sendo A3, 28,96% maior que AC, área de referência. Na profundidade 10-20 cm, A3 também apresenta os maiores valores dentre as amostras, com diferença percentual de 97,63% entre A3 e AC. Na profundidade 20-40, A3, AC e A11, não diferiram estatisticamente entre si, mas com relação a A6 e A9, A3 foi superior a A9 52,6%. No estoque acumulado entre as camadas 0-40, A3 apresenta novamente os maiores valores, com diferença percentual de 46,49% entre A3 e AC. Com relação ao estoque de carbono, na Figura 8B, evidencia-se A3 como o tratamento com maiores quantidades de estoque de carbono orgânico.

**Figura 8** - Estoque de carbono em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana. A= profundidades 0-10, 10-20, 20-40 cm; B= acumulado do perfil, 0-40 cm.

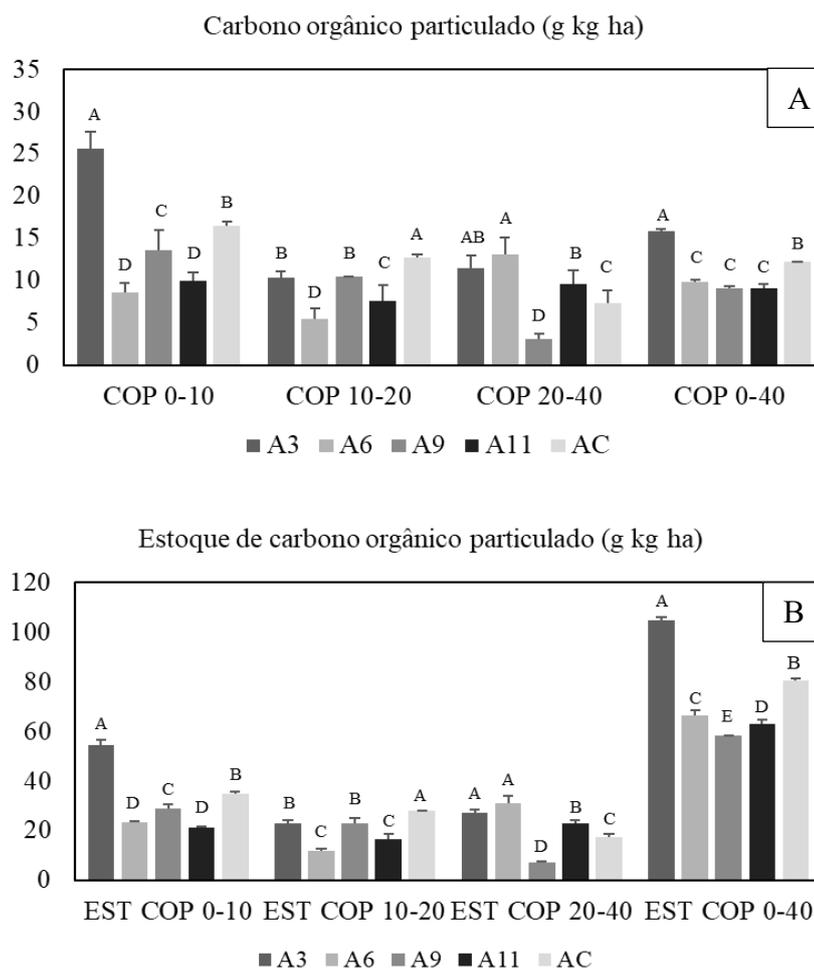
### 4.2 Estoque de carbono orgânico particulado no solo

Na camada 0-10 (Figura 9A), A3 teve valor 35,7% maior que AC e 60,8% maior que A11 nos estoques de COP. Também é possível observar a tendência de diminuição de COP em profundidade, da camada 0-10 para a camada 10-20, todos os tratamentos tiveram decréscimo.

Na camada 20-40, A6 apresenta o maior valor, sendo 336,67% maior que A9 e 77,03% maior que AC.

Na profundidade 0-10, pode-se confirmar que o tratamento A3 foi maior em 155,14% do que A11, pois se trata de uma área com menor quantidade de COP, e 55,56% de aumento com relação a área de referência, AC (Figura 9B).

**Figura 9** - Carbono orgânico particulado e Estoque de carbono orgânico particulado em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.

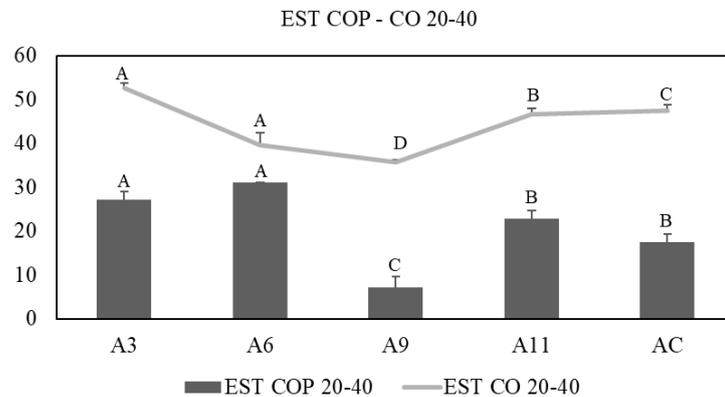


Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana. A=Carbono orgânico particulado; B= estoque de carbono orgânico particulado.

Na maior profundidade do perfil, o maior estoque foi em A3, porém A6 teve maior quantidade de carbono na forma particulada, 78,56% (Figura 10), proporção inferior as outras

profundidades, apresentando uma transferência de matéria orgânica mais lábil em profundidade.

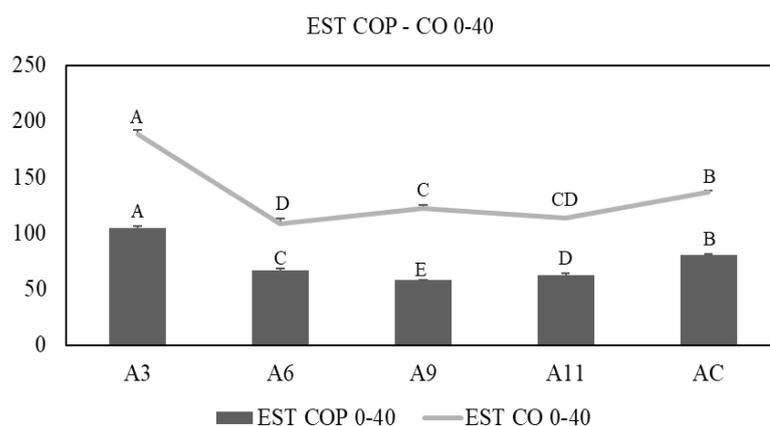
**Figura 10** - Valores de estoque de carbono orgânico e estoque de carbono orgânico particulado, na profundidade 20-40 cm, em cultivo de eucalipto.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana.

No acumulado do perfil, A3 teve maior quantidade de carbono orgânico na fração mais lábil com relação aos demais, aproximadamente 64,41% do carbono total, estava na forma de carbono orgânico particulado (Figura 11).

**Figura 11** - Valores de estoque de carbono orgânico e estoque de carbono orgânico particulado, na profundidade 0-40 cm, em cultivo de eucalipto.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana.

### 4.3 Distribuição proporcional de macroagregados

Na Tabela 4, que indica a massa proporcional dos agregados, na profundidade 0-10 cm, pode-se observar um aumento de 291,93% da quantidade de macroagregados extragrande entre AC e A6, a qual demonstrou o melhor índice entre todos os tratamentos. Para os macroagregados pequenos é possível visualizar o contrário, a diferença percentual de 311,93% entre a A6 anos e AC.

**Tabela 4** - Médias do peso proporcional de agregados (g) em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL

Áreas	Macroagregado Pequeno	Macroagregado Grande	Macroagregado Extragrande
Profundidade 0-10 cm			
A3	6,7 <sup>±1,6</sup> D	14,7 <sup>±0,8</sup> B	54,3 <sup>±3,0</sup> B
A6	10,9 <sup>±2,4</sup> BC	10,6 <sup>±1,0</sup> C	63,1 <sup>±2,5</sup> A
A9	13,7 <sup>±0,3</sup> B	13,9 <sup>±0,5</sup> B	49,0 <sup>±1,9</sup> B
A11	7,9 <sup>±0,5</sup> D	20,6 <sup>±1,3</sup> A	54,4 <sup>±2,1</sup> B
AC	44,9 <sup>±3,0</sup> A	12,5 <sup>±1,1</sup> BC	16,1 <sup>±2,7</sup> C
Profundidade 10-20 cm			
A3	14,7 <sup>±3,0</sup> D	20,6 <sup>±0,5</sup> A	44,2 <sup>±2,3</sup> A
A6	17,8 <sup>±1,9</sup> CD	12,5 <sup>±0,8</sup> B	49,0 <sup>±1,7</sup> A
A9	21,3 <sup>±0,8</sup> C	21,8 <sup>±0,3</sup> A	31,2 <sup>±1,5</sup> B
A11	27,7 <sup>±0,1</sup> B	20,1 <sup>±2,7</sup> A	25,9 <sup>±2,1</sup> B
AC	39,9 <sup>±2,1</sup> A	14,4 <sup>±1,8</sup> B	14,8 <sup>±3,7</sup> C
Profundidade 20-40 cm			
A3	9,0 <sup>±1,2</sup> C	12,8 <sup>±2,6</sup> AB	56,5 <sup>±3,7</sup> A
A6	31,1 <sup>±1,3</sup> B	12,3 <sup>±1,9</sup> AB	30,5 <sup>±0,8</sup> B
A9	34,4 <sup>±3,3</sup> B	7,4 <sup>±0,2</sup> C	23,8 <sup>±0,5</sup> BC
A11	42,4 <sup>±3,6</sup> A	15,0 <sup>±0,3</sup> A	18,9 <sup>±1,9</sup> C
AC	40,8 <sup>±2,9</sup> A	10,4 <sup>±1,7</sup> BC	6,9 <sup>±3,3</sup> D
Profundidade 0-40 cm			
A3	10,1 <sup>±4,1</sup> D	16,0 <sup>±4,1</sup> A	51,7 <sup>±6,6</sup> A
A6	20,0 <sup>±10,2</sup> C	11,8 <sup>±1,1</sup> A	47,6 <sup>±16,3</sup> B
A9	23,1 <sup>±10,5</sup> BC	14,3 <sup>±7,2</sup> A	34,7 <sup>±13,0</sup> C
A11	26,0 <sup>±17,3</sup> B	18,6 <sup>±3,1</sup> A	33,1 <sup>±18,8</sup> C
AC	41,9 <sup>±2,7</sup> A	12,5 <sup>±2,0</sup> A	12,3 <sup>±4,9</sup> D

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana.

Ainda na Tabela 3, as áreas A3 e A6 aparecem com a maior quantidade de macroagregados extragrande, na profundidade 10-20 cm. O contrário pode ser observado na AC, que teve a menor quantidade de macroagregados extragrandes e maior quantidade de macroagregados pequenos. Na profundidade 20-40 cm, podemos verificar na tabela 3, que A3 apresentou a maior quantidade de macroagregados, enquanto AC teve a menor quantidade

representando uma diferença percentual de 718,8% entre as áreas. Na mesma profundidade, nos macroagregados pequenos a maior quantidade foi visualizada em AC.

#### 4.4 Estoque de carbono em nível de macroagregados

Na profundidade 0-10 (Tabela 4), A3 apresentou o maior teor de carbono orgânico no macroagregado extragrande com diferença percentual de 237% para a área de referência AC. No macroagregado grande A11 apresentou 112% a mais de carbono que A6, o tratamento com menor teor, porém, sem diferença estatística para os demais tratamentos. No macroagregado pequeno, AC possui o maior estoque com diferença de 725% para o menor estoque, A9. Em A3 o estoque de carbono no macroagregado extragrande representa 71,8% de todo o carbono em macroagregados, e em AC o macroagregado pequeno carrega 44,5% do todo.

**Tabela 5** - Estoque de carbono orgânico em agregado, em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.

Áreas	Macroagregado Pequeno (Mg ha <sup>-1</sup> )	Macroagregado Grande (Mg ha <sup>-1</sup> )	Macroagregado Extragrande (Mg ha <sup>-1</sup> )
Profundidade 0 – 10 cm			
A3	4,9 ± <sup>0,3</sup> B	15,1 ± <sup>2,0</sup> A	50,9 ± <sup>1,4</sup> A
A6	4,4 ± <sup>0,7</sup> B	7,3 ± <sup>1,1</sup> B	23,2 ± <sup>1,8</sup> D
A9	2,8 ± <sup>1,2</sup> B	13,0 ± <sup>0,4</sup> A	39,7 ± <sup>0,3</sup> B
A11	3,1 ± <sup>0,3</sup> B	15,5 ± <sup>3,0</sup> A	28,4 ± <sup>1,5</sup> C
AC	23,1 ± <sup>1,3</sup> A	13,7 ± <sup>1,2</sup> A	15,1 ± <sup>0,9</sup> E
Profundidade 10 – 20 cm			
A3	10,0 ± <sup>2,6</sup> B	18,9 ± <sup>1,5</sup> A	33,8 ± <sup>2,7</sup> A
A6	4,5 ± <sup>0,2</sup> C	6,5 ± <sup>0,1</sup> C	14,7 ± <sup>0,7</sup> B
A9	8,4 ± <sup>1,4</sup> B	13,1 ± <sup>1,9</sup> B	14,4 ± <sup>1,9</sup> B
A11	8,8 ± <sup>0,1</sup> B	7,6 ± <sup>0,0</sup> C	10,2 ± <sup>0,7</sup> C
AC	24,8 ± <sup>1,6</sup> A	4,9 ± <sup>0,7</sup> C	8,7 ± <sup>0,1</sup> C
Profundidade 20 – 40 cm			
A3	6,1 ± <sup>1,8</sup> C	11,6 ± <sup>1,1</sup> B	35,7 ± <sup>1,7</sup> A
A6	10,8 ± <sup>0,2</sup> B	12,0 ± <sup>0,9</sup> B	18,3 ± <sup>0,4</sup> B
A9	23,2 ± <sup>0,2</sup> A	7,2 ± <sup>0,2</sup> C	8,8 ± <sup>0,9</sup> C
A11	24,2 ± <sup>2,4</sup> A	15,5 ± <sup>1,7</sup> A	16,9 ± <sup>2,3</sup> B
AC	22,6 ± <sup>0,3</sup> A	14,1 ± <sup>0,0</sup> AB	13,8 ± <sup>1,4</sup> B
Profundidade 0-40 cm			
A3	18,7 ± <sup>0,3</sup> C	47,9 ± <sup>1,2</sup> A	122,5 ± <sup>0,3</sup> A
A6	19,7 ± <sup>0,8</sup> C	25,3 ± <sup>1,4</sup> D	56,2 ± <sup>2,6</sup> C
A9	34,5 ± <sup>1,4</sup> B	32,3 ± <sup>0,7</sup> C	62,9 ± <sup>1,7</sup> B
A11	36,1 ± <sup>2,1</sup> B	38,6 ± <sup>1,3</sup> B	55,5 ± <sup>2,7</sup> C
AC	70,5 ± <sup>1,4</sup> A	32,7 ± <sup>1,0</sup> C	37,6 ± <sup>2,2</sup> D

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana.

Na profundidade 10-20, ainda na tabela 4, no macroagregado extragrande, A3 também possui o maior teor, 288,51% a mais de estoque de carbono, que AC, que apresenta o menor valor. Na mesma profundidade, no macroagregado grande, a diferença entre o melhor tratamento A3 e o pior tratamento, AC, foi de 258,71%. E no macroagregado pequeno, AC teve destaque com 451,11% a mais de estoque de carbono, que A6, tratamento com o menor valor. Nesta profundidade, o macroagregado extragrande de A3 representou 53,9% do total de carbono nos macroagregados e AC teve 64,6% do total nos macroagregados pequenos.

Na profundidade 20-40, no macroagregado extragrande A3 apresentou estoque superior a AC 158,7%. Nos macroagregados grande e pequeno, A11 apresentou os maiores valores. Na maior profundidade, A3 concentrou no macroagregado extragrande 66,9% do estoque total de carbono e AC 44,8% no macroagregado pequeno.

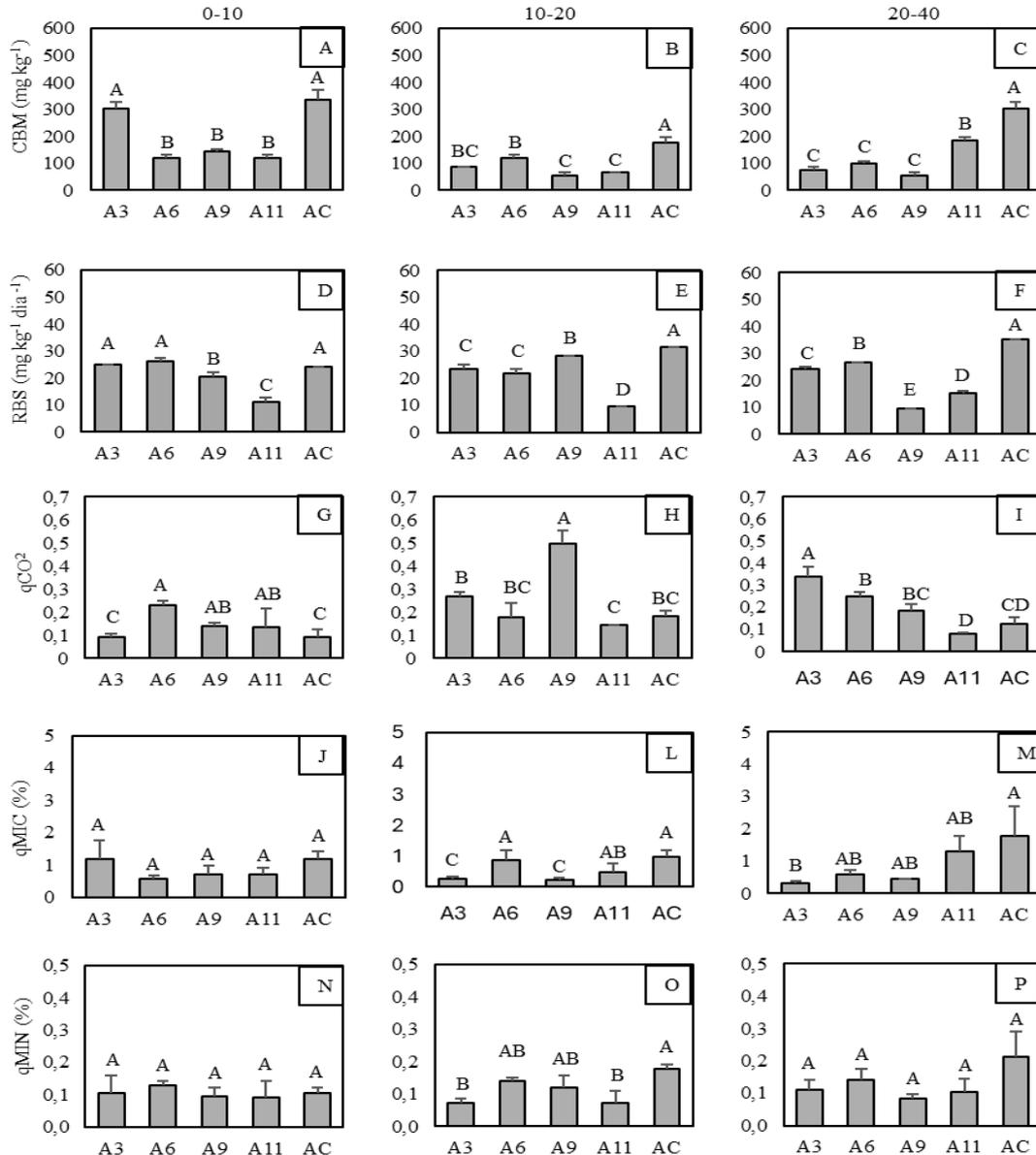
No acumulado do perfil, no macroagregado extragrande A3 se destaca com aumento de 225,80% no estoque de carbono em relação a AC. E no macroagregado pequeno a situação se inverte, onde AC é 277,01% superior a A3. Em A3, o macroagregado extragrande acumulou 64,8% de todo o carbono presente nos macroagregados e AC concentrou 50,1% no macroagregado pequeno. É possível observar que a diferença de teor entre agregados diminui em função do tempo, A11 apresenta menor concentração de estoque em apenas um agregado, com 42,2% no macroagregado extragrande.

#### **4.5 C biomassa, respiração basal, quociente metabólico, quociente microbiano e quociente de mineralização**

Para o carbono da biomassa microbiana, AC apresentou os maiores valores em todas as profundidades (Figura 12A, 12B e 12C), o que também pode ser percebido na respiração basal do solo (Figura 12 D, 12E e 12F). Na Figura 12C, AC foi superior 573,7% com relação a A9, tratamento com menor quantidade de  $C_{mic}$ . Ainda na Figura 12, com relação a respiração basal do solo, temos novamente maior diferença entre AC e A9, sendo AC superior 274,9% com relação a A9.

Fazendo uso dos resultados destas duas análises, temos os quocientes metabólico, microbiano e de mineralização. Na Figura 12G, H e I, pode-se observar os menores valores para A3, A11 e A11 respectivamente, indicando menor quociente metabólico nos tratamentos indicados. Com destaque para a diferença percentual de 245% existente entre A11 e A9. Na Figura 12J, o quociente microbiano apresentou eficiência nas três profundidades. O quociente de mineralização, só apresenta diferença estatística na profundidade 10-20.

**Figura 12** - Carbono da biomassa microbiana, respiração basal, quociente metabólico, quociente microbiano e quociente de mineralização, em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.

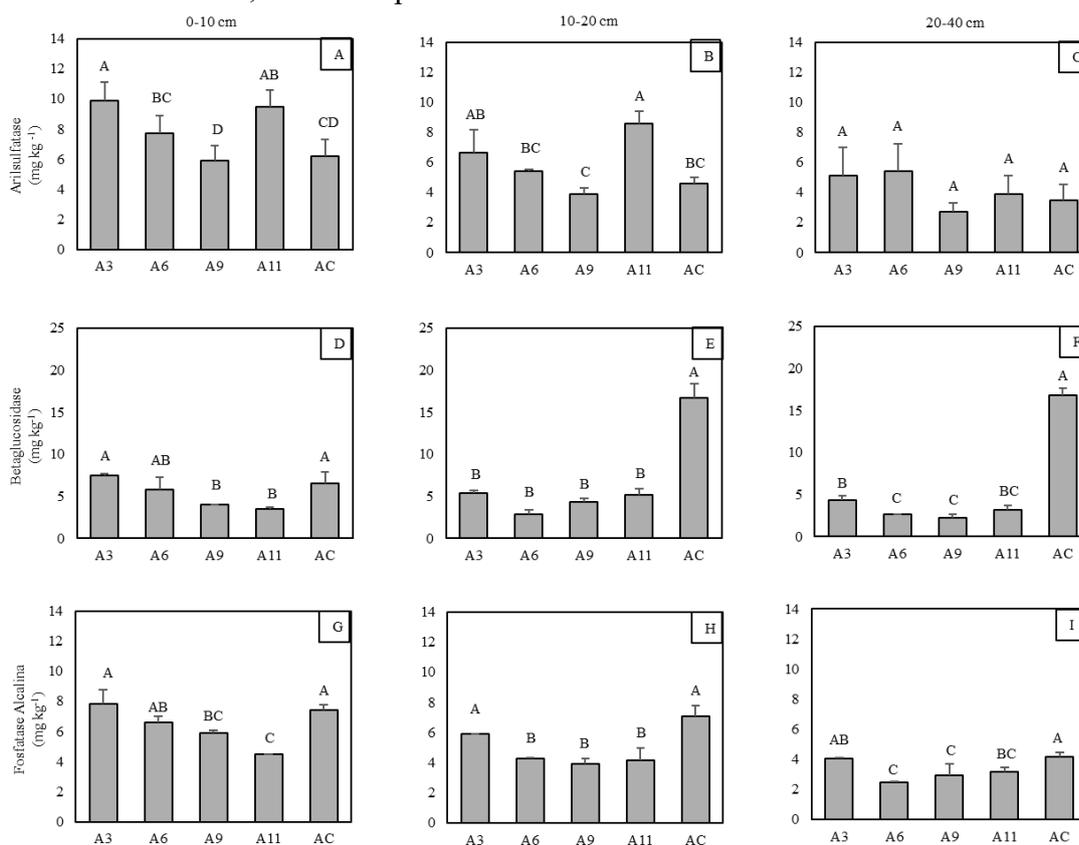


Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana. A= carbono da biomassa microbiana na profundidade 0-10; B= carbono da biomassa microbiana na profundidade 10-20; C= carbono da biomassa microbiana na profundidade 20-40; D= respiração basal do solo na profundidade 0-10; E= respiração basal do solo na profundidade 10-20; F= respiração basal do solo na profundidade 20-40; G= quociente metabólico na profundidade 0-10; H= quociente metabólico na profundidade 10-20; I= quociente metabólico na profundidade 20-40; J= quociente microbiano na profundidade 0-10; L= quociente microbiano na profundidade 10-20; M= quociente microbiano na profundidade 20-40; N= quociente de mineralização na profundidade 0-10; O= quociente de mineralização na profundidade 10-20; P= quociente de mineralização na profundidade 20-40.

#### 4.6 Atividade enzimática e quantificação de glomalina

Com relação a atividade enzimática, foram quantificadas as enzimas arilsulfatase, betaglicosidase e fosfatase alcalina. Na Figura 13A, A3 apresenta os maiores valores, com diferença percentual de 37,37% com relação a área de referência (AC). Na Figura 13B, A11 apresentou maiores valores, com diferença de 46,51% para AC.

**Figura 12** - Atividade enzimática em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.

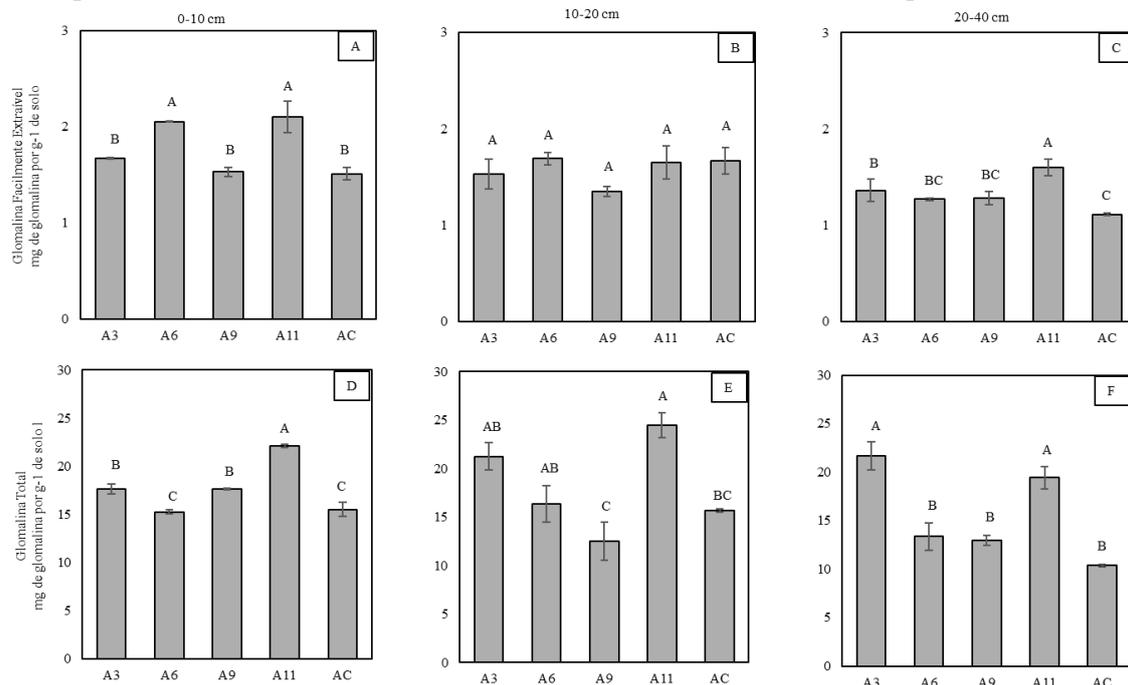


Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana. A= atividade da enzima Arilsulfatase na profundidade 0-10; B= atividade da enzima Arilsulfatase na profundidade 10-20; C= atividade da enzima Arilsulfatase na profundidade 20-40; ; D= atividade da enzima Betaglicosidase na profundidade 0-10; E= atividade da enzima Betaglicosidase na profundidade 10-20; F= atividade da enzima Betaglicosidase na profundidade 20-40; G= atividade da enzima Fosfatase Alcalina na profundidade 0-10; H= atividade da enzima Fosfatase Alcalina na profundidade 10-20; I= atividade da enzima Fosfatase Alcalina na profundidade 20-40.

A enzima betaglicosidase, apresentou em todas as camadas maior atividade em AC, apenas na camada 0-10 (D) sem diferença estatística para A3 e A6. Na Figura 13 E, a camada AC é superior em 643,13% ao tratamento com menor atividade da enzima, A9.

Com relação a fosfatase alcalina, a maior atividade da enzima foi visualizada em A3 e AC, em todas as profundidades estudadas.

**Figura 14** - Glomalina facilmente extraível e total em solo argiloso, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL.



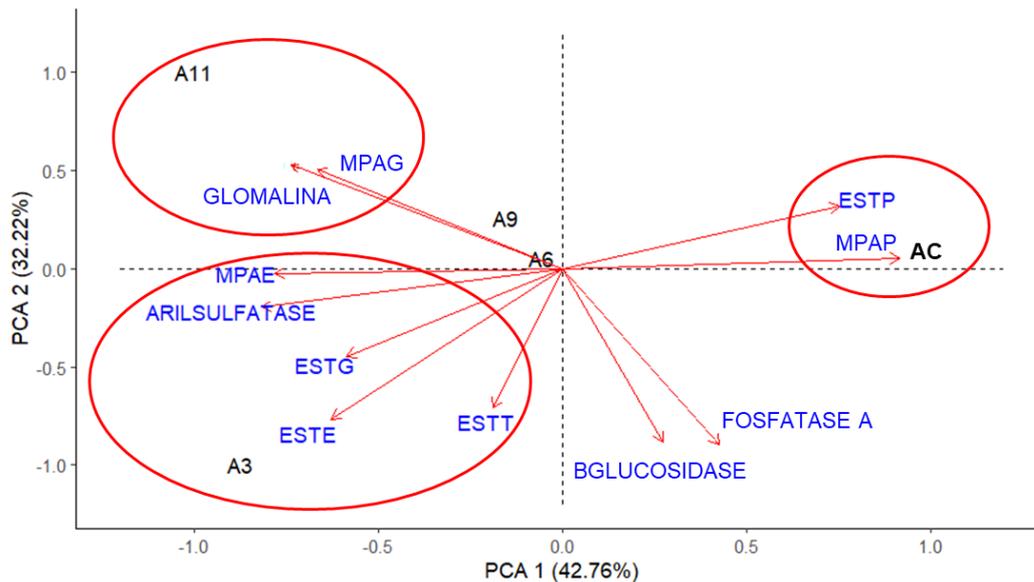
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5%. A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana. A= Glomalina facilmente extraível na profundidade 0-10; B= Glomalina facilmente extraível na profundidade 10-20; C= Glomalina facilmente extraível na profundidade 20-40; D= Glomalina total na profundidade 0-10; E= Glomalina total na profundidade 10-20; F= Glomalina total na profundidade 20-40.

Na Figura 14A, a glomalina facilmente extraível teve os maiores valores em A6 e A11, sendo A11 com diferença percentual de 39,07% com relação a AC. Na Figura 14B, não foi observada diferença estatística entre as áreas estudadas. Na Figura 14C, A11 novamente se comporta como o melhor tratamento, com diferença de 44,14% com relação a área que apresentou menor valor, AC.

Com relação a glomalina total, A11 demonstrou ser o melhor tratamento em todas as profundidades analisadas. A diferença de aumento entre melhor tratamento A11 e os que obteve menores valores, AC, foi de 42,44% na profundidade 0-10 (Figura 14D), 55,94% na profundidade 10-20 (Figura 14E) e 87,61% na profundidade 20-40 (Figura 14F).

Na Figura 15, a ACP (análise de componentes principais), o eixo 1 explica 42,76% dos dados e o eixo 2 explica 32,22% dos dados, e juntos resumem mais da metade das informações presentes no conjunto principal.

**Figura 13** - Análise de componentes principais com as variáveis mais representativas, em áreas de plantio de eucalipto e área de cana como referência, no município de Maceió-AL



A3= área de plantio de eucalipto com 3 anos; A6= área de plantio de eucalipto com 6 anos; A9= área de plantio de eucalipto com 9 anos; A11= área de plantio de eucalipto com 9 anos; AC= área de plantio de cana. MPAE= massa proporcional de agregados em macroagregados extragrandes; MPAG= massa proporcional de agregados em macroagregados grandes; MPAP= massa proporcional de agregados em macroagregados pequenos; ESTT= estoque de carbono total; ESTE= estoque de carbono em macroagregado extragrande; ESTG= estoque de carbono em macroagregado grande; ESTP= estoque de carbono em macroagregado pequeno; GLOMALINA= glomalina total no solo; ARILSULFATASE= atividade da enzima Arilsulfatase; BGLUCOSIDASE= atividade da enzima betaglicosidase; FOSFATASE A= atividade da enzima fosfatase alcalina. (Fonte: elaborado pela autora no programa R Statistic a partir da coleta de dados experimentais).

O alongamento das setas indica que o estoque de carbono no agregado pequeno foi a variável que teve maior influência nos dados e contribuiu mais para a variabilidade. A proximidade das setas que representam a betaglicosidase e fosfatase alcalina no biplot, sugere uma forte correlação positiva entre estas variáveis, indicando comportamento similar nos dados, assim como, em direção oposta, a massa proporcional de agregados grande se relaciona com a glomalina total.

A proximidade com as setas que representam estoque de carbono no macroagregado extragrande, estoque de carbono no macroagregado grande e estoque de carbono total, sugerem que A3 é fortemente influenciada por estas variáveis, a posição desta amostra no eixo III, aponta uma maior influência das variáveis neste componente. A6 e A9 estão perto da origem, o que indica valores baixos em ambos os eixos. A sua posição no gráfico pode ser interpretada como uma média, um ponto de equilíbrio no conjunto de dados.

A11 parece altamente influenciada pela massa proporcional de agregados grande e pela glomalina e a sua posição isolada das outras amostras, demonstra possuir características específicas das demais áreas.

A proximidade de AC com as variáveis estoque de carbono em macroagregado pequeno e massa proporcional de agregado do macroagregado pequeno, sugere uma correlação positiva entre estas variáveis, o oposto ocorre com a betaglucosidase e a fosfatase alcalina, que sugere correlação negativa. A distância de AC com relação ao eixo das duas componentes principais, indica forte influência das variáveis com relação a amostra.

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 O eucalipto influenciou positivamente na dinâmica do carbono nas áreas degradadas

O maior aporte de carbono em A3 nas três profundidades e obviamente no acumulado do perfil, demonstra que o plantio do eucalipto adicionou matéria orgânica ao solo. Com apenas 3 anos de plantio já houve um aumento de quase 50%, com relação a área de referência com plantio de cana-de-açúcar. Mesmo a área de plantio de cana-de-açúcar estando em abandono e com claros sinais de processo de regeneração, o eucalipto demonstrou acréscimo no aporte de carbono (MORAES et al., 2021). Tanto a área de plantio de cana-de-açúcar, quanto a área de três anos de plantio de eucalipto, apresentam um solo com maior teor de argila que as demais áreas, o que influenciou nos resultados de teor de carbono orgânico total e corrobora a afirmação de que com as mesmas condições de solo, o plantio de três anos apresentou maior acréscimo de matéria orgânica (BETTIOL et al., 2023).

Árvores crescem inicialmente em altura, visando alcançar mais luz solar e expandir seu sistema radicular, devido a esse fator, os primeiros anos de uma árvore são os que mais concentram adição de matéria orgânica, devido a senescência mais intensa das folhas e consequente formação de serrapilheira, o que justifica os maiores valores de estoque de carbono nos primeiros anos do plantio de eucalipto. Nos anos seguintes a árvore se concentra na expansão do material lenhoso, o que implica em concentrar mais carbono no tronco e nos galhos, diminuindo a produção de biomassa nas folhas, o que pode justificar os menores valores de carbono nos anos seguintes de crescimento (LIGOT et al., 2018). É possível também justificar a maior incidência de luz solar nos primeiros anos de plantio, devido a menor proporção de copas das árvores, o que acelera a decomposição da matéria orgânica devido a fotodegradação (PIERISTÈ et al., 2020). Outro fator que pode ter influenciado o estoque de carbono em menor quantidade nos anos subsequentes, é que os plantios não têm revolvimento do solo ou remoção de plantas invasoras, nos plantios com idade mais avançada, outras espécies que crescem nas entrelinhas do plantio, podem estar sequestrando carbono, diminuindo assim a quantidade de carbono no solo. Em ambos os casos, seria necessário a quantificação de carbono retido nas plantas, para melhor compreensão da dinâmica do sequestro de carbono (TAMURA; THARAYIL, 2014).

Com relação ao estoque de carbono no agregado, a menor expressividade do carbono orgânico no macroagregado extragrande em AC está ligado a menor quantidade de macroagregados extragrandes nesta área, o que pode ser justificado pelo manejo convencional que foi realizado por muitos anos na área e mesmo estando em estado de abandono por mais de

10 anos, apresenta sinais de recuperação, porém com grande diferença para as áreas de plantio de eucalipto, as quais concentram mais carbono nos macroagregados maiores, assim como observado por Jourgholami et al. (2019), que verificaram que propriedades físicas do solo não sofreram alteração mesmo após 25 anos de regeneração livre em áreas antes degradadas.

A tendência de acúmulo de carbono nos macroagregados extragrandes nas áreas de plantio de eucalipto se conserva ao longo do perfil, seguindo em profundidade, o que irá refletir no estoque do perfil completo, onde A3 acumulou 34,6% a mais de carbono orgânico nos agregados que AC. É importante também observar que A11 apresentou a distribuição mais igualitária entre as diferentes frações de agregados, o fato de o plantio com maior tempo ter maior quantidade de macroagregados grandes, demonstra essa tendência de equilíbrio encontrada em florestas naturais. As raízes longas e a ausência de distúrbios no solo permitem acúmulo carbono orgânico em profundidades maiores, semelhante ao que ocorre na floresta nativa (Braga, 2022).

Com relação ao carbono orgânico particulado a maior quantidade estar presente em A3, corrobora a afirmação de que nos primeiros anos de plantio ocorre maior deposição de matéria orgânica e identifica que a fração leve está mais presente, fração esta que é composta por resíduos orgânicos em diferentes fases de decomposição, com um período de permanência no solo que pode variar entre 1 e 5 anos. Esse processo é amplamente condicionado pela natureza e pelo volume dos materiais adicionados ao solo (KOTROCZÓ et al., 2020). O aumento do carbono orgânico particulado em profundidade no plantio de 11 anos, indica que a proteção que os macroagregados estão propiciando na matéria orgânica mais lábil e que está sendo carregada para toda a extensão do perfil.

## **5.2 A distribuição de macroagregados do solo é influenciada pelo tempo de cultivo do eucalipto.**

O aumento na massa proporcional de agregados de A6 com relação a AC é um importante indicativo, que sugere melhoria na estrutura do solo na profundidade 0-10, ao longo do tempo, sob as condições de plantio locais. O que pode ser atribuído a presença das raízes e a maior ação biológica decorrente de práticas agrícolas que favorecem a agregação (WANG et al., 2022).

O plantio do eucalipto favoreceu a formação de macroagregados extragrandes, o que pode ser devido a profundidade do sistema radicular do eucalipto, que melhora a agregação do solo,

criando porosidade estrutural ao exsudar compostos orgânicos, promovendo estabilidade de agregados ao longo do tempo (WANG et al., 2023).

Na profundidade de 20 a 40 cm, A11 apresenta maior quantidade de macroagregados extragrandes devido ao desenvolvimento mais avançado do ecossistema, porque, a contínua e eficiente interação entre plantas, microrganismos e processos de decomposição torna esses ambientes equilibrados (BALDRIAN, 2017). Essas áreas exibem um maior acúmulo de matéria orgânica e uma estrutura radicular mais complexa, o que favorece a atividade microbiana em profundidade. Isso resulta na formação de uma camada rica em húmus, com raízes que penetram mais profundamente no solo (ZHAO et al., 2024). Em Voilgtlaender et al. (2012) o estudo apontou que os estoques de carbono e nitrogênio em solos sob monocultivo de eucalipto e em rotação com acácia, foi possível observar que a rotação com acácia aumentou os estoques de carbono e nitrogênio, sugerindo benefícios para a qualidade do solo.

O fato de, com apenas 3 anos de conversão de áreas de plantio de cana-de-açúcar para eucalipto, o solo já demonstrar melhor agregação que a área de plantio de cana convencional, também foi observado por Medeiro et al. (2021), que relacionou o melhor desenvolvimento do solo com a mudança no manejo, diminuindo o revolvimento do solo e entrada de resíduos constantes devido ao crescimento e desenvolvimento das árvores.

Como observado por Medeiros et al. (2018), há predominância de macroagregados nas áreas de plantio de eucalipto que foram convertidas de áreas de plantio cana, neste trabalho também observamos esta tendência, onde os plantios de cana tem maiores valores tanto de massa proporcional de agregados pequenos, quanto de estoque de agregados pequenos, indicando que por mais que venha a se tratar de uma área de plantio não convencional (devido ao fato de a empresa estar convertendo todas as suas áreas de plantio em eucalipto, as poucas áreas de plantio de cana restantes estão em processo de abandono), a estruturação do solo não ocorreu como nas áreas de plantio de eucalipto.

### **5.3 Atributos microbiológicos do solo são influenciados pelo tempo do cultivo do eucalipto.**

As áreas de eucalipto têm adubação, fosfatada e calagem, em cova e cobertura até um ano de plantio, o que pode ter influenciado maiores teores de biomassa microbiana e respiração basal do solo na área A3 (WANG et al., 2021). Outro fator que explicaria a área de três anos apresentar os melhores índices microbiológicos, é o fato de haver maior aporte de matéria orgânica nos primeiros anos de plantio do eucalipto, pois é o período em que a árvore tem maior produção foliar, com melhor fechamento de copa, produzindo o ambiente adequado ao rápido

desenvolvimento de microrganismo, pois estaria lhe proporcionando maior quantidade de alimento e uma faixa de temperatura ideal para seu crescimento e sobrevivência (LI et al., 2018; ZHONG et al., 2022). AC se encontrava em pousio há mais de dez anos, o que possivelmente diminuiu o estresse nestas áreas, devido a menor revolvimento do solo, e inclusão de várias espécies invasoras, além do cultivo de cana, proporcionando assim, um ambiente adequado ao aumento da comunidade microbiana (LI et al., 2018).

Os menores valores de quociente metabólico observados em A11, podem ser interpretados como um indicativo de menor perturbação no metabolismo microbiano do solo nessas áreas. Valores mais baixos de  $qCO_2$  sugerem que os microrganismos estão utilizando carbono de forma mais efetiva, liberando menos  $CO_2$  por unidade de biomassa, visto que, o quociente metabólico mede a relação entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana (OLIVEIRA et al., 2022). Todas as áreas mostraram a mesma eficiência na conversão do carbono em formas minerais, o que sugere que as áreas com menor abundância de microrganismos tiveram estabilidade funcional da microbiota do solo, uma resiliência do sistema microbiano (WANG et al., 2023). Áreas de floresta tendem a ser mais ácidas, devido, principalmente, aos ácidos orgânicos liberados durante a decomposição da serrapilheira, mas também devido a liberação de taninos, fenóis e outros compostos fenólicos, esta afirmação pode justificar o menor valor de quociente microbiano nas maiores idades de plantio, pois o pH mais baixos tende a inibir o desenvolvimento da microbiota do solo (SOUZA et al., 2021).

#### **5.4 Relação entre distribuição proporcional de agregados e glomalina**

A glomalina é uma glicoproteína produzida por fungos micorrízicos arbusculares e está diretamente ligada a estabilidade de agregados e a retenção de carbono no solo (SINGH, 2013). Em áreas de plantio de eucalipto, que tem manejos a longo prazo, o maior teor de glomalina pode estar ligado ao ambiente mais estável, com aporte contínuo de matéria orgânica (LI et al., 2020; CERNY et al., 2024). A diminuição das áreas de cana-de-açúcar, indicam que o manejo intensivo diminui a ação de microrganismos, diminuindo assim a atividade de fungos micorrízicos e, conseqüentemente a produção de glomalina,

Na figura 14, a relação entre a glomalina e a massa proporcional de macroagregados grandes, pode indicar exatamente esta estabilidade que está se desenvolvendo nos plantios. O processo de regeneração de uma área antes degradada é longo e gradual, podendo levar décadas para voltar ao estado de equilíbrio original (ZHENG FU et al., 2017), o maior teor de glomalina

no macroagregado de tamanho intermediário, pode indicar, que esse processo de regeneração está em desenvolvimento.

## **6 CONCLUSÕES**

Em três anos de plantio de eucalipto houve aumento no estoque de carbono no solo anteriormente degradado.

A maior quantidade de macroagregados extragrandes foi observado na camada mais superficial com seis anos de plantio de eucalipto, o que indica uma melhora na estrutura do solo ao longo do tempo.

A maior quantidade de macroagregados grandes com onze anos de cultivo de eucalipto, mostra uma tendência na estabilização dos solos e camada subsuperficial. Além disso, não há indicativo de estresse por parte da biomassa microbiana nesses solos.

A correlação entre a glomalina total e a massa proporcional de macroagregados grandes na área de 11 anos de plantio, indica que uma tendência de regeneração dos solos, os quais podem estocar mais C ao longo dos próximos anos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, V. D. S. S. D, MONTEIRO, K. M. S., SOUSA, G. O., DAMASCENA, J. F., PEREIRA, J. A., & DOS SANTOS MORAES, W. Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e318101119604-e318101119604, 2021.
- ANDERSON, T. & DOMSCH, KH. **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.
- AN SHAOSHAN, A. S., DARBOUX, F., & CHENG MAN, C. M. (2013). Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). **Geoderma**, v 209, p. 75-85, 2013.
- BABUR, E., KARA, O., FATHI, R. A., SUSAM, Y. E., RIAZ, M., ARIF, M., & AKHTAR, K. Wattle fencing improved soil aggregate stability, organic carbon stocks and biochemical quality by restoring highly eroded mountain region soil. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 112489, 2021.
- BAI, Y., Zhou, Y., & He, H. Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China. **Geoderma**, v. 376, p. 114548, 2020.
- BALDRIAN, P. Microbial activity and the dynamics of ecosystem processes in forest soils. **Current opinion in microbiology**, v. 37, p. 128-134, 2017.
- BARROS, A. H. C., de ARAUJO FILHO, J. C., da SILVA, A. B., SANTIAGO, G. A. C., & Santiago, G. A. C. **Climatologia do estado de Alagoas**. EMBRAPA, 2012.
- BEHLING, M., MARTÍNEZ, G. B., SILVA, A. R., DE OLIVEIRA, T. K., & CIPRIANI, H. N. **O eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na Amazônia**. 2021.
- BERTOL, I.; MARIA, I.C.; SOUZA, L.S. (Orgs.). Manejo e Conservação do Solo e da Água. 1. ed. **Viçosa: Lis Gráfia e Editora Ltda**, 2019. v. 1. 1355p.
- BETTIOL, W., SILVA, C. A., cerri, C. E. P., MARTIN NETO, L., DE ANDRADE, C. A., & LADISLAU MARTIN NETO, C. N. P. D. I. A. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. **EMBRAPA**, 2023.
- BŁOŃSKA, E., PIASZCZYK, W., STASZEL, K., & LASOTA, J. Enzymatic activity of soils and soil organic matter stabilization as an effect of components released from the decomposition of litter. **Applied Soil Ecology**, v. 157, p. 103723, 2021.
- BRADY, N. C. & WEIL, R. R. **Elements of the Nature and Properties of Soils**. New York, Ed. Prentice Hall, (13 Ed), 2010.
- BRAINER, M S C P. **Silvicultura**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.154, fev.2021. (Caderno Setorial ETENE).
- BRIEDIS, C., Sa, J.C.d.M., CAIRES, E.F., NAVARRO, J.d.F., INAGAKI, T.M., BOER, A., NETO, C.Q., FERREIRA, A.d.O., CANALLI, L.B., SANTOS, J.B.d. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma** 170, 80-88, 2012.

- CAVALLI, J. P., REICHERT, J. M., RODRIGUES, M. F., & DE ARAÚJO, E. F. Composition and functional soil properties of Arenosols and Acrisols: Effects on eucalyptus growth and productivity. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104439, 2020.
- CAVALCANTI, R. Q., ROLIM, M. M., de LIMA, R. P., TAVARES, U. E., PEDROSA, E. M., & CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020.
- CHAER, G. M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1381-1396, 2007.
- CASTRO FILHO, C., LOURENÇO, A., GUIMARÃES, M.d.F., FONSECA, I. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research** 65, 45-51, 2002.
- ČERNÝ, J., BALÍK, J., SURAN, P., SEDLÁŘ, O., PROCHÁZKOVÁ, S., & KULHÁNEK, M. The Content of Soil Glomalin Concerning Selected Indicators of Soil Fertility. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1731, 2024.
- CUNHA NETO, F. V. D., PEREIRA, M. G., LELES, P. S. D. S., & ABEL, E. L. D. S. Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba-MG. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 13-24, 2018.
- GABRIEL, V. A., VASCONCELOS, A. A., DE LIMA, E. F., CASSOLA, H., BARRETTO, K. D., & DE BRITO, M. C. A importância das plantações de eucalipto na conservação da biodiversidade. **Pesquisa florestal brasileira**, v. 33, n. 74, p. 203-213, 2013.
- LIMA, R. P., ROLIM, M. M., TOLEDO, M. P., TORMENA, C. A., DA SILVA, A. R., e SILVA, I. A. C., & PEDROSA, E. M. Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105215, 2022.
- DE OLIVEIRA FERREIRA, A., DE MORAES SÁ, J. C., LAL, R., TIVET, F., BRIEDIS, C., INAGAKI, T. M., ... & ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 1559-1567, 2018.
- DOMKE, G. M., OSWALT, S. N., WALTERS, B. F., & MORIN, R. S. Tree planting has the potential to increase carbon sequestration capacity of forests in the United States. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 117, n. 40, p. 24649-24651, 2020.
- DORAN, J W., PARKIN, T B. Defining and assessing soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 1-21, 1994.
- FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**. Key Findings 2020. 2020.
- FERREIRA, E. P. B., STONE, L. F., MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção1. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, p. 22-31, 2017.

- FIGUEIREDO, J. P., ISLABÃO, L. O., HAUDT, I. W., FARIAS, E. M. D., RAMSON, C. D. M., & STUMPF, L. **Enzima  $\beta$ -glicosidase e sua relação com o teor de matéria orgânica em agroecossistemas familiares voltados para a produção de hortaliças.** 2023.
- FRANCA, J. S., FRANCA, J. S., REICHERT, J. M., HOLTHUSEN, D., RODRIGUES, M. F., & DE ARAUJO, E. F. Subsoiling and mechanical hole-drilling tillage effects on soil physical properties and initial growth of eucalyptus after eucalyptus on steplands. **Soil and Tillage Research**, v. 207, p. 104860, 2021.
- FONTANA, A., SILVA, C. F. D., PEREIRA, M. G., LOSS, A., BRITO, R. J. D., & BENITES, V. D. M. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 33, p. 545-550, 2011.
- GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. da. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola**, v. 59, p. 613-620, 2002.
- GREEN, V.S., STOTT, D.E., CRUZ, J.C., CURTI, N. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research** 92, 114-121, 2007.
- GARRIGUES, E., CORSON, M.S., ANGERS, D.A., VAN DER WERF, H.M., Walter, C. Soil quality in life cycle assessment: towards development of an indicator. **Ecological Indicators** 18, 434-442, 2012.
- GRAVINA, O. S., SANTOS, G. G., CORRECHEL, V., SILVA, G. C. D., MEDRADO, L. D. C., FLORES, R. A., ... & SEVERIANO, E. D. C. Physical attributes of ferralsol in fertigated sugarcane production environments for bioethanol in the midwest of Brazil. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1641, 2021.
- HARTMAN, K., SCHMID, M. W., BODENHAUSEN, N., BENDER, S. F., VALZANO-HELD, A. Y., SCHLAEPPI, K., & VAN DER HEIJDEN, M. G. (2023). A symbiotic footprint in the plant root microbiome. **Environmental microbiome**, 18(1), 65.
- HAO, J., CHAI, Y. N., LOPES, L. D., ORDÓÑEZ, R. A., WRIGHT, E. E., ARCHONTOULIS, S., & SCHACHTMAN, D. P. The effects of soil depth on the structure of microbial communities in agricultural soils in Iowa (United States). **Applied and Environmental Microbiology**, v. 87, n. 4, p. e02673-20, 2021.
- HU, M., ZHOU, S., XIONG, X., WANG, X., SUN, Y., MENG, Z., ... & DENG, Q. Dynamics of soil microbial communities involved in carbon cycling along three successional forests in southern China. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1326057, 2024.
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2022**. Disponível em: <relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> Acesso em: Agosto de 2023.
- IBGE. **Produção Extração vegetal e Silvicultura**, Rio de Janeiro, v. 35, p. 1-8, 2020.
- KANG, L., ZHAO, R., WU, K., FENG, Z., ZHAO, H., & ZHANG, S. Distribution characteristics and influencing factors of soil biological indicators in typical farmland soils. **Land**, v. 12, n. 4, p. 755, 2023.
- KIM, H-J; SUDDUTH, K A.; HUMMEL, J W. Soil macronutrient sensing for precision agriculture. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 11, n. 10, p. 1810-1824, 2009.

KOTROCZÓ, Z., JUHOS, K., BIRÓ, B., KOCSIS, T., PABAR, S. A., VARGA, C., & FEKETE, I. Effect of detritus manipulation on different organic matter decompositions in temperate deciduous forest soils. **Forests**, v. 11, n. 6, p. 675, 2020.

JOURGHOLAMI, M.; GHASSEMI, T.; LABELLE, E. R. Soil physio-chemical and biological indicators to evaluate the restoration of compacted soil following reforestation. **Ecological indicators**, v. 101, p. 102-110, 2019.

LEONÍDIO, R. L. **Fungos micorrízicos em solo do cerrado cultivado com soja sob déficit hídrico e resíduo agroindustrial**. 2022. Tese de Doutorado. INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO.

LIAO, H., HAO, X., ZHANG, Y., QIN, F., XU, M., CAI, P., ... & HUANG, Q. Soil aggregate modulates microbial ecological adaptations and community assemblies in agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 172, p. 108769, 2022.

LI, X., HAN, S., LUO, X., CHEN, W., & HUANG, Q. Arbuscular mycorrhizal-like fungi and glomalin-related soil protein drive the distributions of carbon and nitrogen in a large scale. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 963-972, 2020.

LI, Y., CHANG, S. X., TIAN, L., & ZHANG, Q. Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 121, p. 50-58, 2018.

LIGOT, G., GOURLET-FLEURY, S., OUÉDRAOGO, D. Y., Morin, X., BAUWENS, S., BAYA, F., ... & FAYOLLE, A. The limited contribution of large trees to annual biomass production in an old-growth tropical forest. **Ecological Applications**, v. 28, n. 5, p. 1273-1281, 2018.

LISBOA, B. B., VARGAS, L. K., SILVEIRA, A. O. D., MARTINS, A. F., & SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 36, p. 33-44, 2012.

LIU, S., LU, X., YANG, G., HE, C., SHI, Y., LI, C., ... & WU, L. Variation of arbuscular mycorrhizal fungi communities in the rhizosphere soil of Eucalyptus plantations based on different stand ages and its effect on phosphorus fractionation. **Applied Soil Ecology**, v. 189, p. 104908, 2023.

LOSS, A., BASSO, A., OLIVEIRA, B. S., KOUCHER, L. D. P., OLIVEIRA, R. A. D., KURTZ, C., ... & COMIN, J. J. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1212-1224, 2015.

MADEIROS, S F. **A cultura do eucalipto no estado de Alagoas: histórico, perspectivas e características dos plantios**. 2020.

MEDEIROS, A. D. S., FERRAZ, R. L. D. S., SILVA, T. S. D., SILVA, A. V. L. D., & MAIA, S. M. F. Impact of converting areas cultivated with sugarcane to eucalypt plantations on soil quality in northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 45, 2021.

MEDEIROS, A. D. S., SILVA, T. S. D., SILVA, A. V. L. D., BARROS, D. R. S., & MAIA, S. M. F. Organic carbon, nitrogen and the stability of soil aggregates in areas converted from sugar cane to eucalyptus in the state of Alagoas. **Revista Árvore**, v. 42, n. 4, p. e420404, 2018.

- MELO FILHO, J. F. D., SOUZA, A. L. V., & SOUZA, L. D. S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1599-1608, 2007.
- MENDHAM, D., EVANS, K. J., BICH, N. V., DONG, T. L., HAI, V. D., THANH, H. V., & MOHAMMED, C. L. Effect of residue management and fertiliser application on the productivity of a Eucalyptus hybrid and Acacia mangium planted on sloping terrain in northern Vietnam. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 81, n. 3, p. 201-212, 2019.
- MENDONÇA, E.S. & MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. 1. ed. Ponte Nova: D&M Gráfica e Editora Ltda, 2005. 107p.
- MORAES, J. A. T.; CAVICHIOLLI, F. A. Recuperação de solo com o sistema agrofloresta. **Revista Interface Tecnológica**, v. 19, n. 2, p. 597-607, 2022.
- MOREIRA, E., MARRIEL, I., dos SANTOS, C. A., SOUSA, J. D. C., GONTIJO NETO, M. M., LANA, A., & OLIVEIRA-PAIVA, C. A. (2016). **Fosfatase ácida e alcalina em solo sob manejo do sistema integração lavoura pecuária e floresta**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31., 2016, Bento Gonçalves. Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar: anais. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.
- MOSCARDINI, D. B. **Consórcio café-forrageira tropical: impactos nos indicadores da qualidade de solo**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MÜLLER, M., SCHNEIDER, J. R., KLEIN, V. A., DA SILVA JÚNIOR, J. P., & CHAVARRIA, G. Root growth and crop performance of soybean under chemical, physical, and biological changes after subsoiling. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 932-947, 2020.
- NIMMO, J.R.; PERKINGS, K.S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H; TOPP, G.C. **Methods of Soil Analysis**. Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of American Book Series. v. 5, p. 812-815, 2002.
- OLIVEIRA I. N., de SOUZA, Z. M., BOLONHEZI, D., TOTTI, M. C. V., de MORAES, M. T., LOVERA, L. H., ... & OLIVEIRA, C. F. Tillage systems impact on soil physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-sprouted seedlings. **Soil and Tillage Research**, v. 223, p. 105460, 2022.
- PIERISTÈ, M., FOREY, E., LOUNÈS-HADJ SAHRAOUI, A., MEGLOULI, H., LARUELLE, F., DELPORTE, P., & CHAUVAT, M. Spectral composition of sunlight affects the microbial functional structure of beech leaf litter during the initial phase of decomposition. **Plant and Soil**, v. 451, p. 515-530, 2020.
- PINTO, L. A. D. S. R., FERREIRA, R., de LEMOS, G. C. O., LOPES, I. S., OZÓRIO, J. M. B., ROSSET, J. S., ... & PEREIRA, M. G. Management systems in the subtropical region of Brazil: aggregation in the assessment of the chemical quality of fragile soils. **Experimental Agriculture**, v. 61, p. e12, 2025.
- PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British mycological Society**, v. 55, n. 1, p. 158-IN18, 1970.

PREVEDELLO, J., VOGELMANN, E. S., KAISER, D. R., FONTANELA, E., REINERT, D. J., & REICHERT, J. M. Agregação e matéria orgânica de um argissolo sob diferentes preparos do solo para plantio de Eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 149-158, 2014.

POEPLAU, C., RIEFLING, T., SCHIEDUNG, M., & ANLAUF, R. Land use and soil property effects on aggregate stability assessed by three different slaking methods. **European Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. e13549, 2024.

RAMETSTEINER, E. The 2022 edition of The State of the World's Forests. **Unasyuva**, v. 73, n. 253, p. 11-13, 2022.

REICHERT, J. M., MORALES, B., LIMA, E. M., DE BASTOS, F., MORALES, C. A. S., & DE ARAÚJO, E. F. Soil morphological, physical and chemical properties affecting Eucalyptus spp. productivity on Entisols and Ultisols. **Soil and Tillage Research**, v. 226, p. 105563, 2023.

RIBEIRO, F. P., GATTO, A., OLIVEIRA, A. D. D., PULROLNIK, K., VALADÃO, M. B. X., ARAÚJO, J. B. C. N., ... & FERREIRA, E. A. B. Carbon Storage in Different Compartments in Eucalyptus Stands and Native Cerrado Vegetation. **Plants**, v. 12, n. 14, p. 2751, 2023.

RILLIG, M. C., RAMSEY, P. W., MORRIS, S., & PAUL, E. A. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. **Plant and Soil**, v. 253, p. 293-299, 2003.

RISCH, A. C., ZIMMERMANN, S., SCHÜTZ, M., BORER, E. T., BROADBENT, A. A. D., CALDEIRA, M. C., ... & OCHOA-HUESO, R. Drivers of the microbial metabolic quotient across global grasslands. **Global Ecology and Biogeography**, v. 32, n. 6, p. 904-918, 2023.

ROCCI, K. S., Lavalley, J. M., Stewart, C. E., & Cotrufo, M. F. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 793, p. 148569, 2021.

RUTIGLIANO, F. A., MARZAIOLI, R., GRILLI, E., COPPOLA, E., & CASTALDI, S. Microbial, physical and chemical indicators together reveal soil health changes related to land cover types in the southern European sites under desertification risk. **Pedobiologia**, v. 99, p. 150894, 2023.

SANTOS, H. G. **Embrapa: Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2018.

SANTOS, K. F.; REICHERT, J. M. Best tillage practices for eucalyptus growth and productivity: A review on the Brazilian experience. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 2022.

SANTOS, T. O. **Comunidades microbianas e estoque de carbono e nitrogênio em luvisolo crômico sob diferentes níveis de degradação no semiárido do Brasil**. 2019.

SILVA, B. O. T. **Carbono e macroagregados do solo como indicador de qualidade em áreas sob diferentes manejos de cultivo de cana-de-açúcar**. 2021.

SILVA, S. R., BARROS, N. F., NOVAIS, R. F., & PEREIRA, P. R. G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1001-1010, 2002.

- SILVA, C. F. D., PEREIRA, M. G., MIGUEL, D. L., FEITORA, J. C. F., LOSS, A., MENEZES, C. E. G., & SILVA, E. M. R. D. (2012). Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no médio Vale do Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 36, 1680-1689.
- SILVA, M. O., DOS SANTOS, M. P., DA PAZ SOUSA, A. C., DA SILVA, R. L. V., DE MOURA, I. A. A., DA SILVA, R. S., & DA SILVA COSTA, K. D. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.
- SILVA, M.O., VELOSO, C. L., DO NASCIMENTO, D. L., DE OLIVEIRA, J., DE FREITAS PEREIRA, D., & DA SILVA COSTA, K. D. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.
- SINGH, P. K., SINGH, M., TRIPATHI, B. N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. **Protoplasma**, v. 250, p. 663-669, 2013.
- SHEEHY, J., REGINA, K., ALAKUKKU, L., SIX, J. Impact of no-till and reduced tillage on aggregation and aggregate-associated carbon in Northern European agroecosystems. **Soil and Tillage Research** 150, 107-113, 2015.
- SOUZA, A. G. V., DA SILVA, G. G., BESERRA, G. A., DE SOUZA, L. A., DE OLIVEIRA JÚNIOR, V. D., DA ROCHA FILHO, C. T., ... & DO VALE, V. S. Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. **Scientia Forestalis**. 2021.
- SOBUCKI, L., RAMOS, R. F., BELLÉ, C., & ANTONIOLLI, Z. I. (2019). **Manejo e qualidade biológica do solo: uma análise**. Revista Agronomia Brasileira, 3(3), 10-13.
- SUZUKI, L. E. A. S., REINERT, D. J., ALVES, M. C., & REICHERT, J. M. Medium-term no-tillage, additional compaction, and chiseling as affecting clayey subtropical soil physical properties and yield of corn, soybean and wheat crops. **Sustainability**, v. 14, n. 15, p. 9717, 2022.
- SUZUKI, L. E. A. S., REINERT, D. J., FENNER, P. T., SECCO, D., & REICHERT, J. M. Prevention of additional compaction in eucalyptus and pasture land uses, considering soil moisture and bulk density. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 120, p. 104113, 2022.
- TABATABAI, M. A. **Soil enzymes. Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties**, v. 5, p. 775-833, 1994.
- TAMURA, M.; THARAYIL, N. Plant litter chemistry and microbial priming regulate the accrual, composition and stability of soil carbon in invaded ecosystems. **New phytologist**, v. 203, n. 1, p. 110-124, 2014.
- TIBBETT, Mark; FRASER, Tandra D.; DUDDIGAN, Sarah. Identifying potential threats to soil biodiversity. **PeerJ**, v. 8, p. e9271, 2020.
- TIVET, F., SÁ, J.C.d.M., LAL, R., BRIEDIS, C., BORSZOWSKI, P.R., dos SANTOS, J.B., FARIAS, A., EURICH, G., da CRUZ HARTMAN, D., JUNIOR, M.N. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in subtropical and tropical regions of Brazil. **Soil and tillage research** 126, 203-218, 2013<sup>a</sup>.

TIVET, F., SÁ, J.C.M., Lal, R., BORSZOWSKI, P.R., BRIEDIS, C., dos SANTOS, J.B., SÁ, M.F.M., da CRUZ HARTMAN, D., EURICH, G., FARIAS, A., Bouzinac, S., Séguy, L. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma** 209-210, 214-225, 2013b.

TISDALL, J M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of soil science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TOMAZ, A. R. **Estoque, recuperação e esgotamento de carbono em classes de agregados do solo em Caatinga em regeneração e agricultura de subsistência**. 2021.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 33, p. 743-755, 2009.

VELÁSQUEZ, E., LAVELLE, P., ANDRADE, M. GISQ, A multifunctional indicator of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry** 39, 3066-3080, 2007.

VEZZANI, F. M; MIELNICZUK, J. O solo como sistema. **Curitiba**: Edição dos autores, p. 104, 2011.

VOIGTLAENDER, M., LACLAU, J. P., GONÇALVES, J. L. D. M., PICCOLO, M. D. C., MOREIRA, M. Z., NOUVELLON, Y., ... & BOUILLET, J. P. Introducing Acacia mangium trees in Eucalyptus grandis plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. **Plant and soil**, v. 352, p. 99-111, 2012.

VOLTR, V., MENŠÍK, L., HLISNIKOVSKÝ, L., HRUŠKA, M., POKORNÝ, E., & POSPÍŠILOVÁ, L. The soil organic matter in connection with soil properties and soil inputs. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 779, 2021.

XIAOMEI, G. O. U., YONGQING, R. E. N., XIN, Q. I. N., XIAORONG, W. E. I., & JINGJING, W. A. N. G. Global patterns of soil phosphatase responses to nitrogen and phosphorus fertilization. **Pedosphere**, v. 34, n. 1, p. 200-210, 2024.

WADT, P. G. S. **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. EMBRAPA. 2003.

WANG, J. L., LIU, K. L., ZHAO, X. Q., ZHANG, H. Q., LI, D., LI, J. J., & SHEN, R. F. Balanced fertilization over four decades has sustained soil microbial communities and improved soil fertility and rice productivity in red paddy soil. **Science of the total environment**, v. 793, p. 148664, 2021.

WANG, J., DENG, Y., LI, D., LIU, Z., WEN, L., HUANG, Z., ... & LU, Y. Soil aggregate stability and its response to overland flow in successive Eucalyptus plantations in subtropical China. **Science of The Total Environment**, v. 807, p. 151000, 2022.

WANG, Y., HE, C., SHI, Y., LI, H., TANG, Y., CHEN, B., ... & CHEN, L. Short-term cultivation limiting soil aggregate stability and macronutrient accumulation associated with glomalin-related soil protein in Eucalyptus urophylla× Eucalyptus grandis plantations. **Science of The Total Environment**, v. 878, p. 163187, 2023.

WRIGHT, S. F., & UPADHYAYA, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil science**, v. 161, n. 9, p. 575-586, 1996.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature erosion losses. **Journal of American society of Agronomy**, Madson, v.28, n.5, p. 337-358, 1936.

YOST, J. L., & HARTEMINK, A. How deep is the soil studied—an analysis of four soil science journals. **Plant and soil**, v. 452, n. 1, p. 5-18, 2020.

YU, M., Wu, M., SECUNDO, F., & LIU, Z. Detection, production, modification, and application of arylsulfatases. **Biotechnology Advances**, v. 67, p. 108207, 2023.

ZHONG, J., Pan, P., XIAO, S., & OUYANG, X. Influence of eucalyptus plantation on soil organic carbon and its fractions in severely degraded soil in Leizhou Peninsula, China. **Forests**, v. 13, n. 10, p. 1606, 2022.