

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**JOICE REALI OLIVEIRA ALEXANDRE**

**CONDICIONAMENTO DO SOLO COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS E  
BIOCARVÃO: 12 anos de recuperação de área severamente degradada no Cerrado**

Ilha Solteira - SP  
2025



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**JOICE REALI OLIVEIRA ALEXANDRE**

**CONDICIONAMENTO DO SOLO COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS E  
BIOCARVÃO: 12 anos de recuperação de área severamente degradada no Cerrado**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira para  
obtenção do título de Bacharela em Ciências  
Biológicas.

Orientadora: Profa. Dra. Thaís Soto Boni

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

A381c Alexandre, Joice Reali Oliveira.  
Condicionamento do solo com macrófitas aquáticas e biocarvão: 12 anos de recuperação de área severamente degradada no cerrado / Joice Reali Oliveira Alexandre. --Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
29 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Thais Soto Boni  
Inclui bibliografia

1. Resíduos Ambientais. 2. Cinza. 3. Subsolo exposto. 4. Área de empréstimo.

## ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

### Condicionamento do solo com macrófitas aquáticas e biocarvão: 12 anos de recuperação de área severamente degradada no Cerrado

Joice Reali Oliveira Alexandre


#### REGULAMENTO SOBRE A AVALIAÇÃO:

ARTIGO 25° - § 2° A apresentação pública do trabalho de TCC deverá ser de no mínimo 20 (vinte) minutos e máximo de 40 (quarenta) minutos. Após um intervalo de 5 (cinco) minutos, haverá a arguição do Trabalho pelos examinadores. O tempo de arguição, será de até 15 (quinze) minutos para cada examinador, e até 15 (quinze) minutos o tempo para a resposta do(a) aluno(a) a cada examinador ou no caso de se optar pelo diálogo, o tempo conjunto entre examinador e acadêmico(a) será de no máximo 30 (trinta) minutos.


ARTIGO 24° - No julgamento do TCC, a banca examinadora deverá avaliar a apresentação oral, escrita e a defesa do trabalho durante a arguição. O conceito final será APROVADO ou REPROVADO.

#### COMISSÃO EXAMINADORA

1º EXAMINADOR (Orientador-Presidente)  
Nome: Thaís Soto Boni

Documento assinado digitalmente  
 THAIS SOTO BONI  
Data: 02/12/2025 10:45:44-0300  
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

2º EXAMINADOR  
Nome: Kátia Luciene Maltoni

Documento assinado digitalmente  
 KATIA LUCIENE MALTONI  
Data: 02/12/2025 16:00:02-0300  
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

3º EXAMINADOR  
Nome: Ana Maria Rodrigues Cassiolato



#### CONCEITO

APROVADO

REPROVADO

Ilha Solteira-SP, 01 de dezembro de 2025.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha profunda gratidão à minha família, ao meu namorado, à minha sogra e ao meu sogro pelo incentivo constante, pelo apoio incondicional e pela sabedoria compartilhada. Cada palavra de encorajamento e cada gesto de afeto foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

O presente trabalho foi desenvolvido com o apoio do Laboratório de Pedologia e Recuperação Ambiental (LAPRA) junto com minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thais Soto Boni, técnico José Antônio Agustini e Silvelise Pupin cuja equipe contribuiu de maneira fundamental para a sua realização.

Agradeço, também, à Coordenadoria de Permanência Estudantil (COPE) pela concessão da bolsa e à Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia/ Campus de Ilha Solteira (UNESP) que possibilitou a execução deste estudo.

“Na natureza, nada existe isoladamente”  
(Rachel Carson, 1962).

## RESUMO

Este trabalho avaliou o estado atual da recuperação de uma área severamente degradada em decorrência da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, no bioma Cerrado, doze anos após as primeiras intervenções para recuperação ambiental. O objetivo foi caracterizar as condições edáficas e da vegetação e verificar a eficácia das técnicas empregadas. As intervenções incluíram a aplicação de macrófitas aquáticas e biocarvão, oriundo da queima do bagaço da cana-de-açúcar, utilizados como condicionadores do solo severamente degradado, por meio de 3 doses de macrófitas (00, 16 e 32 t ha<sup>-1</sup>) e 4 doses de biocarvão (00, 15, 30 e 45 t ha<sup>-1</sup>), e o plantio de mudas de 10 espécies nativas de Cerrado, totalizando 1.080 mudas. Após 12 anos das intervenções, foram analisados atributos químicos e microbiológicos do solo, bem como a sobrevivência e o crescimento das espécies arbóreas introduzidas, o recobrimento do solo por vegetação e indicadores microclimáticos, como umidade e temperatura do solo. Os resultados revelam que a área permanece em estágio inicial de recuperação. Entre as espécies introduzidas, *Hymenaea stigonocarpa* (jatobá-do-cerrado) destacou-se pela elevada taxa de sobrevivência e bom desempenho mesmo sem a adição dos resíduos, indicando elevada tolerância a condições de estresse hídrico e baixa fertilidade, podendo ser indicada para projetos de recuperação de áreas intensamente degradadas. A maioria das espécies, no entanto, apresentou sobrevivência abaixo dos 50%, comprometendo a formação de cobertura vegetal. A interação entre as doses de macrófitas aquáticas e biocarvão resultou em aumento no recobrimento do solo por vegetação espontânea, cerca de cinco vezes superior ao controle, embora o valor final tenha permanecido baixo (aproximadamente 20%). Esse nível de cobertura ainda é insuficiente para modificar de forma consistente a umidade ou a temperatura do solo. As análises químicas do solo demonstraram que o biocarvão contribuiu elevando o pH e os teores de cálcio e magnésio e reduzindo alumínio e acidez potencial. Os indicadores microbiológicos mostram tendência de aumento da biomassa microbiana e da atividade da fosfatase ácida com a introdução das macrófitas aquáticas, mas os efeitos do biocarvão (BC) permanecem incipientes, confirmando que melhorias biológicas em solos expostos ocorrem de forma lenta e dependem do acúmulo gradual de matéria orgânica. A limitação hídrica foi identificada como um dos principais entraves ao processo de recuperação, agravada pela elevada exposição do subsolo, condições que dificultam germinação, estabelecimento de plântulas e atividade microbiana. Diante desse cenário, conclui-se que, embora as práticas aplicadas tenham gerado avanços localizados, a área ainda apresenta baixos indicadores de recuperação ecológica. Para acelerar o processo, é necessário intensificar o aporte de matéria

orgânica, aumentar a diversidade de espécies nativas — incluindo herbáceas e gramíneas do Cerrado — e adotar manejos voltados à melhoria da infiltração e retenção de água no solo.

**Palavras-chave:** resíduos ambientais; cinza; subsolo exposto; área de empréstimo.

## ABSTRACT

This study evaluated the current state of recovery of an area severely degraded as a result of the construction of the Ilha Solteira Hydroelectric Plant in the Cerrado biome, 12 years after the first interventions for environmental recovery. The objective was to characterize the soil and vegetation conditions and verify the effectiveness of the techniques employed. The interventions included the application of aquatic macrophytes and biochar, derived from the burning of sugarcane bagasse, used as conditioners for severely degraded soil, using three doses of macrophytes (00, 16, and 32 t ha<sup>-1</sup>) and four doses of biochar (00, 15, 30, and 45 t ha<sup>-1</sup>), and the planting of seedlings of ten native Cerrado species, totaling 1,080 seedlings. After 12 years of interventions, the chemical and microbiological attributes of the soil were analyzed, as well as the survival and growth of the introduced tree species, soil cover by vegetation, and microclimatic indicators such as soil moisture and temperature. The results reveal that the area remains in the early stages of recovery. Among the introduced species, *Hymenaea stigonocarpa* (jatobá-do-cerrado) stood out for its high survival rate and good performance even without the addition of residues, indicating high tolerance to water stress and low fertility conditions, and may be recommended for projects to recover intensely degraded areas. However, most species had survival rates below 50%, compromising the formation of vegetation cover. The interaction between doses of aquatic macrophytes and biochar resulted in an increase in soil cover by spontaneous vegetation, about five times higher than the control, although the final value remained low (approximately 20%). This level of coverage is still insufficient to consistently modify soil moisture or temperature. Chemical analyses of the soil showed that biochar contributed to increasing pH, calcium and magnesium levels and reducing aluminum and potential acidity. Microbiological indicators show a trend toward increased microbial biomass and acid phosphatase activity with the introduction of aquatic macrophytes, but the effects of BC remain incipient, confirming that biological improvements in exposed soils occur slowly and depend on the gradual accumulation of organic matter. Water limitation was identified as one of the main obstacles to the recovery process, aggravated by the high exposure of the subsoil, conditions that hinder germination, seedling establishment, and microbial activity. Given this scenario, it is concluded that, although the practices applied have generated localized advances, the area still shows low indicators of ecological recovery. To accelerate the process, it is necessary to intensify the input of organic matter, increase the diversity of native species—including herbaceous plants and Cerrado grasses—and adopt management practices to improving water infiltration and retention in the soil.

**Keywords:** environmental residues; gray; exposed subsoil; borrow land.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	HISTÓRICO DA ÁREA .....	13
2.2	COLETA E ANÁLISES.....	16
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>19</b>
3.1	SOBREVIVÊNCIA E CRESCIMENTO DAS ARBÓREAS INTRODUZIDAS	19
3.2	RECOBRIMENTO VEGETAL, UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO ...	20
3.3	ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO .....	22
<b>4.</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>26</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>27</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Cerrado, segundo maior bioma brasileiro, é reconhecido globalmente como um *hotspot* de biodiversidade devido à sua elevada importância biológica. Este bioma abriga uma notável diversidade florística e faunística, além de desempenhar um papel crucial no ciclo hidrológico da América do Sul, ao ser a região de origem de nascentes e rios que alimentam três das maiores bacias hidrográficas do continente (Marques *et al.*, 2022; Ferreira *et al.*, 2022). No entanto, aproximadamente 50% dos 2 milhões de km<sup>2</sup> da cobertura vegetal original do Cerrado foram convertidos em áreas de pastagem, agricultura e infraestrutura. Essas transformações causaram sérios impactos ambientais, incluindo a degradação do solo, a perda de ecossistemas nativos e a proliferação de espécies exóticas invasoras, que ameaçam diretamente a biodiversidade local (Klink; Machado, 2005; Rocha *et al.*, 2022).

O Brasil, em particular, enfrenta um cenário crítico de degradação ambiental, com mais de 200 milhões de hectares de solo, em algum nível de degradação, devido a atividades antrópicas como mineração, construção de estradas, práticas agropecuárias inadequadas e a instalação de usinas hidrelétricas. Tais atividades impactam negativamente as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, resultando em degradação que afeta intensamente o bioma Cerrado (Aquino *et al.*, 2008).

Áreas de empréstimo, caracterizadas pela remoção do solo superficial, representam um exemplo extremo de degradação ambiental. A retirada das camadas superficiais expõe o subsolo, elimina a vegetação original, o banco de semente e propágulos, dificulta a regeneração natural, resultando em elevada compactação, perda de matéria orgânica, baixa disponibilidade de nutrientes, reduzida infiltração e limitada capacidade de armazenamento de água (Alves; Nascimento; Souza, 2008; Rodrigues; Maltoni; Cassiolato, 2007). Esse conjunto de fatores compromete a regeneração natural e consequente reestabelecimento da vegetação nativa (Fardin *et al.*, 2021).

A área de estudo apresenta esse histórico de degradação, decorrente das intervenções relacionadas à construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, situada na divisa entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Nesse local, a remoção de camadas de solo de até 12 metros de espessura, ocasionou profundas alterações na estrutura física, química e ecológica, intensificando a perda de atributos essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos da área.

A implementação de técnicas de recuperação de áreas degradadas no bioma Cerrado é fundamental para aumentar as chances de reconstrução dos ecossistemas comprometidos e a restauração dos processos ecológicos. Entre as estratégias utilizadas, destaca-se o uso de

resíduos orgânicos, como macrófitas aquáticas e biocarvão (cinzas da queima de bagaço de cana-de-açúcar), que, de acordo com as suas características, podem atuar como condicionantes e beneficiar a ciclagem de nutrientes no solo, além do plantio de espécies nativas do Cerrado (Oliveira *et al.*, 2015; Fardin *et al.*, 2021; Boni *et al.*, 2022). A combinação dessas práticas gera uma sinergia positiva, promovendo a reintrodução de carbono orgânico e disponibilização de nutrientes no solo, o que resulta na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas, além de estimular a atividade microbiana essencial para a saúde do solo e beneficiar o crescimento plantas (Prado *et al.*, 2020; Morais *et al.*, 2020; Raupp; Carrillo; Nielsen, 2024).

A vegetação é altamente sensível a distúrbios ambientais e, portanto, seu monitoramento é uma ferramenta-chave na avaliação de ecossistemas, conservação da biodiversidade, controle climático, proteção do solo e análise dos impactos ambientais. O monitoramento da vegetação, realizado por meio de avaliações periódicas, é fundamental para verificar se os objetivos da restauração estão sendo atingidos e se há necessidade de intervenções adicionais para garantir a recuperação eficaz das áreas degradadas (Fardin *et al.*, 2021).

Diversos indicadores são empregados para avaliar a qualidade do solo, incluindo atributos físicos, químicos e biológicos (Oliveira *et al.*, 2021). Entre os indicadores biológicos, as análises microbiológicas, como respiração do solo, carbono da biomassa microbiana, quocientes metabólicos e enzimáticos, têm recebido destaque devido à sua sensibilidade às mudanças ambientais (Oliveira *et al.*, 2021). Tais indicadores são amplamente reconhecidos como ferramentas valiosas para monitorar a saúde do solo e seu potencial de suporte à regeneração da vegetação nativa (Boni *et al.*, 2022; Sena *et al.*, 2023). Indicadores como temperatura e umidade do solo contribuem para avaliações de restauração por sua sensibilidade às mudanças sazonais (Munoz *et al.*, 2016). O monitoramento é medir de forma contínua certos indicadores por meio de avaliações ao longo do tempo e com isso verificar o sucesso ou não do processo de recuperação da área em estudo.

Diante do exposto, fica evidente a importância do monitoramento contínuo após a aplicação das técnicas de recuperação, pois permite avaliar a eficácia das intervenções e orientar ajustes nas estratégias adotadas. Garantir condições adequadas do solo para sustentar a vegetação nativa é essencial para o sucesso dos projetos, e o monitoramento oferece informações que aprimoram continuamente as práticas de restauração em áreas severamente degradadas.

## 1.1 Objetivo geral e específicos

O objetivo deste trabalho foi caracterizar o estado atual das condições edáficas e da vegetação, para avaliar a eficácia das técnicas de recuperação empregadas em uma área severamente degradada, em processo de recuperação há 12 anos, e identificar ações necessárias para a continuidade da recuperação ecológica.

Objetivos específicos:

1. Avaliar os atributos químicos e microbiológicos do solo após 12 anos das intervenções realizadas para a recuperação ambiental da área.
2. Verificar a taxa de sobrevivência das espécies introduzidas em 2012 e analisar seu desempenho em termos de crescimento.
3. Monitorar e analisar a variação da temperatura do solo nos períodos da manhã e da tarde, a fim de compreender sua influência sobre os processos ecológicos locais e sobre o desempenho das espécies em recuperação.
4. Identificar as limitações atuais do processo de recuperação conduzido na área e propor ações que contribuam para a continuidade e o avanço da restauração ecológica.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Histórico da área

O estudo foi realizado em condições de campo, em uma área degradada localizada na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Unesp – Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, situada no município de Selvíria/MS, bioma Cerrado (Figura1). A área experimental foi estabelecida em novembro de 2011 e abrangeu aproximadamente 3,4 hectares de área degradada com exposição do subsolo. Desde a sua degradação, a área não apresentou regeneração natural, resultando em vastas áreas desprovidas de cobertura vegetal.

**Figura 1.** Localização da área experimental.



Fonte: Google Earth, acesso em 20 de nov. de 2025.

A região circundante apresenta solos argilosos, com predomínio de Latossolos e Argissolos Vermelhos Distróficos (Demattê, 1980; Santos *et al.*, 2025), e o clima é classificado como Aw, caracterizado por um clima tropical com verões chuvosos e invernos secos (Alvares *et al.*, 2014).

Para melhorar as condições edáficas da área e possibilitar a revegetação, a área foi gradeada (grade pesada a 0,40 m de profundidade) para rompimento do selamento e revolvimento superficiais, e escarificada (0,37 m de profundidade). Os resíduos de macrófitas aquáticas e o biocarvão (cinza da queima do bagaço de cana-de-açúcar) foram distribuídos a lanço, com um aplicador de calcário, e incorporados ao solo degradado com uma grade intermediária (0,30 m de profundidade).

**Tabela 1.** Composição granulométrica do solo e classe textural da área experimental (AE) e do Cerrado conservado (CC).

Identificação	Argila	Areia	Silte	Classe Textural
----- g kg <sup>-1</sup> -----				
AE	472	437	91	Argila
CC	335	627	38	Franco Argilo Siltosa

Fonte: Elaboração própria.

**Figura 2.** Técnicas aplicadas em 2011. (a) área gradeada e escarificada, incorporação dos resíduos (b) macrófita aquática e (C) biocarvão.



Fonte: Acervo do Laboratório de Pedologia e Recuperação Ambiental.

As macrófitas aquáticas (MA) utilizadas foram removidas do reservatório da Usina Hidrelétrica de Jupia e permaneceram expostas ao sol durante 120 dias para secagem. O biocarvão (BC) utilizado foi coletado na Usina Alcoolvale S.A., em Aparecida do Taboado/MS, e foi seco a pleno sol por 30 dias. Posteriormente à incorporação dos resíduos, a área permaneceu em pousio por três meses.

As doses de MA utilizadas foram de 0, 16 e 32 t ha<sup>-1</sup>, e as de BC foram de 0, 15, 30 e 45 t ha<sup>-1</sup> (Quadro 1). Combinadas, essas doses resultaram em 12 tratamentos, com três repetições, estabelecidos em 36 parcelas de 20 x 30 metros (600 m<sup>2</sup>), separadas por faixas de 5 metros de largura.

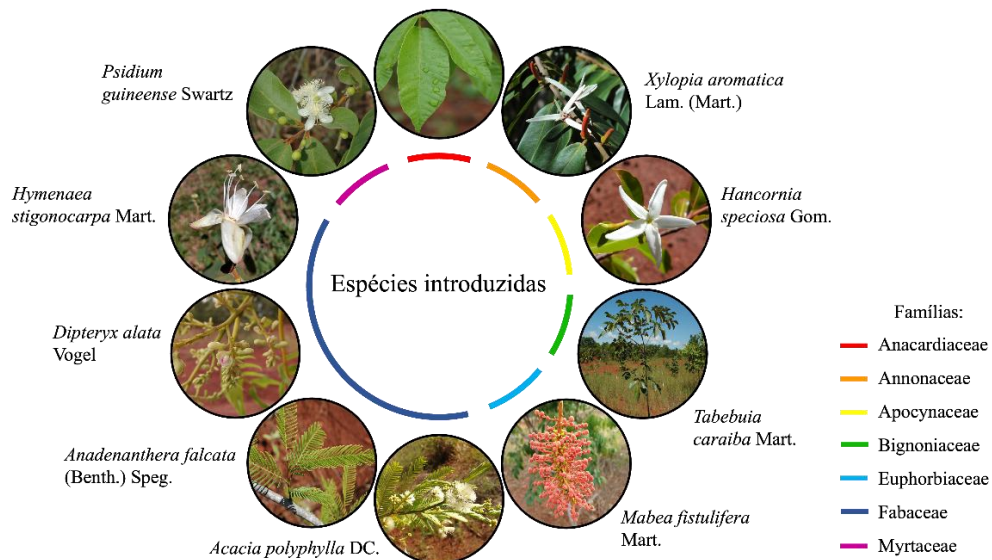
Em fevereiro de 2012, foram introduzidas na área experimental mudas de 10 espécies nativas do Cerrado da região (Figura 3), com plantio conduzido em covas (0,40 m de profundidade) e espaçamento de 4,0 x 5,0 metros. Foram utilizadas 1.080 mudas, sendo que cada parcela do experimento recebeu três indivíduos de cada espécie. O espaçamento adotado visava deixar espaço para a entrada de outras espécies na área, e as mudas tinham pelo menos 0,30 m de altura no momento do plantio.

**Quadro 1.** Descrição dos tratamentos gerados pela combinação de doses dos resíduos orgânico e agroindustrial.

Identificação	Combinação das Doses
MA00+BC00	MA 00 t ha <sup>-1</sup> e BC 00 t ha <sup>-1</sup>
MA00+BC15	MA 00 t ha <sup>-1</sup> e BC 15 t ha <sup>-1</sup>
MA00+BC30	MA 00 t ha <sup>-1</sup> e BC 30 t ha <sup>-1</sup>
MA00+BC45	MA 00 t ha <sup>-1</sup> e BC 45 t ha <sup>-1</sup>
MA16+BC00	MA 16 t ha <sup>-1</sup> e BC 00 t ha <sup>-1</sup>
MA16+BC15	MA 16 t ha <sup>-1</sup> e BC 15 t ha <sup>-1</sup>
MA16+BC30	MA 16 t ha <sup>-1</sup> e BC 30t ha <sup>-1</sup>
MA16+BC45	MA 16 t ha <sup>-1</sup> e BC 45 t ha <sup>-1</sup>
MA32+BC00	MA 32 t ha <sup>-1</sup> e BC 00 t ha <sup>-1</sup>
MA32+BC15	MA 32 t ha <sup>-1</sup> e BC 15 t ha <sup>-1</sup>
MA32+BC30	MA 32 t ha <sup>-1</sup> e BC 30t ha <sup>-1</sup>
MA32+BC45	MA 32 t ha <sup>-1</sup> e BC 45 t ha <sup>-1</sup>

Fonte: Adaptado de Boni (2017).

**Figura 3.** Espécies nativas de Cerrado utilizadas no plantio em fevereiro de 2012 na área experimental.



Fonte: Adaptado de Boni *et al.* (2022).

Em janeiro de 2017, as 36 parcelas experimentais iniciais foram subdivididas em quatro áreas menores, cada uma com 150 m<sup>2</sup>. Nessas áreas, sementes de duas leguminosas comuns no Cerrado, o *Calopogônio* (*Calopogonium caeruleum* (Benth.) Sauvalle) e o *Estilosantes Campo*

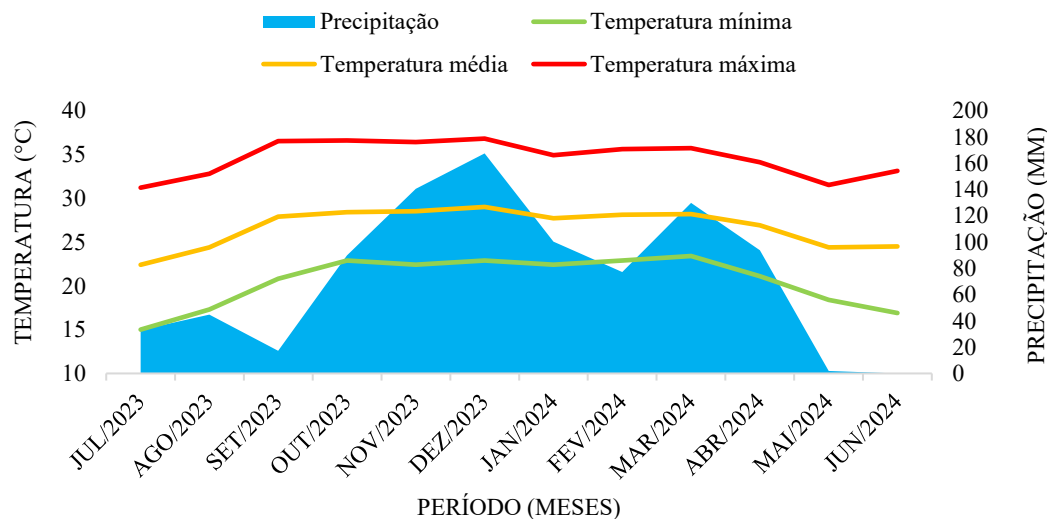
Grande (uma mistura comercial de sementes de *Stylosanthes capitata* Vogel e *S. macrocephala* M.B. Ferreira & Sousa Costa), foram introduzidas. Como resultado, as parcelas iniciais receberam quatro novos tratamentos, distribuídos aleatoriamente: 100% Estilosantes, 100% Calopogônio, 50% Estilosantes + 50% Calopogônio, e controle (sem adição de sementes).

Desde as últimas intervenções em 2017, não foram realizadas mais ações antrópicas na área experimental. No entanto, em 2023, com a proximidade de 12 anos das intervenções, reativamos o monitoramento e a análise de alguns atributos para avaliar o sucesso das técnicas utilizadas e verificar se há necessidade de novas intervenções, com o objetivo de melhorar as condições edáficas e a cobertura do solo por vegetação.

## 2.2 Coleta e análises

Entre os anos de 2023 e 2024, a área foi monitorada mensalmente para controle de formigas e pragas. Dados climáticos do início das avaliações Abril de 2024 está apresentados na Figura 4.

**Figura 4.** Temperaturas máximas, mínimas e médias (°C) e precipitação (mm) observadas no período de monitoramento – anos 2023 e 2024.



**Fonte:** (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2025).

Em fevereiro/2024, 12 anos após a introdução das mudas na área, foi verificada a taxa de sobrevivência das espécies, e selecionadas, para avaliação de crescimento, espécies com mais de 50% de sobrevivência. As espécies avaliadas quanto ao crescimento foram: *Astronium fraxinifolium* Schott, *Hancornia speciosa* Gom, *Hymenaea stigonocarpa* Mart e *Xylopia*

*aromatica* (Lam) Mart., avaliadas para altura (cm) e diâmetro do caule (mm) com régua e fita métrica e paquímetro digital, respectivamente (Figura 5).

**Figura 5.** Avaliação para crescimento em altura e diâmetro.



Fonte: Elaboração própria.

O solo da área foi monitorado em abril de 2024, após o período chuvoso (Figura 4), para temperatura, com uso de termômetros de haste, na profundidade de 0,05 m, com 05 repetições por parcela (Figura 6). As medidas de temperatura foram realizadas ao amanhecer (7:30h) e à tarde (14h) (Costa; Godoy, 1962), posteriormente para análise estatística foi calculada a variação de temperatura entre o período da tarde e o da manhã ( $\Delta T$ ). Conjuntamente, solo foi coletado para mensuração de umidade por meio do método gravimétrico (Teixeira *et al.*, 2017).

**Figura 6.** Avaliação para temperatura do solo.

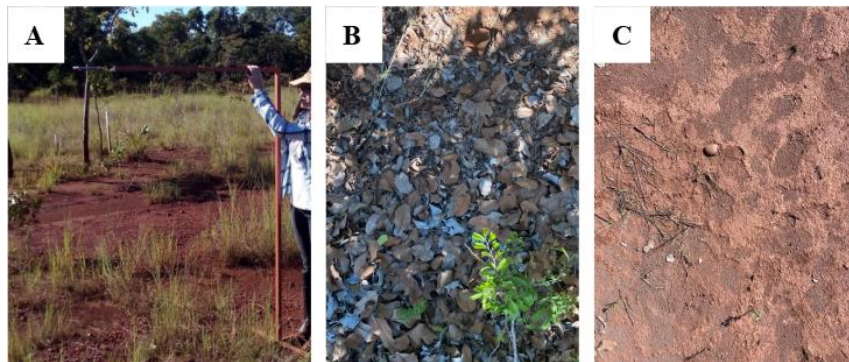


Fonte: Elaboração própria.

A avaliação da cobertura do solo por vegetação foi mensurada por meio de imagens aéreas obtidas com uma estrutura que sustentava um celular, permitindo registrar a cobertura vegetal, a cerca de 1,6 m de altura (Figura 7). Essa abordagem possibilitou o acompanhamento

do processo de crescimento e estabelecimento da vegetação nas parcelas experimentais. A partir das imagens capturadas, foi possível estimar a porcentagem da área de cada parcela recoberta por vegetação sendo constituída por herbáceas e gramíneas, para isso foi utilizado o software APS ASSESS 2.0 (Lamari, 2008).

**Figura 7.** Avaliação da cobertura vegetal. (a) Estrutura que permitiu registrar imagens áreas (b) e (c).



Fonte: Elaboração própria.

Amostras deformadas de solo também foram coletadas (Figura 8) na profundidade de 0,0 a 0,20 m para análise de fertilidade (Raij *et al.*, 2001) e determinações microbiológicas: respiração basal do solo (Anderson; Domsch, 1989), carbono da biomassa microbiana (Vance; Brookes; Jenkinson, 1987), atividade das enzimas  $\beta$ -glucosidase e fosfatase ácida (Tabatabai, 1994).

**Figura 8.** Coleta de solo para avaliação da fertilidade e análise microbiológicas.



Fonte: Elaboração própria.

Após as coletas, análises e determinações em laboratório, os dados foram avaliados por meio de análises de variância (ANOVA) e teste de médias Tukey ( $p < 0,05$ ), realizadas no software SISVAR (Ferreira, 2019).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Sobrevivência e crescimento das arbóreas introduzidas

A avaliação da sobrevivência das dez espécies introduzidas no plantio de 2012 permitiu identificar aquelas que apresentaram melhor desempenho ao longo do período monitorado, com taxas de sobrevivência que oscilaram de 2,55 a 92,13% (Tabela 2). Com base na taxa de sobrevivência, foram selecionadas quatro espécies que apresentaram sobrevivência superior a 50%, as quais demonstraram maior adaptação às condições de degradação da área experimental.

**Tabela 2.** Porcentagem de sobrevivência das espécies nativas introduzidas após 12 anos.

Nome científico	Nome popular	Sobrevivência (%)
<i>Acacia polyphylla</i> DC.	Monjoleiro	2,55
<i>Anadenanthera falcata</i> (Benth.) Speg.	Angico do Cerrado	8,80
<i>Tabebuia caraiba</i> Mart.	Ipê Amarelo	13,19
<i>Dipteryx alata</i> Vogel	Baru	31,25
<i>Mabea fistulifera</i> Mart.	Canudo de Pito	32,87
<i>Psidium guineense</i> Swartz	Araçá do Campo	34,49
<i>Xylopia aromatica</i> Lam. (Mart.)	Pimenta de Macaco	<b>51,00</b>
<i>Hancornia speciosa</i> Gom.	Mangaba	<b>80,79</b>
<i>Astronium fraxinifolium</i> Schott	Gonçalo-alves	<b>83,56</b>
<i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart.	Jatobá-do-Cerrado	<b>92,13</b>

Fonte: Elaboração própria.

As espécies selecionadas para avaliação do crescimento foram: *H. stigonocarpa*, *A. fraxinifolium*, *H. speciosa* e *X. aromatica*, que apresentaram taxa de sobrevivência decrescente, com 92; 83; 80 e 51%, respectivamente (Tabela 2).

A avaliação do crescimento demonstrou influência positiva das doses de MA (16 e 32 t ha<sup>-1</sup>) e BC (30 e 45 t ha<sup>-1</sup>) sobre a altura e o diâmetro de *A. fraxinifolium*. Já para a espécie *H. speciosa* apenas as doses de MA promoveram incrementos significativos em altura e diâmetro (Tabela 3).

Para *H. stigonocarpa*, espécie que apresentou a maior taxa de sobrevivência, não houve diferença estatística entre as doses utilizadas. Enquanto para *X. aromatica*, as doses crescentes

de MA influenciaram positivamente o crescimento em altura, o diâmetro, por sua vez, não sofreu influência dos resíduos utilizados (Tabela 3).

**Tabela 3.** Valores médios para altura em cm (Alt) e diâmetro em mm (Dia) das espécies *Astronium fraxinifolium*, *Hancornia speciosa*, *Hymenaea stigonocarpa* e *Xylopia aromatica*, nas diferentes doses de macrófitas aquáticas (MA) e biocarvão (BC), valor de *p* e coeficiente de variação (CV).

FV	<i>A. fraxinifolium</i>		<i>H. speciosa</i>		<i>H. stigonocarpa</i>		<i>X. aromatica</i>	
	Alt	Dia	Alt	Dia	Alt	Dia	Alt	Dia
<b>MA</b>								
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	72,9b	23,7b	92,6b	29,6b	90,7a	33,4a	58,3b	17,1a
<b>16 t ha<sup>-1</sup></b>	103,0a	33,4a	190,0a	59,7a	126,6a	41,6a	80,1ab	23,6a
<b>32 t ha<sup>-1</sup></b>	159,2a	47,5a	211,5a	71,6a	135,1a	44,6a	123,8a	33,3a
<b>BC</b>								
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	36,1c	15,9c	119,6a	50,5a	88,4a	41,3a	55,6a	17,1a
<b>15 t ha<sup>-1</sup></b>	102,4b	32,6b	166,8a	56,1a	128,9a	38,1a	98,3a	27,3a
<b>30 t ha<sup>-1</sup></b>	121,5ab	38,5ab	177,5a	57,1a	108,3a	38,7a	100,9a	27,6a
<b>45 t ha<sup>-1</sup></b>	176,1a	49,9a	192,3a	51,3a	138,7a	41,3a	105,2a	30,2a
<b><i>p</i> valor</b>								
<b>MA</b>	0,000**	0,000**	0,000**	0,000**	0,050 <sup>ns</sup>	0,120 <sup>ns</sup>	0,019*	0,050 <sup>ns</sup>
<b>BC</b>	0,000**	0,000**	0,109 <sup>ns</sup>	0,905 <sup>ns</sup>	0,108 <sup>ns</sup>	0,200 <sup>ns</sup>	0,200 <sup>ns</sup>	0,246 <sup>ns</sup>
<b>MAxBC</b>	1,000 <sup>ns</sup>	1,000 <sup>ns</sup>	0,214 <sup>ns</sup>	0,263 <sup>ns</sup>	0,534 <sup>ns</sup>	0,623 <sup>ns</sup>	0,161 <sup>ns</sup>	0,057 <sup>ns</sup>
<b>CV (%)</b>	81	65	68	74	70	60	110	60

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey para  $p < 0,05$ . <sup>ns</sup>: valores não significativos; \* e \*\*: valores significativos a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ , respectivamente.

### 3.2 Recobrimento vegetal, umidade e temperatura do solo

As doses isoladas de MA e BC não promoveram diferenças estatísticas para o recobrimento do solo por vegetação, mas a interação entre MA e BC foi significativa ( $p = 0,0206$ ) (Tabela 4).

O desdobramento da interação entre as doses de MA e BC mostra que, na ausência de MA, a aplicação de 30 t ha<sup>-1</sup> de BC já é suficiente para aumentar o recobrimento do solo pela vegetação (Tabela 5). Por outro lado, quando se aplica 32 t ha<sup>-1</sup> de MA, a combinação com 15 t ha<sup>-1</sup> de BC também resulta em maior recobrimento. Em ambos os casos, esses tratamentos

promoveram um recobrimento cerca de cinco vezes superior ao observado na ausência de resíduos (MA00+BC00).

A umidade e temperatura do solo, coletadas e avaliadas em abril/2024, não obtiveram diferença estatística entre as doses utilizadas (Tabela 4).

**Tabela 4.** Valores médios de recobrimento do solo por vegetação (Recobrimento), umidade e variação de temperatura ( $\Delta T$ ), nas diferentes doses de macrófitas aquáticas (MA) e biocarvão (BC), valor de  $p$  e coeficiente de variação (CV).

<b>FV</b>	<b>Recobrimento</b>	<b>Umidade</b>	<b><math>\Delta T</math></b>
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>°C</b>
<b>MA</b>			
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	9,34a	17,4a	4,87a
<b>16 t ha<sup>-1</sup></b>	8,58a	13,7a	4,30a
<b>32 t ha<sup>-1</sup></b>	8,30a	13,6a	3,87a
<b>BC</b>			
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	5,64a	19,0a	4,14a
<b>15 t ha<sup>-1</sup></b>	13,2a	12,9a	4,21a
<b>30 t ha<sup>-1</sup></b>	8,89a	14,1a	4,48a
<b>45 t ha<sup>-1</sup></b>	7,20a	13,6a	4,55a
<b><math>p</math> valor</b>			
<b>MA</b>	0,09403 <sup>ns</sup>	0,4229 <sup>ns</sup>	0,3780 <sup>ns</sup>
<b>BC</b>	0,1696 <sup>ns</sup>	0,3433 <sup>ns</sup>	0,9484 <sup>ns</sup>
<b>MA x BC</b>	0,0206 <sup>*</sup>	0,5145 <sup>ns</sup>	0,9986 <sup>ns</sup>
<b>CV(%)</b>	193	52	39

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey para  $p < 0,05$ . ns: valores não significativos; \* e \*\*: valores significativos a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ , respectivamente.

**Tabela 5.** Desdobramento da interação entre as doses de macrófitas aquáticas (MA) e as doses de biocarvão (BC) para o recobrimento do solo por vegetação.

<b>MA</b> <b>t ha<sup>-1</sup></b>	<b>BC (t ha<sup>-1</sup>)</b>				<b><math>p</math> valor</b>
	<b>00</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	
<b>00</b>	4,11Ba	6,41Ba	20,00Aa	6,86Ba	0,045
<b>16</b>	4,11Aa	13,24Aa	3,95Ab	8,43Aa	0,519
<b>32</b>	8,71ABa	20,1Aa	2,72Bb	6,31ABa	0,020

<b>p valor</b>	0,689	0,089	0,008	0,938
----------------	-------	-------	-------	-------

Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey para  $p < 0,05$ .

### 3.3 Atributos químicos e microbiológicos do solo

Para fósforo (P), matéria orgânica (MO) e potássio (K) foram observadas diferenças estatísticas entre as doses de MA e BC (Tabela 6). O pH do solo aumentou significativamente nas maiores doses BC, onde também se observou redução dos teores de alumínio (Al) trocável e na acidez potencial (H+Al) e aumento nos teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

**Tabela 6.** Valores médios para (fósforo (P), matéria orgânica (MO), pH, potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al) e alumínio (Al)), nas diferentes doses de macrófitas aquáticas (MA) e biocarvão (BC), valor de *p* e coeficiente de variação (CV).

FV	P	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al
	mg dm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub>	----- mmolc dm <sup>-3</sup> -----				
<b>MA</b>								
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	1,5a	8,7a	4,5a	0,10a	5,1a	2,2a	22,7a	4,7a
<b>16 t ha<sup>-1</sup></b>	1,7a	9,1a	4,5a	1,0a	5,2a	2,3a	21,7a	3,7a
<b>32 t ha<sup>-1</sup></b>	1,4a	11,0a	4,5a	1,1a	5,6a	2,8a	24,2a	3,4a
<b>BC</b>								
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	1,3a	8,8a	4,4b	0,10a	3,7b	1,8b	24,2b	5,7b
<b>15 t ha<sup>-1</sup></b>	1,5a	9,8a	4,4b	1,8a	4,9ab	2,4ab	24,4b	4,0ab
<b>30 t ha<sup>-1</sup></b>	1,7a	10,5a	4,5ab	1,0a	5,7ab	2,7ab	22,2ab	3,2a
<b>45 t ha<sup>-1</sup></b>	1,5a	9,2a	4,6a	0,9a	6,9a	2,9a	20,7a	2,9a
<b>p valor</b>								
<b>MA</b>	0,429 <sup>ns</sup>	0,051 <sup>ns</sup>	0,747 <sup>ns</sup>	0,561 <sup>ns</sup>	0,533 <sup>ns</sup>	0,085 <sup>ns</sup>	0,129 <sup>ns</sup>	0,076 <sup>ns</sup>
<b>BC</b>	0,510 <sup>ns</sup>	0,427 <sup>ns</sup>	0,013 <sup>*</sup>	0,542 <sup>ns</sup>	0,000 <sup>**</sup>	0,020 <sup>*</sup>	0,027 <sup>*</sup>	0,001 <sup>*</sup>
<b>MAxBC</b>	0,099 <sup>ns</sup>	0,511 <sup>ns</sup>	0,969 <sup>ns</sup>	0,567 <sup>ns</sup>	0,797 <sup>ns</sup>	0,458 <sup>ns</sup>	0,096 <sup>ns</sup>	0,349 <sup>ns</sup>
<b>CV (%)</b>	31	24	3	22	22	30	12	33

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey para  $p < 0,05$ . ns: valores não significativos; \* e \*\*: valores significativos a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ , respectivamente.

A avaliação da respiração basal do solo (RBS) resultou em diferença estatística entre as doses utilizadas, indicando que a presença ou ausência dos resíduos utilizados não promoveu alteração na atividade microbiana do solo, aos 12 anos após as intervenções (Tabela 7). Para o

carbono da biomassa microbiana (CBM), há uma tendência de influência positiva quando há aumento das doses de MA (16 e 32 Mg ha<sup>-1</sup>), sugerindo o potencial das doses mais elevadas de MA no aumento do carbono microbiano ( $p = 0,0592$ ). No entanto, as doses de BC não promoveram diferença estatística.

A avaliação da atividade da enzima  $\beta$ -glucosidase não evidenciou diferenças estatisticamente significativas entre as doses de MA e BC utilizadas (Tabela 7). A atividade enzimática da fosfatase ácida também apresentou tendência a aumento proporcional às doses de MA ( $p = 0,0565$ ), porém as doses de BC não produziram diferenças significativas.

**Tabela 7.** Valores médios de respiração basal do solo (RBS) o carbono da biomassa microbiana (CBM),  $\beta$ -glucosidase (BETA) e fosfatase ácida (FOSF) em diferentes doses de macrófita aquática (MA) e biocarvão (BC).

<b>FV</b>	<b>RBS</b>	<b>CBM</b>	<b>BETA</b>	<b>FOSF</b>
	$\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco dia <sup>-1</sup>	$\text{mg C g}^{-1}$ solo	- - - $\mu\text{g pnp g}^{-1}$ solo - - -	
<b>MA</b>				
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	3,10a	1,7a	4,5a	41a
<b>16 t ha<sup>-1</sup></b>	4,1a	2,4a	5,0a	41,7a
<b>32 t ha<sup>-1</sup></b>	5,3a	3,0a	5,1a	48,8a
<b>BC</b>				
<b>0 t ha<sup>-1</sup></b>	5,3a	2,9a	3,1a	38,9a
<b>15 t ha<sup>-1</sup></b>	4,1a	2,1a	4,8a	47,1a
<b>30 t ha<sup>-1</sup></b>	5,0a	1,9a	5,6a	44,2a
<b>45 t ha<sup>-1</sup></b>	3,4a	2,7a	5,0a	45,1a
<b>p valor</b>				
<b>MA</b>	0,2190 <sup>ns</sup>	0,0592 <sup>ns</sup>	0,7143 <sup>ns</sup>	0,0565 <sup>ns</sup>
<b>BC</b>	0,2159 <sup>ns</sup>	0,2581 <sup>ns</sup>	0,4829 <sup>ns</sup>	0,2313 <sup>ns</sup>
<b>MA x BC</b>	0,7197 <sup>ns</sup>	0,4713 <sup>ns</sup>	0,3953 <sup>ns</sup>	0,3847 <sup>ns</sup>
<b>CV(%)</b>	46	52	46	19

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey para  $p < 0,05$ .  
<sup>ns</sup>: valores não significativos; \* valores significativos a  $p < 0,05$ .

#### 4. DISCUSSÃO

Após 12 anos de intervenções, alguns resultados indicam que a área severamente degradada está avançando em seu processo de recuperação, embora ainda apresente limitações de áreas onde o subsolo se encontra à superfície, com baixa fertilidade e estrutura comprometida o que influencia negativamente a infiltração de água no solo e o restabelecimento da cobertura vegetal.

A elevada taxa de sobrevivência de *Hymenaea stigonocarpa* e seu crescimento independente da aplicação dos resíduos indicam que esta espécie possui alta tolerância a condições edáficas adversas, reforçando seu potencial para compor plantios de restauração em ambientes extremos do Cerrado. Tal comportamento é consistente com padrões ecológicos de espécies nativas que exibem resiliência ao estresse hídrico e nutricional (Boni; Maltoni; Mizobata, 2020; Klink *et al.*, 2020).

Além disso, *Astronium fraxinifolium* e *Hancornia speciosa* também apresentaram boa sobrevivência, embora dependentes das melhorias proporcionadas pelos resíduos, o que demonstra que espécies com diferentes estratégias funcionais respondem de maneira distinta às condições ambientais, como observado em trabalhos recentes sobre dinâmica da vegetação no Cerrado (Lira-Martins *et al.*, 2022).

Um dos resultados mais relevantes deste estudo foi a interação significativa entre as doses de macrófita aquática (MA) e biocarvão (BC) no incremento da cobertura vegetal. A combinação dos dois resíduos promoveu aumento na cobertura por herbáceas e gramíneas espontâneas, componente fundamental para manutenção de material orgânico na superfície, incrementando também a retenção de água e ciclagem de nutrientes. A MA, por se decompor rapidamente, forneceu nutrientes e carbono para a microbiota no início das intervenções em 2011, agora sua presença e quantidade são bem menores enquanto o BC pode ter contribuído para a retenção hídrica, ainda que de forma inicial. Essa combinação de materiais orgânicos ao *biochar* facilita e acelera a recuperação funcional do solo (Chagas *et al.*, 2024; Hu *et al.*, 2024).

Apesar do aumento no recobrimento vegetal, não foram observadas diferenças estatísticas na umidade e na temperatura do solo. Esse resultado pode estar associado ao momento das análises, realizado no final do período chuvoso, quando o solo ainda mantém umidade residual que reduz a variabilidade entre os tratamentos. Além disso, os efeitos dos resíduos orgânicos sobre temperatura e umidade tendem a depender entre outros da cobertura vegetal estabelecida da quantidade de cobertura vegetal estabelecida. No estudo, embora a combinação entre MA e BC tenha promovido um recobrimento aproximadamente cinco vezes superior ao tratamento controle (MA00+BC00), esse valor permaneceu baixo, com média de

cerca de 20% de cobertura. Essa porcentagem é insuficiente para produzir sombreamento, retenção hídrica e redução de temperatura capazes de modificar significativamente o microclima do solo, especialmente em uma área com alto grau de degradação, isto é, reduzidos teores de matéria orgânica, nutrientes, infiltração de água, circulação da atmosfera do solo (Jian *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2021).

O espaçamento adotado para o plantio das mudas ( $4 \times 5$  m) foi planejado para favorecer o recrutamento de espécies espontâneas; contudo, o baixo recobrimento obtido indica que a vegetação ainda não desempenha papel efetivo na melhoria das condições físico-hídricas do solo. Assim, mesmo diante de avanços provocados pela aplicação dos resíduos, a influência sobre temperatura e umidade permanece limitada devido ao estágio inicial de reconstrução da estrutura do solo e à reduzida cobertura vegetal no qual é influenciada pela deposição de resíduos à superfície como cobertura), sua capacidade de baixar a temperatura e manter a umidade.

A atividade microbiana reforça essa interpretação. Embora nem todos os resultados tenham sido estatisticamente significativos, observou-se tendência de aumento no carbono biomassa microbiana e na atividade da enzima fosfatase ácida nos tratamentos com MA, indicando que o aporte de matéria orgânica fornecido no momento da adição das macrófitas aquáticas favorece o desenvolvimento da microbiota (Boni *et al.*, 2022). Em contraste, o BC — apesar de seus benefícios estruturais — não promoveu aumentos imediatos na microbiota, o que condiz com estudos que indicam que seus efeitos sobre organismos do solo são graduais e dependem do acúmulo de matéria orgânica e da maior interação com raízes e exsudatos ao longo do tempo (Hu *et al.*, 2024).

Considerando o conjunto dos resultados, conclui-se que a área apresenta sinais de avanço tanto no componente vegetal quanto no biológico do solo, mas ainda demanda intervenções contínuas para consolidar melhorias estruturais e aumentar a resiliência. A combinação dos resíduos de macrófitas aquáticas e biocarvão, oriundo da queima do bagaço da cana-de-açúcar, se destaca como estratégia eficiente para acelerar o recobrimento e estimular a microbiota, o que deve ser recomendado como condicionantes de áreas de empréstimo e de áreas de mineração, que apresentam elevado grau de degradação. Entretanto, o pleno restabelecimento das propriedades físico-hídricas e da fertilidade do solo depende de maior acúmulo de biomassa, continuidade das adições orgânicas e favorecimento de espécies tolerantes capazes de estruturar o ambiente para seguir com o processo de recuperação e em um futuro, alcançar autossuficiência das funções desse ecossistema.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após 12 anos de intervenções, os indicadores avaliados — recobrimento vegetal, temperatura e umidade do solo, atributos químicos e microbiológicos — demonstram que a área ainda se encontra em estágio inicial de recuperação ecológica. O severo grau da degradação original ainda limita a reestruturação do solo, indicando que novas ações e intervenções contínuas são necessárias para impulsionar a regeneração espontânea e favorecer o estabelecimento da vegetação nativa.

Entre as espécies introduzidas, *Hymenaea stigonocarpa* destacou-se pela alta taxa de sobrevivência, evidenciando boa adaptação às condições adversas encontradas no subsolo exposto. A aplicação de biocarvão promoveu melhorias químicas importantes, elevando o pH, aumentando os teores de cálcio e magnésio e reduzindo a acidez potencial e o alumínio — fatores essenciais para reduzir toxidez e aumentar a resiliência do ecossistema.

Embora os resíduos tenham favorecido parcialmente o recobrimento vegetal, não houve efeitos significativos sobre umidade, temperatura e os atributos microbiológicos avaliados. Isso indica que, apesar do potencial das macrófitas aquáticas e do biocarvão, seus efeitos iniciais foram insuficientes para promover mudanças substanciais ao longo do tempo, em solos extremamente degradados, sobretudo devido à limitada cobertura vegetal formada. A limitação hídrica permanece como um dos principais entraves à recuperação. A escassez de água compromete germinação, estabelecimento de plântulas, atividade microbiana e ciclagem de nutrientes, ponto que merece destaque para possíveis novas intervenções na área.

Destaca-se, também, a importância do monitoramento contínuo, permitindo ajustes no manejo conforme as condições ambientais e respostas da área em processo de recuperação. Em um contexto de mudanças climáticas, eventos extremos podem comprometer ou reverter avanços, reforçando a necessidade de acompanhamento a longo prazo.

Assim, conclui-se que a área encontra-se em processo de recuperação, ainda distante de um estado ecologicamente estável, mas apresentando avanços promissores decorrentes da combinação de resíduos orgânicos e do uso de espécies nativas adaptadas às condições do Cerrado.

## 6. REFERÊNCIAS

- AQUINO, A. M.; SILVA, R. F.; MERCANTE, F. M.; CORREIA, M. E. F.; GUIMARÃES, M. F.; LAVELLE, P. Invertebrate soil macrofauna under different ground cover plants in the no-till system in the Cerrado. **European Journal of Soil Biology**, v. 44, p. 191-197, 2008.
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., E SPAROVEK, G. (2014). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ALVES, M. C.; NASCIMENTO, V. do; SOUZA, Z. M. de. Recuperação em área de empréstimo usada para construção de usina hidrelétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 16, n. 8, p. 887–893, 2012.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 21, n. 4, p. 471-479, 1989.
- BONI, T. S. Vegetação espontânea e atividade microbiana como indicadores da recuperação de uma área degradada no cerrado. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Agronomia, 107 p., 2017.
- BONI, T. S.; MALTONI, K. L.; MIZOBATA, K. K. G. da S. *Dipteryx alata* Seedlings Nutritional Status in a Recovery Area in the Brazilian Savannah. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. e20180125, 2020. DOI: 10.1590/2179-8087.012518.
- CARNEIRO, M. A. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.
- CHAGAS, Jhon Kenedy Moura et al. Seven-year effects of sewage sludge biochar on soil organic carbon pools and yield: Understanding the role of biochar on carbon sequestration and productivity. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 4, p. e70001, 2024.
- COSTA, A. O. I.; GODOY, H. Contribuição para conhecimento do clima e do solo de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 689-742, 1962.
- DEMATTE, J. L. I. **Levantamento detalhado de solos do “Campus Experimental de Ilha Solteira”**. 1980. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1980.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v. 37, n. 4, p. 529- 535, 2019.
- HU, W. *et al.* Biochar and organic fertilizer applications enhance soil functional microbial abundance and agroecosystem multifunctionality. **Biochar**, v. 6, n. 1, p. 3, 2024.
- JIAN, S. *et al.* Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 206, p. 85-96, 2015.

- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.
- KLINK, C. A. *et al.* The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1803, 2020.
- LAMARI, L. **ASSESS 2.0**: image analysis software for disease quantification. Saint Paul: APS, 2008.
- LIRA-MARTINS, D. *et al.* Soil properties and geomorphic processes influence vegetation composition, structure, and function in the Cerrado Domain. **Plant and Soil**, v. 476, n. 1, p. 549-588, 2022.
- MORAIS, E. R. C. *et al.* Avaliação de substrato de macrófita aquática para o crescimento de mudas de Jucá (*Libidibia ferrea*). **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e399985869-e399985869, 2020.
- MUÑOZ-ROJAS, M. *et al.* Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 24, p. S43-S52, 2016.
- MUÑOZ-ROJAS, M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, Amsterdam, v. 5, p. 47-52, 2018.
- OLIVEIRA, M. C. *et al.* Crescimento de espécies nativas em um plantio de recuperação de Cerrado sentido restrito no Distrito Federal. Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, n. 1, 2015.
- OLIVEIRA SILVA, Michelangelo *et al.* Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.
- PRADO, K. C. P. *et al.* Gestão e uso de cinzas vegetais provenientes da queima de bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras. **Revista Sapiência: sociedade, saberes e práticas educacionais** (2238-3565), v. 9, n. 3, p. 315-328, 2020.
- PELLIZZARO, K. F.; CORDEIRO, A.O. O.; ALVES, M.; MOTTA CP; REZENDE, G. M.; SILVA, R. R. P.; RIBEIRO, J. F.; SAMPAIO, A. B.; VIEIRA, D. L. M.; SCHIMIDT, I. B. “Cerrado” restoration by direct seeding: Field establishment and initial growth of 75 trees, shrubs and grass species. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, n. 3, p. 681–693, 2017.
- RAIJ, B. van. *et al.* **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.
- RAUPP, P.; CARRILLO, Y.; NIELSEN, U. N. Soil health to enhance ecological restoration and conservation. **Journal of Sustainable Agriculture and Environment**, v. 3, n. 4, p. e70022, 2024.
- RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração

do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 73-80, 2007.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p.

SENA, K. N.; BONI, T. S.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R.; PEREIRA, E. I. P. **Aremoção pós-colheita de resíduos de eucalipto reduz a agregação do solo e as atividades biológicas na região centro-oeste do Brasil**. *Sustentabilidade*. v. 15, n. 11, p. 8790, 2023.

SOUZA, G. F. *et al.* Herbaceous-shrub species composition, diversity and soil attributes in moist grassland, shrub grassland and savanna in Central Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 44, n. 1, p. 227-238, 2021.

BONI, T. S. *et al.* Biomass residues improve soil chemical and biological properties reestablishing native species in an exposed subsoil in Brazilian Cerrado. **PloS one**, v. 17, n. 6, p. e0270215, 2022.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W. *et al.* (eds.) **Methods of soil analysis: Part2. Microbiological and biochemical properties**, Madison, Soil Science Society of America, 1994. v. 5. p.775-833.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos e análises de solo**. 3. ed. revisada e ampliada. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – Unesp. Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira. Área de Hidráulica e Irrigação. **Canal CLIMA da Unesp Ilha Solteira**. Disponível em: <https://clima.feis.unesp.br/login.php>. Acesso em: 17 nov. 2025.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology Biochemistry**, Kidlington, v. 19, p. 703–707, 1987.