

**BRAQUIÁRIA, BIOCÁRVÃO E MICRORGANISMOS - INFLUÊNCIA NOS  
ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO**

por

**OLERIANA SANTOS DE SOUSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Bioenergia e Grãos.

Rio Verde – GO

Outubro -2024

**BRAQUIÁRIA, BIOCARVÃO E MICRORGANISMOS - INFLUÊNCIA NOS  
ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO**

por

**OLERIANA SANTOS DE SOUSA**

Comitê de Orientação:

Romano Roberto Valicheski, Prof. Dr. – IF Goiano

Andreia de Oliveira Vieira, Profa. Dra. – IFMT

Sihélio Júlio Silva Cruz – Prof. Dr. – IF Goiano

S725b Sousa, Oleriana Santos de

Braquiária, biocarvão e microrganismos – influência nos atributos químicos e biológicos do solo / Oleriana Santos de Sousa; orientador Romano Roberto Valicheski. – Rio Verde, 2024.

43 f.

Dissertação (Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos.) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, campus Rio Verde.

1. Planta de cobertura. 2. Manejo sustentável. 3. Sequestro de C. I. Vieira, Andreia de Oliveira (co-orient.). II. IFGoiano III. Título.

CDU 633.2

Responsável: Ítala Moreira Alves (Bibliotecário-documentalista CRB-1 nº 2772)  
Sistema Integrado de Bibliotecas – Instituto Federal Goiano



Ata nº 91/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**  
**ATA Nº 89 (OITENTA E NOVE)**  
**BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Aos seis dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14h00min (quatorze horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada via webconferência, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **OLERIANA SANTOS DE SOUSA**, discente do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida à autora da Dissertação que, em 30 min, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu a examinada, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM BIOENERGIA E GRÃOS**, na área de concentração Agroenergia, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGBG da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

**Membros da Banca Examinadora**

<b>Nome</b>	<b>Instituição</b>	<b>Situação no Programa</b>
Romano Roberto Valicheski	IF Goiano – Campus Iporá	Presidente
Sihelio Julio Silva Cruz	IF Goiano – Campus Iporá	Membro interno
Andreia de Oliveira Vieira	IFMT – Campus Juína	Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- Andreia de Oliveira Vieira, 015.229.361-22 - Usuário Externo, em 06/09/2024 15:48:02.
- Sihelio Julio Silva Cruz, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 06/09/2024 15:46:02.
- Romano Roberto Valicheski, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 06/09/2024 15:44:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/09/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 630863  
Código de Autenticação: 9c55bfb79





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 59/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

BRAQUIÁRIA, BIOCARVÃO E MICRORGANISMOS - INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO

Autora: Oleriana Santos de Sousa  
Orientador: Romano Roberto Valicheski

TITULAÇÃO: Mestre em Bioenergia e Grãos - Área de Concentração Agroenergia

APROVADA em 06 de setembro de 2024.

*Assinado eletronicamente*  
Profa. Dra. Andreia de Oliveira Vieira  
Avaliadora externa - IFMT Campus  
Juína

*Assinado eletronicamente*  
Prof. Dr. Sihelio Julio Silva Cruz  
Avaliador interno - IF Goiano Campus  
Iporá

*Assinado eletronicamente*  
Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski  
Presidente da Banca - IF Goiano Campus Iporá

Documento assinado eletronicamente por:

- Andreia de Oliveira Vieira, 015.229.361-22 - Usuário Externo, em 06/09/2024 15:51:04.
- Sihelio Julio Silva Cruz, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/09/2024 15:48:54.
- Romano Roberto Valicheski, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/09/2024 15:47:27.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/09/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 630862  
Código de Autenticação: 19d40df12f



## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado)                  | <input type="checkbox"/> Artigo científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização)       | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação)                   | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

### RESTRICÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano:  /  /

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local

/  /

Data



Documento assinado digitalmente  
OLERIANA SANTOS DE SOUSA  
Data: 04/10/2024 13:52:36-0300  
verifique em <https://validar.if.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



Documento assinado digitalmente  
ROMANO ROBERTO VALICHESKI  
Data: 04/10/2024 13:38:09-0300  
verifique em <https://validar.if.gov.br>

## AGRADECIMENTOS

A Ruah divina que habita em mim.

Aos meus pais, que são exemplos de vida, por sempre me incentivarem aos estudos.

A minha esposa e acima de tudo companheira Quézia Pereira Borges da Costa por seus atos e palavras de incentivo, dedicação e apoio ao me acompanhar nas trajetórias de crescimento pessoal e profissionalmente.

Ao meu orientador Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski, por desde o primeiro contato, apesar da distância física, ser compreensivo e presente diante de minhas dúvidas e demandas, por tamanha contribuição nas orientações ao longo do programa de mestrado.

A minha coorientadora Prof. Dra. Andreia de Oliveira Vieira, uma mulher inspiradora, por sua disponibilidade pessoal, intelectual e profissional, desde a primeira vez que compartilhei o desejo por fazer o mestrado. Sem você, este projeto que está se concretizando não passaria de uma vontade. Obrigada por torná-lo realidade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Sihélio Júlio Silva Cruz, por também contribuir neste projeto.

As alunas e alunos bolsistas e voluntários, que também colaboraram na realização das diversas etapas deste trabalho.

Ao Instituto Federal Goiano por meio do Programa de Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos e ao Instituto Federal de Mato Grosso campus Campo Novo do Parecis, por disponibilizar estrutura e investir em minha formação profissional.

## SUMÁRIO

	Páginas
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais .....	9
INTRODUÇÃO .....	9
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	17
CAPÍTULO 2 – Braquiária, biocarvão e microrganismos - influência nos atributos químicos e biológicos do solo .....	22
CHAPTER 2 – Brachiaria, biochar and microorganisms - influence on chemical and biological attributes of the soil .....	22
INTRODUÇÃO .....	23
MATERIAL E MÉTODOS .....	24
Manejo experimental: safra 22/23 .....	25
Manejo experimental: safra 23/24 .....	27
Análises biológicas e químicas .....	27
Análise estatística .....	28
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

## **CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais**

### **INTRODUÇÃO**

Estima-se que 32 milhões de pessoas no mundo sofram de insegurança alimentar, situação agravada ainda mais pelos impactos da variabilidade extrema do clima sobre áreas agrícolas, com relatos de queda da média nas colheitas de cereais por diversos países (Holleman *et al.* 2018). No Brasil, os problemas climáticos advindos do atraso na regularização de chuvas no início da janela de plantio e as baixas precipitações durante parte do ciclo das lavouras na safra 23/24 na maioria das regiões produtoras de grãos, provocou a redução de 6,7% na produção, sobretudo nas lavouras de milho segunda safra e na soja (Conab 2024).

Diante de tais desafios, faz-se necessária a adoção de sistemas de produção que auxiliem as culturas nos momentos de variabilidade climática. Dentre as opções, tem-se a rotação de culturas com diversas alternativas de plantas, entre elas, as braquiárias. Que possuem sistemas radiculares profundos, volumosos, ramificados e agressivos, capazes de penetrar as camadas compactadas, que ao morrerem e se decomporem, deixam canais, pelo quais as raízes das culturas subsequentes poderão explorar para aprofundar o sistema radicular, aumentam a absorção de água e nutrientes, é o grupo de plantas mais utilizados para rotação de culturas (Oliveira *et al.* 2015). Além disso, produzem elevada quantidade de palha, pela sua alta adaptabilidade em ambientes e condições climáticas distintas, possibilitando desenvolver tanto o sistema radicular como do aéreo, de forma a contribuir na ciclagem de nutrientes (Alvarenga *et al.* 2001).

O cultivo desta espécie integrada a outras práticas de manejos promove a melhoria da qualidade química, física e biológica do solo quando comparada aos sistemas de monocultura e pastagens de baixa produtividade (Silva *et al.* 2016). Por contribuir no incremento da fração

leve da matéria orgânica do solo, serve como fonte de alimento para diversidade de microrganismos já existentes ali, bem como dos inoculados, intensificando as ações positivas desta comunidade, que desempenha funções insubstituíveis nos ciclos biogeoquímicos dos nutrientes, como na transformação dos resíduos vegetais e nas substâncias húmicas presentes na matéria orgânica do solo.

O uso do biocarvão também pode integrar as práticas de manejos, estudos descrevem que este é um produto com potencial corretivo do solo, cujo valor agronômico tem como principal característica a forte capacidade de adsorção, grande área de superfície específica, estrutura porosa única, fonte de fertilizante que permite aumentar a produção agrícola (Wisnubroto *et al.* 2017, Cheng *et al.* 2017, Yu *et al.* 2019). Além de contribuir para melhorar a textura, porosidade e estrutura do solo, facilita a penetração das raízes, aumenta a retenção de água no solo e a absorção pelas plantas. Embora os efeitos da adição do biocarvão variem muito entre culturas, solos e tipos de biocarvão (Faloye *et al.* 2019).

Deste modo, este trabalho teve por objetivo avaliar como o cultivo de braquiária, associado ao uso de biocarvão e microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP's) influenciam no solo a atividade enzimática, o teor das substâncias húmicas que compõem a matéria orgânica e a capacidade de sequestrar carbono (C), buscando identificar sistemas de manejos mais promissores e sustentáveis.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Variadas espécies de plantas de cobertura vêm sendo cultivadas nas diferentes regiões agrícolas do Brasil como opções para rotações de culturas nos sistemas de produção de grãos, entre elas destacam-se as leguminosas: *Crotalaria juncea*, *spectabilis* e *ochroleuca*, feijão-deporco (*Canavalia ensiformis*), feijão-guandu (*Cajanus cajan*), além de gramíneas como o milheto (*Pennisetum glaucum*), sorgo (*Sorghum bicolor*) e as braquiárias, principalmente as do gênero *Urochloa brizantha*, *U. decumbens*, *U. ruziziensis* (Carvalho *et al.* 2006, Carvalho *et al.* 2022).

Horrocks *et al.* (2019) ao estudarem alguns gêneros de gramíneas, observaram o potencial da braquiária em melhorar as propriedades físicas do solo, além de influenciar positivamente na sanidade. Entre as braquiárias, a *U. brizantha* cv. Marandu possui adaptação a solos de média a alta fertilidade, elevado potencial de produção de biomassa, tolerância a altas temperaturas e a déficit hídrico (Pereira *et al.* 2016, Carvalho *et al.* 2022).

O aporte de fitomassa no solo proporcionado por esta planta promove estabilidade de agregados (Martuscello *et al.* 2018, Paiva Filho *et al.* 2021), aumento da porosidade (macro e microporosidade) reduzindo as perdas de solo e água por escoamento superficial, o que contribui para a manutenção da umidade do solo e maior infiltração de água (Fidalski 2015). Seu sistema radicular com desenvolvimento agressivo altera a ciclagem de nutrientes no solo (Zolin *et al.* 2021), modifica os atributos químicos (Laroca *et al.* 2018, Viaud *et al.* 2018), físicos (Reis *et al.* 2021) e biológicos (Bonetti *et al.* 2018, Ortiz *et al.* 2019).

O aporte de matéria orgânica após a decomposição da parte aérea e raízes das braquiárias, aumenta processos de cimentação de partículas do solo, resultando em maior estabilidade de agregados e formação de bioporos que surgem a partir da decomposição das raízes, e esses

canais são benéficos para as culturas sucessoras ao permitir aprofundar as raízes e aumentar a absorção de água e nutrientes (Carvalho *et al.* 2022).

Além disso, conforme manejo adotado, essa planta de cobertura possui elevada capacidade de sequestrar o CO<sub>2</sub> atmosférico (Zolin *et al.* 2021), tornando uma alternativa promissora para aumentar a sustentabilidade do sistema produtivo (Leão *et al.* 2021). A introdução dessas gramíneas nos sistemas agrícolas, principalmente quando cultivadas na segunda safra, estabelece nova condição de equilíbrio ao solo, por causa dos restos culturais que se decompõem mais lentamente (Gazola *et al.* 2017), ajuda a preservar a umidade do solo, e por aumentar a estabilidade dos agregados e o acúmulo de carbono orgânico, influencia diretamente na atividade de comunidades microbianas em solos, atividade enzimática, ciclagem e liberação de nutrientes (Heather 2020).

Assim como as braquiárias, outro recurso benéfico ao solo é a inserção do biocarvão nos manejos agrícolas, já que este produto além de atuar como excelente fonte de sequestro de C no solo, age como condicionador. É fonte de nutrientes, melhora as propriedades microbiológicas, promove a retenção de água (Sohi *et al.* 2010), auxiliando as plantas em período de estiagem, promovendo rendimentos das culturas agrícolas. Embora, estes benefícios estejam relacionados a diferentes critérios, tais como: tipo de material do qual será produzido o biocarvão, o tempo e temperatura de pirólise, quantidades aplicadas e as características físicas e químicas inerente do solo.

Quanto a fonte, todo material de origem vegetal ou animal pode ser transformado em biocarvão, como resíduos de árvores ou de culturas agrícolas, dejetos sólidos de animais e até mesmo reaproveitamento de resíduos industriais (Sousa 2018). Nessa perspectiva, a indústria sucroalcooleira, por causa das grandes quantidades de subprodutos gerados, destaca-se como fonte de matéria-prima para a produção de biocarvão, tendo em vista que a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar podem ser obtidos 280 kg de bagaço, 20 a 40 kg de torta de filtro

com cerca de 75% de umidade e sendo utilizada como fertilizante, rica fonte de fósforo e concentração de matéria orgânica da ordem de 50% a 60% (Alcarde 2022).

Quanto a pirólise, que é a queima de resíduos orgânicos sob altas temperaturas (300–700°C) e pressões na ausência de oxigênio (Dungait *et al.* 2012), pode ser caracterizada como lenta, e a biomassa é degradada em baixas ou médias temperaturas, em condições sem oxigênio, enquanto, a rápida baseia-se no aquecimento acelerado da biomassa, que origina um biocarvão em baixa proporção (Lehmann & Stephen 2015).

No entanto, estudar o efeito da aplicação de biochar em toda a extensão é impossível durante a vida humana, devido à resistência relatada do biocarvão à decomposição microbiana e à persistência no solo por até 100-1000 anos (Spokas 2010), tem-se a incerteza de quanto tempo os efeitos da aplicação do biocarvão pode perdurar no solo, sendo este efeito variável (Jeffery *et al.* 2011). Deste modo, torna-se crucial compreender as mudanças nos parâmetros do húmus, após a aplicação do carvão (Simansky *et al.* 2024), sendo necessário mais pesquisas relacionadas ao uso e interação com as culturas as quais estão associadas, os efeitos nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e compreender a eficiência desta nova prática de manejo quando comparada às tradicionais.

Já é conhecido que a adição de biocarvão pode produzir o efeito de *priming* no solo, que é caracterizado por mudança sinérgica nas taxas de mineralização do Carbono Orgânico (CO) inserido a partir de substrato orgânico (Kuznyakov 2002). Quando o efeito de *priming* é positivo, ocorre perda acelerada do CO<sub>2</sub>, pela adição de substrato orgânico exógeno que quando aplicados ao solo estimulam as atividades microbianas (Yan *et al.* 2023, Zhou *et al.* 2023). Já o efeito *priming* negativo ocorre quando os microrganismos do solo deixam de processar o CO, dando preferência a substratos orgânicos frescos, facilmente disponíveis (troca de substrato), retardando a decomposição do CO (Guenet *et al.* 2010).

Após uma meta-análise, Wang *et al.* 2016 concluíram que geralmente o efeito *priming* no solo é negativo quando se aplica biocarvão, principalmente os obtidos por meio de restos culturais que passaram por pirólise rápida com temperaturas de até 475°C e doses inferiores a 20 t ha<sup>-1</sup>, resultando em mais quantidade de C que permanecerá no sistema de produção, possibilitando uma estratégia no sequestro de C no solo. Todavia, as incertezas em relação ao efeito *priming* seja ele positivo ou negativo é influenciado pela aplicação de biocarvão na mineralização do CO, sendo dependente de fatores como a matéria-prima, temperatura de pirólise, duração experimental, taxa de aplicação e as propriedades do solo (Rasul *et al.* 2022, Wang *et al.* 2020), em especial a propriedade biológica atuante no processamento dos substratos orgânicos.

A comunidade microbiana tem grande atuação neste processamento, que permite a mobilização e transporte de nutrientes para a planta, a fixação de nitrogênio e solubilização/mineralização de fósforo, aumento da área de absorção das raízes, produção de fito-hormônios e de compostos orgânicos voláteis que estimulam o desenvolvimento vegetal e proteção das plantas contra patógenos (Gomes *et al.* 2016).

O conhecimento e a avaliação dos processos em que a comunidade microbiana está envolvida são etapas importantes na escolha de sistemas de manejo com vista a conservação do solo (Simon *et al.* 2017). Tais manejos, configuram-se como recurso biotecnológico alinhado aos interesses de diminuição dos custos de produção e elevação da sustentabilidade na agricultura, como por exemplo, a inoculação de microrganismos com capacidade de promover o crescimento vegetal ou que atuam como agentes de controle biológico de pragas e doenças (Mendes *et al.* 2013).

Para acompanhar a eficiência da microbiota, pode-se acompanhar a atividade enzimática do ambiente. Este indicador biológico que é utilizado para o monitoramento da saúde e qualidade do solo, permite o acesso a memória por meio do somatório da atividade de enzimas

dos organismos vivos presentes e de comunidades microbianas que ali estiveram presentes (Mendes *et al.* 2020), respondendo aos manejos agrícolas adotados. Dentre as enzimas utilizadas como indicadores, destaca-se a  $\beta$ -glicosidase e a arilsulfatase, as quais estão presentes em processos-chave da bioquímica do solo (Lopes *et al.* 2013).

A  $\beta$ -glicosidase é uma enzima que atua como catalisadora na etapa final do processo de decomposição da celulose, hidrolisa o resíduo de celobiose, libera ao final do processo açúcares simples que serão fonte de energia para os microrganismos, de forma a existir estreita relação entre a atividade desta enzima, com o processo de decomposição dos resíduos vegetais, transformando-os em Matéria Orgânica do Solo (MOS) (Chaves *et al.* 2024, Stieven *et al.* 2020).

Já as arilsulfatases são enzimas responsáveis pela liberação de enxofre (S) presente nas formas orgânicas no solo, catalisam a hidrólise de ésteres de sulfato disponibilizando as plantas e microrganismos para ser utilizada em processos metabólicos (Chaves *et al.* 2024). A atividade desta enzima pode ser variável por depender da espécie de planta cultivada, tipo e uso do solo, mudanças no pH, manejo da fertilidade ou solo com contaminação por metais pesados (Wyszkowska *et al.* 2016).

Segundo Mendes *et al.* (2020), um solo saudável possui a microbiota ativa, é produtivo, sendo capaz de armazenar água, sequestrar carbono e promover a degradação de pesticidas, entre outros importantes serviços ambientais. Parte destes atributos têm estreita relação com a MOS, que é influenciada diretamente pelas enzimas do solo, sendo determinante para a qualidade do solo e rendimento de grãos, e que conseqüentemente, influencia no aspecto econômico das culturas e na sustentabilidade dos negócios agrícolas (Lopes *et al.* 2013).

A braquiária é uma espécie vegetal amplamente utilizada na região Centro-Oeste, tanto para produção de forragem em sistemas integrados de produção, quanto para produção de palhada com foco na proteção do solo. Deste modo, torna-se relevante conhecer de que forma

seu cultivo, após ou associada a manejos produtivos sustentáveis como o uso de biocarvão, microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP's) afeta a atividade enzimática, o teor de matéria orgânica e as frações químicas que a compõem, bem como, o impacto no ciclo do C no solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcarde, A.R. 2022.** Processamento da cana-de-açúcar: outros produtos. EMBRAPA. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/home> 2022. Ago 2024
- Alvarenga, R. C., W.A.L. Cabezas, J.C. Cruz & D.P. Santana. 2001.** Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. Informe Agropecuário, 22: 25-36. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/485005>. Jun. 2024.
- Bonetti, J.A., H.B. Paulino, E.D. Souza, M.A.C. Carneiro & J.O. Caetano. 2018.** Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 53:1239-1247. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001100006>
- Carvalho, M.L., B.S. Vanolli, B.E. Schiebelbein, D.A. de Borba, F.B. da Luz, G.M. Cardoso, L.S. Bortolo, M.E.M. Marostica & V.S. Souza. 2022.** Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo. Piracicaba-SP, ESALQ-USP. 126p. <https://doi.org/10.11606/978658972215>
- Carvalho, A.M., Amabile, R.F. 2006.** Cerrado: adubação verde. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados. 369 p.
- Chaves, V.B.S., T.M. Guimarães, A.C.T. P. Bezerra, C.H.M. da Costa & S.C.S. Cruz. 2024.** Enzymatic activity in different crop succession systems in the cerrado region. Agronomy. 14: 810. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040810>
- Cheng, H., D.L. Jones, P. Hill, M.S. Bastami, & C.L. Tu. 2017.** Influence of biochar produced from diferente pyrolysis temperatures on nutrient retention and leaching. Arch Agron Soil Sci. 64:850-859. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1384545>
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. 2024.** Acompanhamento da safra brasileira grãos, safra 2023/24– **Nono Levantamento**, Brasília, p.1-98. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Jun. 2023.
- Dungait, J.A.J., D.W. Hopkins, A.S. Gregory & A.P. Whitmore. 2012.** Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. Global Change Biology. 18:1781–1796. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x>
- Faloye, O.T., M.O. Alatise, A.E. Ajayi & B.S. Ewulo. 2019.** Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation. Agricultural Water Management. 217: 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.044>
- Fidalski, J. 2015.** Qualidade física de Latossolo Vermelho em sistema de integração Lavoura-Pecuária após cultivo de soja e pastejo em braquiária. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 50: 097-104. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001100013>

- Gazola, R.N., L.M.M. Melo, R.P. Dinalli, M.C.M. Teixeira & T.S. Celestrino. 2017.** Cultura da soja em sucessão ao cultivo de milho em consórcio com braquiárias. *Cultura Agrônômica*. 26: 225-236. <https://doi.org/10.32929/2446-8355.2017v26n3p225-236>
- Gomes, E.A., U.C. Silva, C.A. Oliveira. 2016.** Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas. Documento 208: Embrapa Milho e Sorgo. 51p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161283/1/doc-208.pdf>. Mai. 2024
- Guenet, B., J. Leloup, X. Raynaud, G. Bardoux & L. Abbadie. 2010.** Negative priming effect on mineralization in a soil free of vegetation for 80 years. *European Journal of Soil Science*. 61: 384–391. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01234.x>
- Heather, T. 2020.** Winter cover crops and no till management enhance enzyme activities in soybean field soils. *Pedobiologia*. 81–82, 150666. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150666>
- Holleman, C., F. Rembold, O. Crespo & V. Conti. 2018.** The impact of climate variability and extremes on agriculture and food security – An analysis of the evidence and case studies. Background paper for The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. FAO Agricultural Development Economics Technical Study, Rome. 4 108p. <https://doi.org/10.4060/cb2415en>.
- Horrocks, C.A., J. Arango, A. Arévalo, J. Nuñez, J.A. Cardoso & J.A. Dungait. 2019.** Smart forage selection could significantly improve soil health in the tropics. *The Science of the Total Environment*. 688:609-621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.152>
- Jeffery, S., F.G.A. Verheijen, M. Van Der Velde & A.C. Bastos. 2011.** A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture Ecosystem Environment*. 144: 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Kuzyakov, Y. 2002.** Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. *Plant Nutr. Soil Sci*. 165: 382–396. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-%23)
- Laroca, J.V.S., J.M.A Souza, G.C. Pires, G.J.C. Pires, L.P. Pacheco, F.D. Silva, F.J. Wruck, M.A.C. Carneiro, L.S. Silva & E.D. Souza. 2018.** Qualidade do solo e produtividade da soja em sistema integrado lavoura-pecuária em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 53:1248-1258. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/26419/14333>. Jun 2024.
- Leão, A., A. Fortes, C.A. Zolin, J. Mangueira, M.A.A. Colmanetti & S.V. Cuadra. 2021.** Recuperação de solos degradados no Cerrado - alternativas para produção sustentável. 59p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1137292>. Jun 2024.
- Lehmann, J. & J. Stephen. 2015.** Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann, J. & J. Stephen. *Biochar for Environmental Management*. New York, NY, Routledge, 166p. <https://doi.org/10.4324/9780203762264-8>

- Lopes, A.A.C., D.M.G. de Sousa, G.M. Chaer, F.B.R. Junior, W.J. Goedert & I. de C. Mendes. 2013.** Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. *Soil Science Society of America Journal*. 77: 461–472. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>
- Martuscello, A.Y., Y.N. Ribeiro, T.G.S. Braz, M.R. Ferreira, J.A. Assis, L. Jank, & G.A. Reis. 2018.** Produção de forragem, morfogênese e eficiência agrônômica do adubo em capim BRS quênia sob doses de nitrogênio. *Boletim de Industria Animal*. 75: 1-12. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1101542>. Jun 2024.
- Mendes, I. C., G.M. Chaer, D.M.G. de Sousa, F.B. dos Reis Junior, O.D. Dantas, M.I.L. de Oliveira & L.M. de Souza. 2020.** Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. *Nutrição De Plantas Ciência e Tecnologia*. 8: 1-11. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1128778/bioanalise-de-solo-a-mais-nova-aliada-para-a-sustentabilidade-agricola>. Jun 2024.
- Mendes, R., P. Garbeva & J.M. Raaijmakers. 2013.** The rhizosphere microbiome: significance of plant-beneficial, plantpathogenic and human-pathogenic microorganisms. *Microbiology Reviews*. 37: 634-663. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>
- Oliveira, P., J. Kluthcouski, E. Borghi, G. Ceccon & G.S.A Castro. 2015.** Atributos da braquiária como condicionador de solos sob integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta, p. 333-353 In: Cordeiro, L. A. M.; L. Vilela, J. Kluthcouski & R.L. Marchão, (ed.). *Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. Brasília, DF: Embrapa, 393 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1022418> . Jun. 2024.
- Ortiz, D.C., M.A.B. Santos, L.C.I. Oliveira Filho, P.N. Pompeo, J.C. Niemeyer, O.K. Filho, C.R.D.M. Baretta, J.A. Sampietro & D. Baretta. 2019.** Diversity of springtails (Collembola) in agricultural and forest systems in Southern Santa Catarina. *Biota Neotropica*. 3:611-720. <http://dx.doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2018-0720>
- Paiva Filho, S.V., R.L.M Tavares, C.S. Ferreira, T.P. Gonçalo & J.F. Silva Júnior. 2021.** Atributos físicos do solo em área com capim brizantha e ruziziensis. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*. 11:366-374. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/download/12846/6992>. Jul 2024.
- Pereira, A., V.D,S.C, Paciullo, C.A.M. Gomide, & F.J.S. Lédo. 2016.** Catálogo de forrageiras recomendadas pela Embrapa. In EMBRAPA: 76 p.
- Rasul, M., J. Cho, H. S. Shin & J. Hur. 2022.** Biochar-induced priming effects in soil via modifying the status of soil organic matter and microflora: A review. *Science of the Total Environment*. 805: 150304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150304>
- Reis, J.C., G.S. Rodrigues, I. Barros, R.A.R. Rodrigues, R.D. Garrett, J.F. Valentim, M.Y.T. Kamol, M. Michetti, F.J. Wruck, S. Rodrigues Filho, P.E.O Pimentel & S.**

- Smukler. 2021.** Integrated crop-livestock systems: A sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. *Journal of Cleaner Production*. 283, e124580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124580>
- Silva, A.R., A. Sales & C.A.C. Veloso, 2016.** Atributos financeiros e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. *Rev Agrotec*. 37: 96–104. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1052980> Ago 2024.
- Simansky, V., J. Horák & M. Lukac. 2024.** Addition of Biochar and Fertiliser Drives Changes in Soil Organic Matter and Humic Substance Content in Haplic Luvisol. *Land*. 13: 481. <https://doi.org/10.3390/land13040481>
- Simon, C. A., M.S. Cordeiro, S.F. Lima, M.S. Brasil, C.H. David & V.A. Secco. 2017.** Microbial activity in a soil with cover crops in succession with maize in a no-tillage system. *Brazilian Journal of Agriculture*. 92: 198-207. <https://doi.org/10.37856/bja.v92i2.3210>
- Sohi, S.P., E. Krull, E. Lopez-Capel & R. Bol. 2010.** A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. p.47-82. In: Donald, L. S. (ed.). *Advances in Agronomy: Academic Press*, 267p. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Sousa, H.M.** Caracterização e efeitos de biocarvões para uso agrônômico em solo arenoso. 150p. Tese de Doutorado. UFMT. Cuiabá, 2018. Disponível em: [https://ri.ufmt.br/bitstream/1/2378/1/TESE\\_2018\\_Heiriane%20Martins%20Sousa.pdf](https://ri.ufmt.br/bitstream/1/2378/1/TESE_2018_Heiriane%20Martins%20Sousa.pdf) Ago 2024.
- Spokas, K.A. 2010.** Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*. 1: 289–303. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.32>
- Stieven, A.C., W.M. Mendes, F. Wruck, E.G. Couto & D.T.S. Campos. 2020.** Atributos do solo em sistemas diferenciados de uso e manejo do solo em Mato Grosso, MT, Brasil. *Colloquium Agrariae*.16: 1–15. <https://doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n2.a354>
- Viaud, V., P. Santillàn-Carvantes, N. Akkal-Corfini, C. Guillou, N.C. Prévost-Bouré, L. Ranjard & S. Menasseri-Aubry. 2018.** Landscape-scale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming. *Agriculture, Ecosystems e Environment*. 265: 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.018>
- Yu, H., W. Zou, J. Chen, H. Chen, Z. Yu, J. Huang, H. Tang, X. Wei & Gao, B. 2019.** Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management*. Academic Press. 232: 8-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.117>
- Wang, H., W. Zhang, L. Chen, Q. Xu, Y. Jiang & B. Sun. 2020.** Biochar induced negative priming effect on soil organic carbon mineralisation by changing the microbial community structure across plant growth stages. *Journal of Soils and Sediments*. 20: 3340–3350. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02662-8>

- Wang, J., Z. Xiong & Y. Kuzyakov. 2016.** Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *Bioenergy*. 8: 512–523.  
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12266>
- Wisnubroto, E.I., W.H. Utomo & E.R. Indrayatie. 2017.** Residual effect of biochar on growth and yield of red chili (*Capsicum Annum L.*). *J Agric Sci Technol*. 4:28-31.  
<https://doi.org/10.18178/joaat.4.1.28-31>
- Wyszkowska, J., K. Wiczorek & J. Kucharski. 2016.** Resistance of arylsulfatase to contamination of soil by heavy metals. *Polish Journal of Environmental Studies*. 25: 365–375. <https://doi.org/10.15244/pjoes/60417>
- Yan, S., L. Yin, F.A. Dijkstra, P. Wang & W. Cheng. 2023.** Priming effect on soil carbon decomposition by root exudate surrogates: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*. 178: 108955. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108955>
- Zhou, S., J. Lin, P. Wang, P. Zhu & B. Zhu. 2023.** Resistant soil organic carbon is more vulnerable to priming by root exudate fractions than relatively active soil organic carbon. *Plant and Soil*. 488: 71–82. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05288-y>
- Zolin, C.A., E.S. Matos, C.A.S. Magalhães, J. Paulino, R. Lal, S.T. Spera & M. Behling. 2021.** Short-term effect of a crop-livestock-forestry system on soil, water and nutrient loss in the Cerrado-Amazon ecotone. *Acta Amazonica*. 51:102-112.  
<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202000391>

## **CAPÍTULO 2 – BRAQUIÁRIA, BIOCARVÃO E MICRORGANISMOS - INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO**

**RESUMO:** Os atributos químicos e biológicos do solo influenciam diretamente na produção das culturas. Assim, o objetivo neste experimento foi avaliar como o cultivo da braquiária associada ao biocarvão e microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP's) influenciam esses atributos. O cultivo da braquiária ocorreu na safra 2022/23 após os seguintes tratamentos: soja / milho; soja + biocarvão / milho + plantas de cobertura; soja + biocarvão / milho; soja / milho + plantas de cobertura; soja + MPCP's / milho e soja + biocarvão + MPCP's / milho + plantas de cobertura. A amostragem de solo ocorreu em duas épocas (antes e depois do cultivo da gramínea) analisando a atividade enzimática, carbono orgânico e o fracionamento químico. Mesmo que por uma safra, a rotação de cultura com a braquiária beneficiou a microbiota do solo por meio do aumento na atividade enzimática na camada 0-10cm no solo, favoreceu os teores de ácido fúlvico, e conseqüentemente, incremento nas substâncias húmicas. Os estoques de C e MO também foram beneficiados por esta mudança no manejo do solo, de forma a propiciar a fixação de C.

**PALAVRAS-CHAVE:** planta de cobertura,  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase, manejo sustentável, sequestro de C

## **CHAPTER 2 – BRACHIARIA, BIOCHAR AND MICROORGANISMS - INFLUENCE ON CHEMICAL AND BIOLOGICAL ATTRIBUTES OF THE SOIL**

**ABSTRACT:** The chemical and biological attributes of the soil directly influence crop production. Thus, the objective of this experiment was to evaluate how the Brachiaria cultivation associated with biochar and plant growth promoting microorganisms (MPCPs) influence these attributes. Brachiaria cultivation occurred in the 2022/23 harvest after the following treatments: soybean/corn; soybean + biochar/corn + cover crops; soybean + biochar/corn; soybean/corn + cover crops; soybean + MPCPs/corn and soybean + biochar + MPCPs/corn + cover crops. Soil sampling took place at two times (before and after grass cultivation) analyzing enzymatic activity, organic carbon and its chemical fractionation. Even for one season, crop rotation with Brachiaria benefited the soil microbiota by increasing enzymatic activity in the soil layer of 0-10 cm, favoring fulvic acid levels and consequently increasing humic substances. C and OM stocks also benefited from this change in soil management, to promote C fixation.

**KEYWORDS:** cover crop,  $\beta$ -glucosidase, arylsulfatase, sustainable management, C sequestration

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de produção que envolvem o cultivo das grandes culturas necessitam cada vez mais de manejos que melhorem os componentes físicos, químicos e biológicos e permitam alcançar e manter altas produtividades, mas que tenham o menor impacto possível ao meio ambiente, principalmente quando se busca sequestrar carbono (C) no solo e reduzir as emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Neste foco, uma alternativa, para as demandas, pode ser através da rotação de culturas com plantas de cobertura, visto que possuem elevado potencial de sequestro de CO<sub>2</sub> no solo (Zolin *et al.*, 2021), contribuindo para o aumento da entrada de biomassa vegetal, que refletirá no acúmulo e estoque da matéria orgânica do solo, além de promover a ciclagem de nutrientes. Quando essas plantas são gramíneas, há o crescimento em profundidade de raízes diversificadas que promovem alterações na estrutura do solo, formando bioporos e agregados que regulam os fluxos de ar e água e a retenção de água no solo (Carvalho *et al.*, 2022).

Seja por meio da rotação de culturas ou pelo aproveitamento de resíduos agroindustriais o aporte de material orgânico ao solo é necessário para que mantenha os processos biológicos ativos. Tal manejo influencia diretamente na fertilidade do solo, dependente da matéria orgânica proveniente da decomposição e posterior humificação de resíduos, palhadas e outros insumos que podem auxiliar na disponibilidade de nutrientes no solo (Baldotto e Baldotto 2018). Durante tal transformação, tem-se a atuação indispensável dos microrganismos, seja eles nativos ou inseridos por meio da aplicação no solo como os microrganismos promotores de crescimento de plantas, nos processos metabólicos diversos como degradar estruturas lignificadas, solubilizar nutrientes ou produzir fitohormônios que auxiliem as plantas em condições de estresse (Gomes *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2022).

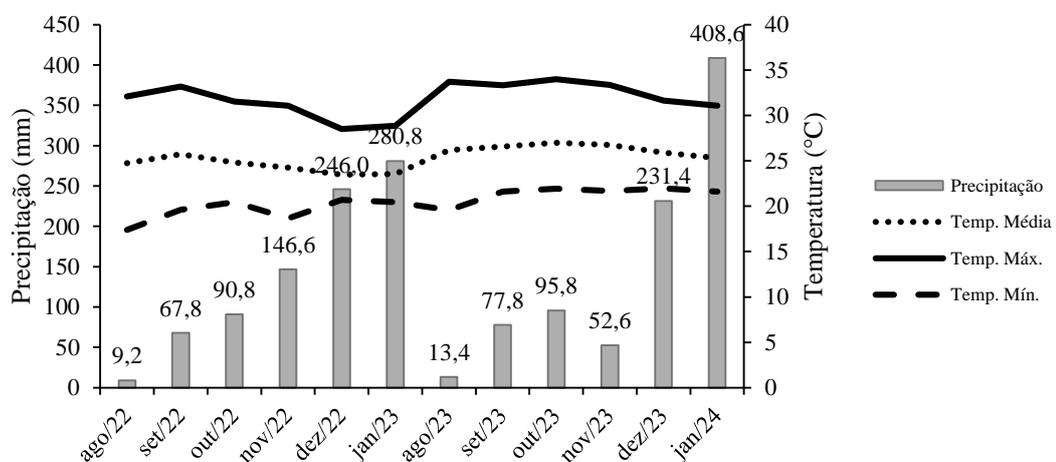
Na etapa de humificação, esses agentes influenciam na formação de compostos humificados, chamadas de substâncias húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas). Segundo Cerri *et al.* (2023), as quais possuem propriedades coloidais, apresentam grande relação área/volume, influenciando no solo positivamente a ligação com íons metálicos, a mobilidade dos complexos organometálicos, a capacidade de adsorção de pesticidas e de troca de cátions, também possuem efeito floculante, favorecendo o desenvolvimento dos agregados do solo. A fim de proporcionar condições ótimas para que a maquinária biológica se mantenha ativa e contribua diretamente nas culturas agrícolas, é necessário proporcionar diversidade e quantidades de resíduos orgânicos adicionados ao solo. Além do manejo com as plantas, outra fonte de resíduo é a introdução de biocarvão nas áreas agrícolas. Esse composto é oriundo de

material vegetal ou animal e destaca-se como alternativa de captura e armazenamento de carbono nos solos, agindo para mitigar as concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera (McCormack *et al.*, 2019), além de contribuir para melhoria na textura, porosidade e estrutura do solo, facilitar a penetração das raízes, melhorar a retenção de água no solo e a absorção pelas plantas (Speratti *et al.*, 2017).

Neste sentido, ao buscar sistemas de manejos sustentáveis e produtivos, este trabalho teve por objetivo avaliar como o cultivo de braquiária, associado ao uso de biocarvão e microrganismos promotores de crescimento de plantas (MPCP's) influenciam a atividade enzimática, o teor das substâncias húmicas que compõem a matéria orgânica e a capacidade de estocar C no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em um experimento implantado na safra 2017/2018, na área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, campus Campo Novo do Parecis, localizada numa região de transição entre Cerrado e Amazônia cujo clima é do tipo Aw, com precipitação média anual de 1.945 mm e temperatura média anual de 23,7°C (Fig. 1). O solo é caracterizado como um Latossolo Vermelho distrófico, de textura muito argilosa (Santos *et al.*, 2006). Antes da implantação do experimento, a área possuía histórico de cultivo sucessivo com soja/milho por mais de 20 anos e a partir da safra 17/18, a área passou a contar com seis Sistemas de Produção (SP) compostos por plantas de cobertura, biocarvão e MPCP's, distribuídos no campo segundo o delineamento experimental em blocos ao acaso, com quatro repetições, em parcelas de 7 x 7 metros.



**Figura 1-** Médias pluviométricas e temperaturas das safras 22/23 e 23/34 na área experimental IFMT, campus Campo Novo do Parecis-MT. Estação meteorológica Davis Vantage Pro 2.s

Ao longo da condução do experimento, até a safra 21/22 havia no solo um acumulado de 8,0 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarvão oriundo da torta de filtro de cana-de-açúcar, resíduo abundante na região, obtida a partir da pirólise lenta, em forno tipo mufla a 580°C, durante 11 horas. O biocarvão gerado desse processo possui altos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (2,26%), S-SO<sub>4</sub> (6,35%), Ca (1,76%), Mg (1,07%), Fe total (1,38%), entre outros elementos. Os MPCP's aplicados nos respectivos SP's foram os *Bacillus subtilis*, *B. megaterium*, *B. amyloliquefaciens*, *Trichoderma harsianum*, *Azospirillum brasiliense* e *Pseudomonas fluorescens*, seguindo as recomendações de aplicação dos produtos comerciais.

### Manejo experimental: safra 22/23

No ano de 2022, após uma avaliação da resistência do solo à penetração (RSP) foi identificado problemas com compactação. Diante desta restrição física e a impossibilidade de revolvimento do solo, devido ao manejo de aplicação do biocarvão nas linhas de plantio desde a safra 17/18, optou-se pelo cultivo da braquiária em substituição das culturas principais (soja e milho), tendo em vista seu potencial em mitigar a compactação do solo, além de melhorar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, também por ser amplamente utilizada na região. A aplicação do biocarvão e dos MPCP's foram mantidos durante o plantio da braquiária (Tabela 1).

**Tabela 1.** Histórico de manejo da área experimental em Campo Novo do Parecis-MT, considerando os sistemas de produção já existentes na área experimental na safra 21/22, a substituição pelo cultivo de braquiária na safra 22/23 e retorno com soja na safra 23/24.

Sistemas de Produção (SP)	Safra 21/22	Safra 22/23	Safra 23/24
1 <sup>1</sup>	soja / milho	braq. <sup>2</sup>	Soja
2	soja + biocarvão / milho + braquiária	braq. + biocarvão	soja + biocarvão
3	soja + biocarvão / milho	braq. + biocarvão	soja + biocarvão
4	soja / milho + braquiária	braq.	Soja
5	soja + MPCP's <sup>3</sup> / milho	braq. + MPCP's	soja + MPCP's
6	soja + biocarvão + MPCP's ***/ milho + braquiária	Braq. + biocarvão + MPCP's	soja + biocarvão + MPCP's

<sup>1</sup> Controle; <sup>2</sup> Braquiária; <sup>3</sup> Microrganismos promotores de crescimento de plantas.

A partir das primeiras chuvas da safra 22/23, realizou-se em setembro de 2022 a primeira coleta de solo para as análises químicas. As coletas ocorreram na profundidade de 0-10 cm, com trado tipo sonda, 30 amostras simples por parcela para formar uma amostra composta, que após identificadas e armazenadas, foram enviadas ao laboratório de solos do IF Goiano campus Iporá para processamento. Devido as irregularidades das chuvas, a coletas das amostras de solo para as análises biológicas ocorreram somente no mês de novembro, com a precipitação acumulada em 262 mm, desde o mês de agosto. A amostragem ocorreu semelhante a realizada para as análises químicas, e encaminhadas para processamento no laboratório de microbiologia do IFMT campus Campo Novo do Parecis.

Após essa etapa, realizou-se em área total a semeadura da braquiária *Urochloa Brizantha* cv. Marandu, sendo distribuído a lanço de 3,0 kg ha<sup>-1</sup> de sementes e adubação a lanço de 500 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e 250 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio, visando manter o manejo de adubação proposto para a área de produção ao lado. Em seguida, houve a distribuição de 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> do biocarvão em linhas de 0,45m de espaçamento previamente marcadas por semeadora. O acumulado de biocarvão até esta safra foi de 10,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Os MPCP's foram aplicados em dezembro/22 e março/23 e o manejo para pragas, doenças e plantas daninhas ocorreram em área total, a partir de resultados de monitoramentos prévios e seguindo as recomendações de aplicação dos produtos comerciais disponíveis na instituição. Para evitar a formação de touceiras que viessem a comprometer a semeadura da safra seguinte, as plantas de braquiária da área total do experimento foram desbastadas com roçadeira motorizada de lâmina duas vezes em fevereiro/23 e uma em abril/23. O material vegetal cortado foi mantido nas parcelas a fim de evitar interferências entre os SP's.

Antes que iniciasse o período da estiagem, em junho/23 foi quantificado a fitomassa produzida pela braquiária nos diferentes sistemas de produção, e a área amostral foi delimitada por um quadrado de ferro com dimensões de 0,5 m x 0,5 m, lançado de forma aleatória no interior de cada parcela, coletando toda a matéria fresca e seca (palhada) ali presente. Em seguida, as amostras foram direcionadas ao laboratório de solos do IFMT campus Campo Novo do Parecis, pesada a massa fresca, levadas para estufa com ventilação forçada de ar a 65°C até atingir massa constante, pesando-as novamente para obter a matéria seca, expressa em t ha<sup>-1</sup>.

Em agosto/23 toda a área experimental com a braquiária foi dessecada, tendo em vista que as plantas já não apresentavam crescimento vegetativo pelo baixo volume pluviométrico do período, além de reduzir a interferência da fitomassa produzida na semeadura seguinte e favorecer a decomposição dos resíduos pelos microrganismos após o início do período chuvoso.

## Manejo experimental: safra 23/24

Devido as irregularidades das chuvas nas duas safras (Figura 1), embora mais intensificada na safra 23/24, a coleta das amostras de solo para as análises químicas ocorreu apenas em outubro/23, e uma semana depois ocorreu a semeadura da soja com a cultivar NEO810 I2x<sup>®</sup>, no espaçamento de 0,45m de entrelinhas e população de 333.333 plantas por hectare. A adubação de semeadura ocorreu em sulco com 540 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e de cobertura com 240 kg ha<sup>-1</sup> de Cloreto de Potássio. Em sequência ao plantio, teve-se a distribuição de 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> de biocarvão, somando o volume de 15,0 Mg ha<sup>-1</sup> e a aplicação dos MPCP's no estágio fenológico VE da cultura nos respectivos SP's.

No início de dezembro/23, com a precipitação acumulada em 243 mm, desde o mês de agosto/23 e as plantas de soja em pleno florescimento, teve-se a coleta de solo destinada as análises biológicas seguindo os procedimentos realizados no ano anterior e enviadas aos mesmos laboratórios. O manejo de pragas, doenças e plantas daninhas desta cultura ocorreu mediante os monitoramentos e recomendações técnicas para a região. Em janeiro/24, ao atingir a maturação fisiológica, colheu-se as plantas de soja de uma área com 10 m<sup>2</sup> em cada parcela, efetuando posteriormente o beneficiamento. Em seguida, corrigiu-se a umidade para 13% da massa de grãos obtida, determina a produtividade de grãos em sc ha<sup>-1</sup>.

## Análises biológicas e químicas

Das amostras de solo coletadas safras 22/23 e 23/24, determinou-se a atividade das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase a partir de método proposto por Tabatabai (1994), que quantifica a coloração amarela formada após a adição de substratos específicos para cada enzima, utilizando 1 g de solo. Já para a determinação dos teores de C orgânico e as frações químicas no solo, os teores das substâncias húmicas (huminas, ácidos fúlvicos e ácidos húmicos), utilizou-se a metodologia proposta por Mendonça e Matos (2017).

O estoque de Carbono Orgânico (ECO) no solo foi obtido pelo método proposto por Freixo *et al.* (2002), sendo determinado conforme equação “ $ECO (Mg\ ha^{-1}) = (C \times Ds \times e)$ ”, em que: C = Teor de COT na camada (g kg<sup>-1</sup>); Ds = densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>); e = espessura da camada em análise (cm). O estoque de Matéria Orgânica no solo (EMOS) utilizou-se a equação “ $EMOS = Ds \times e \times MOS$ ”, sendo: EMOS = quantidade de matéria orgânica do solo (Mg ha<sup>-1</sup>); Ds = densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); e = espessura da camada do solo (cm); MOS = teor de matéria orgânica do solo (dag kg<sup>-1</sup>).

Com estes dados, foi possível obter o Crédito de C equivalente (CO<sub>2</sub>eq) a partir da equação  $CO_{2eq} = (EMOS \times 0,58 \times 0,044)/0,012$ , em que: CO<sub>2</sub> eq = créditos de carbono

equivalente ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); EMOS = quantidade de matéria orgânica do solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); 0,58 = fator de ajuste, considerando que em 100 g de MOS tem 58 g de C (adimensional); 0,044 = peso molar de  $\text{CO}_2$  (Kg); 0,012 = massa atômica do C (Kg).

### **Análise estatística**

Os dados das safras 22/23 e 23/24 foram analisados como subparcelas nos seis sistemas de produção, sendo submetidos à análise de variância (ANOVA) por meio do teste de F, e quando detectado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5% utilizando o software R (R Development Core Team, 2023).

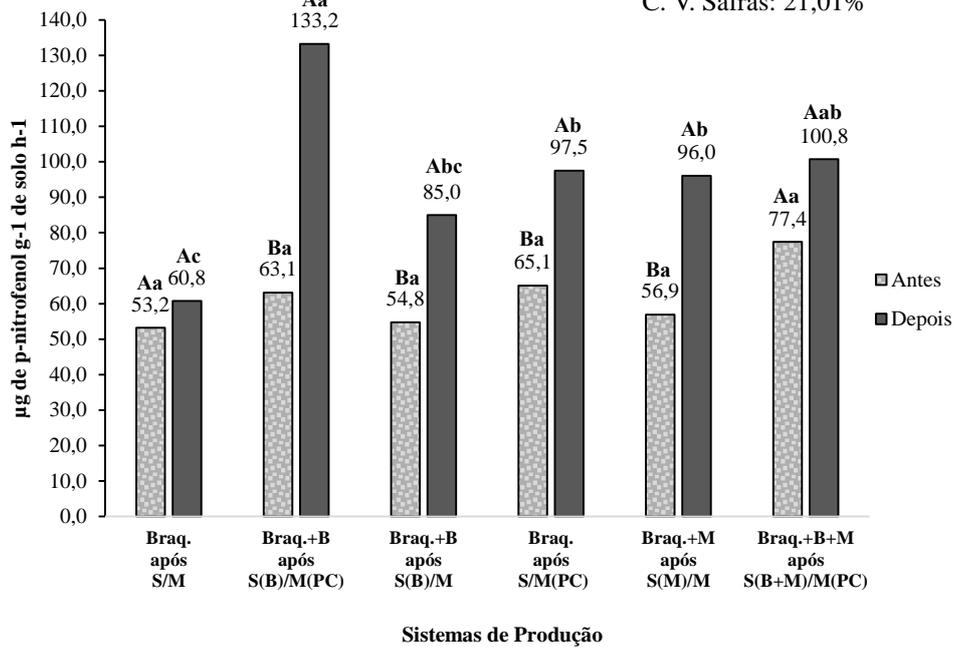
## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A atividade enzimática do solo foi influenciada pelos Sistemas de Produção (SP) nas safras 22/23 e 23/24 (Figura 1A e B), sendo as enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase sensíveis a estas mudanças, o que as tornam relevantes para a compreensão dos efeitos que diferentes manejos provocam na dinâmica do solo.

Ao analisar o efeito dos cultivos na atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase (Figura 1A), a implantação da braquiária e a manutenção das aplicações de biocarvão e microrganismos em seus respectivos SP's na safra 23/24, proporcionou aumento na atividade para todos os sistemas de produção, o que a torna bom indicador das mudanças que ocorrem no solo, mesmo que somente por uma safra. Em cultivos anuais no estado de Goiás, Mendes *et al.* (2018) compararam o cultivo de soja e milho, padrão na maioria das áreas do cerrado, com área em que a braquiária foi inserida como planta de cobertura, e observaram neste experimento de longa duração, que os SP's com Soja/Milho, Soja/Milho + *U. ruziziensis* e Soja/*U. brizantha*, produziram valores de 108,0; 151,0 e 179,0 mg de p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  de solo  $\text{h}^{-1}$  para a atividade da  $\beta$ -glicosidase.

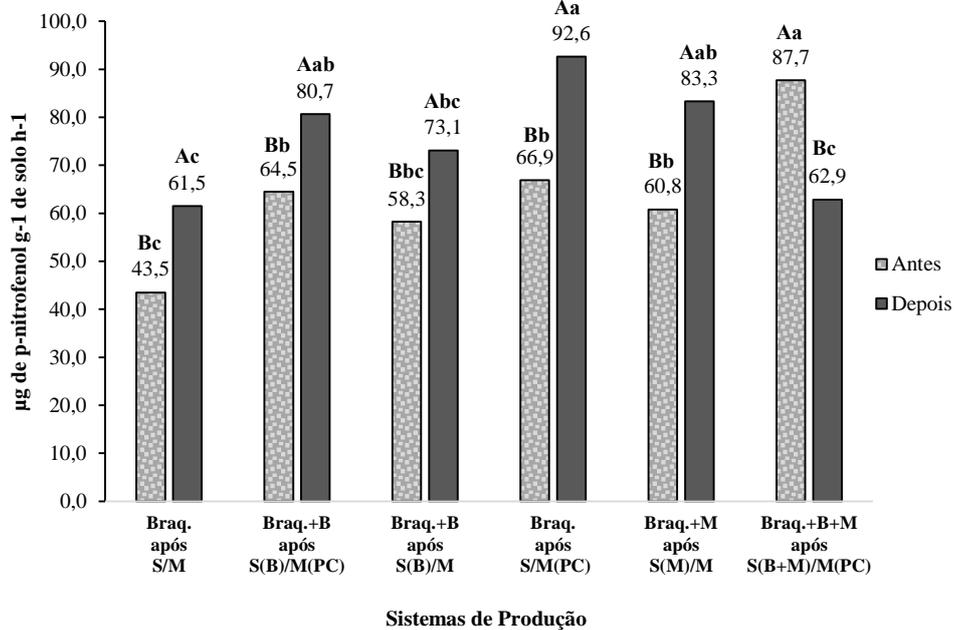
### A - $\beta$ -glicosidase

C. V. Sistemas: 19,97%  
C. V. Safras: 21,01%



### B - Arilsulfatase

C. V. Sistemas: 12,45%  
C. V. Safras: 9,58%



**Figura 1-** Efeito da interação da época de amostragem do solo (antes e depois da braquiária) x Sistemas de produção para a atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase (A) e Arilsulfatase (B), na camada de 0-10 cm de profundidade. Campo Novo do Parecis-MT, 2024. CV (%) Coeficiente de variação, Braquiária - Braquiária, S/M- Soja/Milho, B ou (B) Biocarvão, M ou (M)- microrganismos, PC- Planta de Cobertura. Letras maiúsculas comparam o efeito dos sistemas de produção dentro de cada safra e letras minúsculas comparam o efeito do cultivo da braquiária dentro de cada sistema de produção.

Em outro experimento no Mato Grosso, Mendes *et al.* (2018) verificaram que após sete safras de cultivo, o SP com soja/braquiária apresentou 4,0 vezes mais atividades de  $\beta$ -glicosidase quando comparado ao monocultivo de soja em plantio direto, fato que ressalta a importância de adotar a rotação de culturas, e principalmente, o papel benéfico que esta gramínea pode gerar nos atributos biológicos do solo.

Contudo, ao analisar os SP's individualmente, o cultivo da gramínea em solo que possuíam histórico de rotação de culturas (S(B)/M(PC)) e com acumulado final de 15 toneladas do biocarvão, os valores da atividade da  $\beta$ -glicosidase mais que dobraram, quando comparado apenas com o cultivo solteiro da gramínea em que havia sucessão de soja e milho (S/M) nas últimas sete safras. Este fato sugere que o uso do biocarvão em áreas agrícolas pode tornar uma alternativa para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, como é o caso da torta de filtro da cana-de-açúcar, além de favorecer para maior atividade da  $\beta$ -glicosidase, atua como fonte nutrientes e sequestro do C no solo.

Embora, quando aplicado apenas o biocarvão no solo, verifica-se que a atividade desta enzima não difere estatisticamente do sistema de produção considerado como controle. Esse fato pode estar relacionado as especificidades deste produto, que são variáveis principalmente pelo tempo e temperatura de pirólise, que pode torna-lo mais ou menos disponível a decomposição pela microbiota do solo.

Os dados deste experimento corroboram com os observados por Rahmanian e Khadem (2023), que ao incubarem solos de textura arenosa e argilosa nas proporções de 0,5 e 1,0% de biocarvão, oriundo da palhada de milho pirolisada por duas horas, obtiveram menores valores de atividade da  $\beta$ -glicosidase com biocarvão produzido na temperatura de 600°C incubado em solo com textura argilosa. Os microporos presentes na estrutura do biocarvão formados principalmente em temperaturas mais elevadas (> 600°C) favorecem para aumentar a área superficial, entretanto a presença destas estruturas não é relevante para atividade dos microrganismos, sendo mais eficiente na retenção de água no solo (Lorenz e Lal, 2018), que pode provocar redução nas taxas de decomposição dos resíduos e refletindo nos valores da  $\beta$ -glicosidase.

O fato da segunda coleta de solo para análise enzimática ter ocorrido na fase de plena floração das plantas de soja, pode ter influenciado nos resultados de maior atividade desta enzima. Pois, além dos benefícios proporcionados pela fitomassa remanescente da braquiária, neste estágio fenológico a soja, por encontrar-se em plena atividade metabólica, pode também ter contribuído com a manutenção e crescimento da comunidade microbiana responsável pela decomposição dos resíduos no solo.

Tendo como base a tabela de interpretação proposta por Mendes *et al.* (2019), a alteração das culturas nos SP's permitiu que a atividade desta enzima saísse do nível baixo na safra 22/23 e chegasse ao moderado na safra 23/24, com exceção do SP controle e do biocarvão. No entanto, apesar de promissor, este resultado não é oriundo apenas da mudança no manejo de uma única safra, mas, sim do somatório da atividade desta enzima em todas as safras anteriores. Esse acúmulo nos valores das enzimas representa as memórias do solo, refletindo aos manejos adotados ao longo das safras e pode servir como indicador de qualidade (Mendes *et al.*, 2018).

O cultivo da braquiária também refletiu positivamente na atividade da enzima arilsulfatase no solo da safra 23/24 (Figura 1B), quando comparado com os valores de 22/23, com exceção para o SP com a planta de cobertura, aplicação de biocarvão e microrganismos, em que a atividade foi reduzida em 28%, equiparando-se ao SP padrão deste período. Na safra 22/23, antes do cultivo da braquiária, esse mesmo SP proporcionou incremento de aproximadamente 100% nos valores da atividade, quando comparado com o SP padrão com soja e milho na mesma safra. Essa queda na atividade da arilsulfatase pode indicar que o manejo adotado com acúmulo de 11,48 t ha<sup>-1</sup> de fitomassa da gramínea (Tabela 3), 15,0 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão, aplicação de MPCP's com bactérias na maioria e influenciada pelas condições climáticas do período, impactou na biomassa fúngica deste SP. Pois, sabe-se que é característico de fungos o processo de catalisar a hidrólise de ésteres sulfatos, liberando ânions sulfato que estarão disponíveis para uso das plantas ou outros microrganismos (Balota *et al.*, 2004; Piutti *et al.*, 2015).

Por ser uma enzima sensível, ao ponto de ser considerada mais precisa que a  $\beta$ -glicosidase em diferenciar áreas nas quais adota-se manejos orgânicos das convencionais pela associação com biomassa fúngica (Carneiro *et al.*, 2024), faz-se necessário mais pesquisas para compreender os reflexos que a associação das práticas de manejo provocam nas comunidades do solo, levando em consideração, como exemplo, que a aplicação de biocarvão no solo possui características que podem modificar a diversidade da população microbiana e, conseqüentemente, afetar a taxa enzimática no solo (Mierzwa-Hersztek *et al.*, 2019).

Por outro lado, é importante salientar que a interação significativa da arilsulfatase com o cultivo da gramínea sobre os resíduos das plantas de cobertura acumulados de outras safras, associado a adição do biocarvão, ou apenas com os microrganismos, produziram 92,64; 83,33 e 80,66  $\mu\text{g}$  de p-nitrofenol g<sup>-1</sup> de solo h<sup>-1</sup>, respectivamente, e possibilitou que esse bioindicador mantivesse o nível moderado no solo (Mendes *et al.*, 2019), tanto para a safra 22/23 como para 23/24.

Um aumento na atividade da arilsulfatase também foi observado por Mendes *et al.* (2018) em dois experimentos em que foram comparados o cultivo de soja e milho, padrão na maioria das áreas do cerrado, com área que havia sido inserida a braquiária como planta de cobertura. Neste experimento com oito safras de condução em Goiás, os SP's com Soja/Milho, Soja/Milho + *U. ruziziensis* e Soja/*U. Brizantha*, produziram valores de 89,0, 132,0 e 140,0 de p-nitrofenol  $\text{g}^{-1}$  de solo  $\text{h}^{-1}$ , respectivamente. Em outro experimento os autores verificaram que após sete safras o tratamento soja/braquiária aumentou em 8,0 vezes a atividade da arilsulfatase em comparação ao monocultivo de soja em plantio direto, um indicativo que o cultivo de braquiárias afeta positivamente a atividade desta enzima no solo. As enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase são excelentes bioindicadores da saúde do solo e altamente responsivas as alterações nos sistemas de produção (Figura 1).

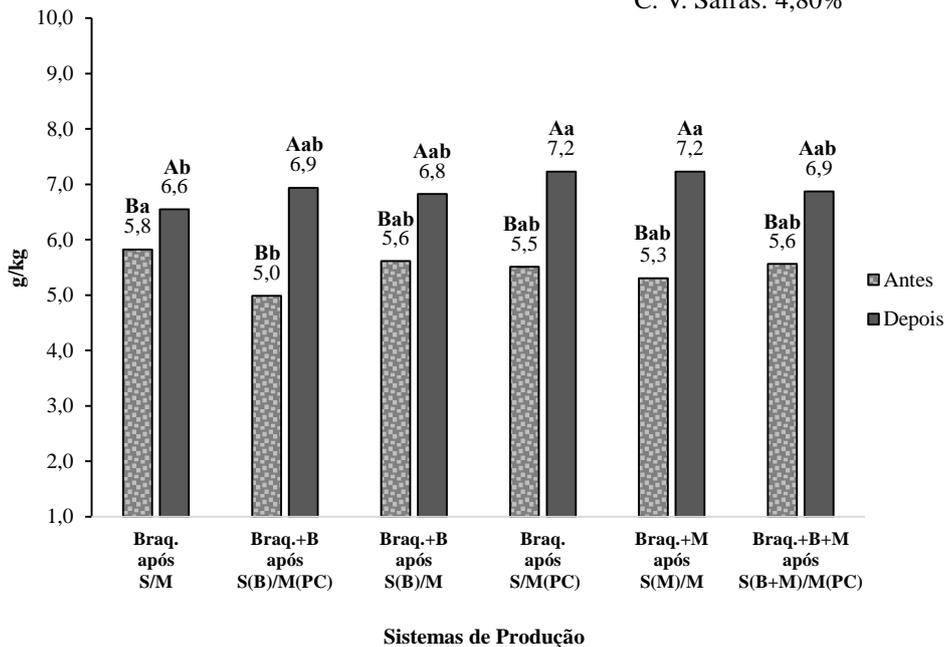
Além das enzimas, houve interação significativa entre os sistemas de produção avaliados na safra 22/23 e 23/24 para as variáveis extrato alcalino (EA) (ácido húmico + ácido fúlvico) e ácido fúlvico (AF) (Figura 2A e B), que juntamente com a humina, compõe as substâncias húmicas do solo.

Ao comparar os valores do extrato alcalino entre as safras (Figura 2A), nota-se que o cultivo de braquiária, independente do sistema de produção adotado, proporcionou incremento de 0,8  $\text{g kg}^{-1}$  após S/M, 1,9  $\text{g kg}^{-1}$  após S(B)/M(PC) e S(M)/M, 1,2  $\text{g kg}^{-1}$  após S(B)/M, 1,7  $\text{g kg}^{-1}$  após S/M (PC) e 1,3 após S(B+M)/M(PC). Tendo em vista a dinâmica da atuação do biocarvão, associado ao acúmulo de resíduos das plantas de cobertura, que já vinham sendo cultivadas em consórcio com o milho em anos anteriores, estes resultados sugerem que maior diversidade nas práticas de manejo é mais promissora no incremento das substâncias húmicas presentes no extrato alcalino.

A maior diversidade de manejo nos sistemas de produção, associados ao cultivo da braquiária afetou positivamente o teor de ácido fúlvico do solo (Figura 2B). Com exceção do SP padrão, os outros cinco SP's cultivados nas safras 22/23 e 23/24 diferiram entre si, com incremento de 28,1% para Braq. após S(B)/M(PC), 20,6% para Braq.+M após S(M)/M, 19,3 % para Braq. após S/M(PC) ou Braq.+B+M após S(B+M)/M(PC) e 12,5% para Braq.+B após S(B)/M.

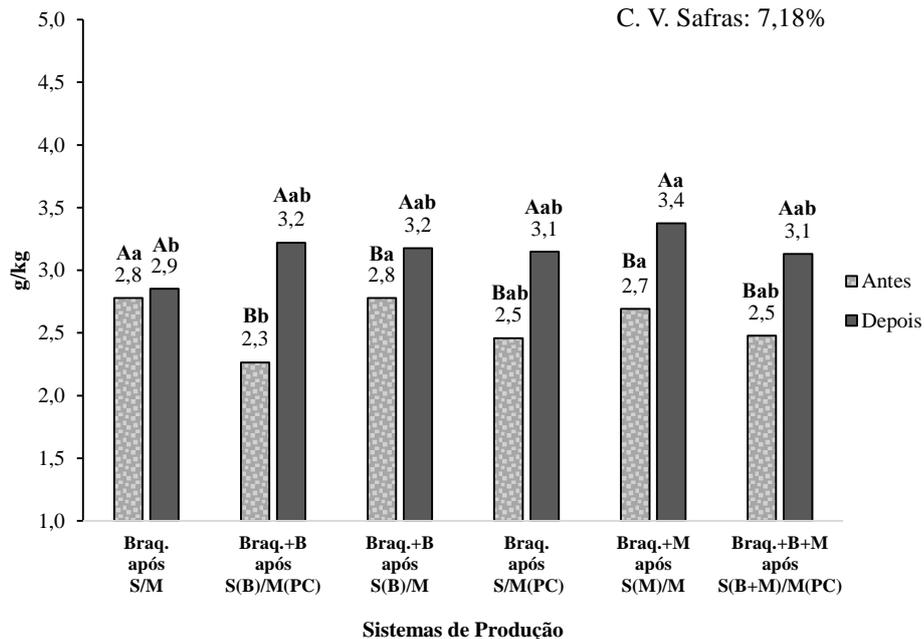
### A – Extrato Alcalino

C. V. Sistemas: 4,68%  
C. V. Safras: 4,80%



### B– Ácido Fúlvico

C. V. Sistemas: 6,68%  
C. V. Safras: 7,18%



**Figura 2** - Efeito da interação da época de amostragem do solo (antes e depois da braquiária) x Sistemas de produção para o Extrato Alcalino (A) e Ácido Fúlvico (B), na camada de 0-10cm de profundidade. Campo Novo do Parecis-MT, 2024. CV (%) Coeficiente de variação, Braq.- Braquiária, S/M- Soja/Milho, B ou (B) Biocarvão, M ou (M)- microrganismos, PC- Planta de Cobertura. . Letras maiúsculas comparam o efeito dos sistemas de produção dentro de cada safra e letras minúsculas comparam o efeito do cultivo da braquiária dentro de cada sistema de produção.

Para Silva *et al.* (2023), a permanência ou adição de qualquer parte das plantas ao solo é uma das estratégias mais eficazes para aumentar a matéria orgânica e as substâncias húmicas

no solo. Segundo estes autores, a composição das palhadas dos resíduos vegetais quanto ao seu teor de celulose, hemicelulose, lignina, proteínas, açúcares, compostos hidrossolúveis, determina a susceptibilidade a decomposição microbiana do solo. De modo que as gramíneas em geral, além de produzirem mais biomassa que leguminosas quando há condições de luminosidade e de solo adequadas, as raízes proliferam e exploram melhor o perfil do solo, o seu uso como plantas de cobertura melhora a ciclagem de nutrientes e pode proporcionar maior aporte de C em profundidade, de forma a contribuir para o incremento das substâncias húmicas no solo. Este fato faz com que cada vez mais na região do Cerrado, espécies de gramíneas como milho, sorgo e braquiária, que são mais adaptados às condições adversas de solos ácidos e de baixa fertilidade, sejam introduzidas em sistemas de rotação de culturas para cobrir o solo e aumentar a produção de palhada.

Cerri *et al.* (2023), ressaltam que as substâncias húmicas, com destaque para o ácido fúlvico, possuem propriedades coloidais, tendo como característica comum grande relação área/volume, responsável pelo comportamento químico e físico destas substâncias, influenciando positivamente a ligação com íons metálicos, a mobilidade dos complexos organometálicos, a capacidade de adsorção de pesticidas, a capacidade de troca de cátions possuem efeito floculante, favorecem o desenvolvimento dos agregados do solo. Baldotto e Baldotto (2018), enfatizam que estas substâncias regulam os atributos associados a fertilidade do solo, com interferência na fisiologia e nutrição das plantas por diferentes modos de ação, com destaque para o aumento da absorção e a eficiência no uso de nutrientes em função de estimular maior proliferação do sistema radicular.

Na safra 22/23, o menor teor de ácido fúlvico nos sistemas de produção S(B)/M(PC) pode estar associado ao acúmulo de material com elevadas proporções de C em suas estruturas, como por exemplo o milho em consórcio com outra gramínea que possuem alta relação C/N, associado a aplicação de biocarvão que ao ser pirolisado e incorporado nas áreas de culturas agrícolas tem uma forma de adicionar matéria orgânica recalcitrante (Speratti *et al.*, 2017).

Segundo Teodoro (2016), a relação C/N de determinado resíduo orgânico influencia diretamente a atividade biológica no solo, pois quanto maior a relação C/N do resíduo, maior o tempo de decomposição do material resultando em maior ou menor tempo de completa decomposição ou humificação. As gramíneas, como o milho e as braquiárias, contribuem com quantidades relativamente elevadas de fitomassa, caracterizadas pela alta relação C/N, e aumenta a permanência da fitomassa sobre o solo ao longo do tempo (Andreola *et al.*, 2000).

Embora, quando pouco lignificadas como ocorreu para as plantas de braquiária, que tiveram cortes aos 3 e após rebrotadas, aos 5 meses após o plantio, pode ter influenciado para

que na safra 23/24, os SP's com Braq. (M) para a variável extrato alcalino (AF+AH) e AF, bem como o SP com Braq. (B) após PC para o EA diferirem estatisticamente do controle. Presume-se que nestes sistemas, o processo de decomposição intensificou, por causa da característica dos resíduos da PC e pela ação dos microrganismos em condições de elevadas temperaturas, com baixas e espaçadas precipitações ao longo da entressafra (Figura 1).

Para Dias *et al.* (2019), o manejo inadequado do solo nos sistemas de produção gera impactos visíveis na produtividade agrícola, que permanecem indetectável quando se considera apenas a produção bruta, remetendo na necessidade de melhor conhecer as complexas interações entre produtos dos processos químicos, físicos e biológicos, os quais afetam a fertilidade do solo. Niaz *et al.* (2017), salientam que a atividade enzimática do solo e as frações que compõem a matéria orgânica do solo, são sensíveis ao manejo adotado, tornando importantes ferramentas para acompanhar as mudanças que ocorrem no solo.

Quanto ao teor de MOS, bem como os estoques de C, MOS, e seu equivalente de CO<sub>2</sub> no solo, não houve diferença estatística entre os sistemas de produção (Tabela 2). Até mesmo nos tratamentos com a adição de biocarvão, material considerado como recalcitrante e com maior resistência a degradação microbiana (Campos *et al.*, 2020), os resultados foram similares aos demais SP's que continham plantas de cobertura e microrganismos. Pode-se considerar que nem todo o C contido no biocarvão aplicado ao longo das safras anteriores é totalmente recalcitrante, podendo conter quantidade de C lábil que foi consumido pela microbiota do solo, uma vez que a recalcitrância do C é dependente da origem da matéria-prima utilizada e das condições de pirólise durante o processo produtivo (Lal, 2016).

Simansky *et al.* (2024), em experimento conduzido a campo com rotação de culturas por seis anos e doses de biocarvão variando de 0, 10 e 20 t ha<sup>-1</sup>, concluíram que a aplicação biocarvão de lodo de fibra de papel e cascas de grãos, pirolizado a 550°C por 30 min, proporcionou aumento significativo no CO do solo. Já Zhang *et al.* (2023) observaram aumento do CO do solo com a aplicação de biocarvão oriundo da palha de trigo pirolizado a 450°C por 4 a 8, indicando que este acúmulo de carbono proporcionado ao solo é fortemente influenciado pelo material utilizado e pelo processo de pirólise.

**Tabela 2** – Efeito da época de amostragem do solo (antes e depois da braquiária) e dos Sistemas de produção para o teor de matéria orgânica do solo (MOS), estoque da matéria orgânica do solo (EMOS), estoque do carbono orgânico (ECO) e dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq) na camada de 0-10cm de profundidade. Campo Novo do Parecis-MT, 2024.

Sistemas de produção	MOS	EMOS	ECO	CO <sub>2</sub> eq
	-----dag kg <sup>-1</sup> -----		-----Mg ha <sup>-1</sup> -----	
Braq. após S/M	5,78 a	69,52 a	40,32 a	147,84 a
Braq.+B após S(B)/M(PC)	5,95 a	71,79 a	41,64 a	152,67 a
Braq.+B após S(B)/M	5,64 a	69,46 a	40,29 a	147,71 a
Braq. após S/M(PC)	5,72 a	68,05 a	39,47 a	144,72 a
Braq.+M após S(M)/M	5,39 a	67,21 a	38,99 a	142,93 a
Braq.+B+M após S(B+M)/M(PC)	6,04 a	72,05 a	41,79 a	153,23 a
Antes	5,25 b	64,64 b	37,49 b	137,47 b
Depois	6,26 a	74,72 a	43,34 a	158,90 a
CV Sistemas	11,35%	10,68%	10,68%	10,68%
CV Safras	7,97%	9,62%	9,62%	9,62%

Médias seguidas de letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05). CV(%) Coeficiente de variação, Braq.- Braquiária, S/M- Soja/Milho, B ou (B) Biocarvão, M ou (M)-microrganismos, PC- Planta de Cobertura.

Por outro lado, ao realizar o cultivo da braquiária nestes sistemas produtivos, comparando o teor de C do solo da safra 22/23, com o da safra 23/24, após o manejo desta forrageira (Tabela 2), houve incremento de 19% no teor de C do solo, na camada de 0,0 -0,10m de profundidade, resultando consequentemente, no incremento de 5,85 Mg ha<sup>-1</sup> do estoque de C, 10,08 Mg ha<sup>-1</sup> de MOS e de 21,43 Mg ha<sup>-1</sup> do equivalente a CO<sub>2</sub>. Nóbrega *et al.* (2017), enfatizam que a conversão da vegetação do Cerrado em áreas para produção agropecuária continuará a ser um processo dominante de mudança no uso da terra no Brasil, com implicações no ciclo global de C, uma vez que a substituição da vegetação natural, geralmente é seguida por perdas de C do solo, especialmente quando o manejo reduz a entrada de biomassa ou aumenta a taxa de decomposição do carbono orgânico do solo (Mayer *et al.*, 2020). Para Ferreira *et al.* (2018), torna-se essencial a adoção de práticas de manejo conservacionistas nestas áreas agrícolas, implantando sistemas de produção que ocasionam a menor alteração possível na dinâmica do C, como estratégia para restaurar e manter o estoque no solo.

Sá *et al.* (2017) enfatizam que, além de servir como substrato para a microbiota do solo, o carbono ali presente desempenha papel fundamental nos ecossistemas terrestres, atuando no controle de inúmeras funções do solo, aumenta a estabilidade dos agregados, melhora a taxa de infiltração e armazenamento de água, o fornecimento de nutrientes e capacidade de troca catiônica. Porém em muitas situações no cerrado brasileiro, os sistemas de produção adotados

tem levado a degradação dos agregados do solo, expondo à oxidação microbiana o C que estava protegido nestas estruturas (Costa *et al.*, 2020).

Deste modo, mesmo em sistemas de produção como S(B)/M(PC); S(B)/M; S/M(PC); S(M)/M e S(B+M)/M(PC) considerados conservacionistas, o cultivo da braquiária como rotação de culturas demonstrou ser eficiente em propiciar o aporte de C ao solo, demonstrando o potencial de uso desta gramínea nos sistemas de produção, seja seu cultivo relacionado a mitigar problemas físicos, como inicialmente foi um dos objetivos deste estudo, seja para produção de palhada para cobertura ou pastejo ou para sistemas integrados, como a integração lavoura-pecuária ou integração lavoura-pecuária-floresta.

Silva *et al.* (2024), ao avaliarem em Silvânia-MS, os sistemas de produção silvo-pastoril com *Brachiaria decumbens*, mata nativa e reflorestamento com eucalipto, observaram menores valores de emissão de CO<sub>2</sub> para o silvo-pastoril (1,05 μmol m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>), seguido da mata nativa (1,65 μmol m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) e do reflorestamento com eucalipto (1,96 μmol m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>), com redução em 36% no sistema silvo-pastoril quando comparado com a floresta nativa, e de 46,4 % quando com o comparado com reflorestamento do eucalipto, concluem que a menor atividade microbiana e o cultivo de *B. decumbens* contribuíram para o acúmulo e estabilidade de carbono no solo ao longo de anos consecutivos.

Vogado *et al.* (2024), em trabalho desenvolvido em São Raimundo das Mangabeiras-MA, ao avaliarem o Cerrado nativo e os sistemas de produção ILPF com *B. decumbens* durante 13 anos, ILP-1 com *B. brizantha* durante 16 anos e ILP-2 com *B. brizantha* durante 16 anos seguido de escarificação, em um Latossolo, obtiveram na camada de 0,0-0,50m de profundidade, maior estoque de C para o ILP-2 (127,0 Mg ha<sup>-1</sup>), seguido do ILP-1 (112,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e menores para ILPF (67,0 Mg ha<sup>-1</sup>) e Cerrado nativo (61,0 Mg ha<sup>-1</sup>), concluem que a adoção de sistemas de produção que possibilitem a entrada permanente de resíduos orgânicos a longo prazo é crucial para aumento de C no solo, destacando a importância da braquiária como espécie forrageira.

A produção de fitomassa da braquiária associada as diferentes estratégias de manejo diferiram estatisticamente na safra 22/23 (Tabela 3). Mesmo com o impedimento físico da compactação do solo (identificado antes da implantação desta gramínea) e pela ocorrência de veranico em novembro de 2022, que dificultou o estabelecimento inicial das plantas, foi possível obter valores elevados de fitomassa, que variou de 10,21 Mg ha<sup>-1</sup> ano sistema de produção Braq. após S/M(PC) a 14,54 Mg ha<sup>-1</sup> após Braq.+M após S(M)/M.

**Tabela 3** – Produção de fitomassa da *Brachiaria Brizantha* cv. Marandu na safra 2022/2023 e produtividade da soja cultivar NEO810 I2x<sup>®</sup> na safra 2023/2024, em Campo Novo do Parecis-MT.

Sistemas de produção Safra 22/23	Fitomassa t ha <sup>-1</sup>	Sistemas de produção Safra 23/24	Produtividade sc ha <sup>-1</sup>
Braq. após S/M	11,60 ab	Soja	54,70 a
Braq.+B após S(B)/M(PC)	10,38 b	Soja (B)	55,50 a
Braq.+B após S(B)/M	12,80 ab	Soja (B)	52,96 a
Braq. após S/M(PC)	10,21 b	Soja	55,18 a
Braq.+M após S(M)/M	14,54 a	Soja (M)	48,73 a
Braq.+B+M após S(B+M)/M(PC)	11,48 ab	Soja (B+M)	52,27 a
CV	14,90%		10,49%

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05). CV(%) Coeficiente de variação, Braq.- Braquiária, S/M- Soja/Milho, B ou (B) Biocarvão, M ou (M)- microrganismos, PC- Planta de Cobertura.

O maior volume de fitomassa entre os sistemas de produção ocorreu com a aplicação dos microrganismos (Tabela 3), este valor não diferiu estatisticamente do sistema controle apenas com braquiária, mas aumentou em 25% a massa total de fitomassa. Ao considerar que as plantas de braquiária foram expostas ao estresse hídrico na fase de estabelecimento, a aplicação de *Bacillus subtilis*, *B. megaterium*, *B. amyloliquefaciens*, *Trichoderma harsianium*, *Azospirillum brasiliense* e *Pseudomonas fluorescens* mostrou-se indispensável, tendo em vista que esses atuam na produção de fitohormônios, de compostos orgânicos voláteis, metabolismo antioxidante, disponibilidade de nutrientes e controle biológico (Gomes *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2022). Estes compostos auxiliam as plantas em período críticos, pois estimulam o desenvolvimento do sistema radicular, que permite a exploração de maior volume de solo, e consequentemente melhora absorção de água e nutrientes, com resultado na maior produção de fitomassa, como observado neste experimento. Neste sentido, percebe-se que se os SP's possibilitarem a manutenção da vida no solo frente a condições desfavoráveis, como baixa precipitação e altas temperaturas, como registradas no decorrer das duas safras deste experimento, é possível a manutenção dos processos metabólicos no solo e os benefícios para as plantas cultivadas.

Já o SP com Braq.+B após S(B)/M e acúmulo de 15,0 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão, aumentou em 10% a produção de fitomassa comparado ao controle da safra 23/24. Esta diferença pode estar associada as características que as plantas de braquiária e o biocarvão proporciona ao solo, como a retenção de água pelo solo, amenizando o efeito do estresse hídrico e ser abrigo ou fonte de nutrientes para microbiota do solo (Sohi *et al.* 2010; Latawiec *et al.* 2019), que uma vez preservadas e ativas, contribuem no crescimento e desenvolvimento das plantas.

Latawiec *et al.* (2023), ao avaliarem a campo a produção de biomassa da mesma braquiária, associada com diferentes sistemas de cultivo com inclusão de biocarvão oriundo da *Gliricidia sepium*, pirolisado a 400°C por 10 horas, em Planossolo Distrófico com predominância de pastagem, obtiveram na primeira colheita a produção de aproximadamente 5,0; 7,0 e 9,0 t ha<sup>-1</sup> de biomassa para os tratamentos controle (marandu), Marandu + 15,0 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão e Marandu + 30,0 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão, respectivamente, que resultou, quando comparado com o controle, em ganho de aproximadamente 40% na produção de resíduo vegetal com a adição de 15,0 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão. Resultados similares foram também obtidos por Bista *et al.* (2019), que ao cultivarem trigo em vasos contendo 11,2 e 22,4 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão oriundo de árvores, observaram maior volume de massa aérea do trigo quando comparadas as plantas cultivadas sem biocarvão.

A rotação de cultura na safra 22/23 com a braquiária nos diferentes sistemas foi benéfica aos atributos químicos e biológicos. Embora, não houve diferença significativa na produtividade da soja cultivada na safra seguinte (Tabela 2). Independente dos sistemas de produção avaliados e as diferenças observadas entre os manejos na atividade enzimática (Figura 1), nas substâncias húmicas que compõem a matéria orgânica do solo (Figura 2), na quantidade de fitomassa produzida pela braquiária (Tabela 3), estes benefícios não contribuíram para maior produtividade da soja. De modo que, a presença da camada compactada, que não foi revertida pelo cultivo da gramínea, e os efeitos das condições climáticas observadas na safra 23/24 podem ter influenciado neste resultado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A rotação de culturas com braquiária *Urochloa Brizantha* cv. Marandú foi eficiente em elevar os atributos químicos e biológicos do solo na camada de 0-10cm do solo.

O manejo do sistema de produção com a gramínea aumentou a atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e os teores de C presentes no extrato alcalino e ácido fúlvico que são partes integrantes das substâncias húmicas do solo.

A braquiária é uma alternativa eficiente no sequestro de C no solo, pois independente das estratégias de manejo adotadas, contribuiu no incremento de MOS e aumentou o estoque de C no solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreola F, Costa LM, Olszewski N, Jucksch I. A cobertura vegetal de inverno e a adubação orgânica e, ou mineral influenciando a sucessão feijão/milho. *Rev Bras Cienc Solo*. 2000;24:867-874. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400018>.
- Baldotto MA, Baldotto LEB. Relações entre indicadores de qualidade do solo, propriedades redox e bioatividade de substâncias húmicas de solos sob integração lavoura, pecuária e florestas. *Rev. Ceres*. 2018;65:373-380. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201865040010>.
- Balota EL, Kanashiro M, Colozzi Filho A, Andrade DS, Dick RP. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. *Braz. J. Microbiol.* 2004; 35:300–306. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822004000300006>.
- Bista P, Ghimire R, Machado S, Pritchett L. Biochar Effects on Soil Properties and Wheat Biomass vary with Fertility Management. *Agronomy*. 2019;9:623. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100623>.
- Campos P, Miller AZ, Knicker H, Costa-Pereira MF, Merino A, La Rosa JM. Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment. *Waste Manage*. 2020;105:256-267. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.013>.
- Carneiro RG, Figueiredo CC, Malaquias JV, Mendes IC. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. *Appl Soil Ecol*. 2024;198:105394. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394>.
- Carvalho ML, Vanolli BS, Schiebelbein BE, Borba DA, Luz FB, Cardoso GM, Bortolo LS, Marostica MEM, Souza VS. Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo. Piracicaba-SP, ESALQ-USP. 2022. Disponível em: [https://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/Livro\\_Plantas\\_de\\_Cobertura\\_completo.pdf](https://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/Livro_Plantas_de_Cobertura_completo.pdf).
- Cerri CEP, Abbruzzini TF, Carvalho JLN, Cherubin MR, Frazão LA, Maia SMF, Oliveira DMS. Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono. In Bettiol W, Silva CA, Cerri CEP, Martin-Neto L, Andrade CA, editores. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa; 2023. p. 211-254.
- Costa AA, Dias BO, Fraga VS, Santana CC, Silva N. Carbon and nitrogen stocks in soils under forms of use in the Cerrado. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*. 2020;24:528-533. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p528-533>.
- Dias FPM, Hubner R, Nunes FJ, Wilson LM, Xavier FAS. Effects of land-use change on chemical attributes of a Ferralsol in Brazilian Cerrado. *Catena*. 2019;177:180 – 188, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.016>.
- Ferreira AO, Amado TJC, Ric CW, Diaz DAR, Briedis C, Inagaki TM, Gonçalves DRP. Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no till systems of South Brazil. *Sci Total Environ*. 2018;622:735–742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.019>.

Freixo AA, Machado P LO A, Guimarães CM, Silva CA, Fadigas FS. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. *Rev Bras Cienc Solo*. 2002;26:425-434. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200016>.

Gomes E, Lana UGP, Alves VMC, Paiva CAO, Godinho BTV, Sousa SM. Mecanismos das bactérias promotoras do crescimento de plantas na mitigação dos efeitos do déficit hídrico. Sete Lagos: Embrapa Milho e Sorgo; 2022. (Documentos 267). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1144322/mecanismos-das-bacterias-promotoras-do-crescimento-de-plantas-na-mitigacao-dos-efeitos-do-deficit-hidrico>.

Gomes EA, Silva UC, Paiva CAO, Lana UGP, Marriel IE, Santos VL. Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas. Sete Lagos: Embrapa Milho e Sorgo; 2016. (Documentos 208). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161283/1/doc-208.pdf>.

Lal R. Biochar and soil carbon sequestration. In: Guo M, He Z, Uchimiya SM. *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*. Madison: SSSA Special Publication, 2016. p. 175-197.

Latawiec AE, Rodrigues AF, Korys KA, Mendes M, Rangel M, Castro A, Teixeira W, Valentim JF, Araujo E, Moraes LFD, Pacheco V, Mendes M, Dela Piccolla C, Strassburg B, Kubon M, Drosik A, Gomes FD, Reid B, Krieger JM, Neto ECS. Biochar and Forage Peanut improve pastures: Evidence from a field experiment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2023;353:108534. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108534>.

Latawiec AE, Strassburg BBN, Junqueira AB, Araujo E, Luiz LF, Pinto HAN, Castro A, Rangel M, Malaguti GA, Rodrigues AF, Barioni LG, Novotny EH, Cornelissen G, Mendes M, Batista N, Guerra JG, Zonta E, Jakovac C, Hale SE. Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis. *Scientific Reports*. 2019;9:11993. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47647-x>.

Lorenz K, Lal LR. Biochar. In: Lorenz K, Lal LR, editors. *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Springer: Cham; 2018. p. 301-355.

Mayer M, Prestcott CE, Abaker WEA, Augusto L, Cécillon L, Ferreira GWD, James J, Jandal R, Katzensteiner K, Laclau J, Laganier J, Nouvellon Y, Paré D, Stanturf JA, Vanguelova EI, Verstadal L. Tamm Review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. *Forest Ecol Manag*. 2020;466:118127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>.

Mccormack SA, Ostle N, Bardgett RD, Hopkins DW, Pereira MG, Vanbergen AJ. Soil biota, carbon cycling and crop plant biomass responses to biochar in a temperate mesocosm experiment. *Plant Soil*. 2019;440:341-356. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04062-5>.

Mendes IC, Sousa DMG, Reis Junior FB, Lopes AAC. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Planaltina: Embrapa; 2018. (Circular Técnica, 38). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1110832/bioanalise-de-solo-como-acessar-e-interpretar-a-saude-do-solo>.

- Mendes IC, Sousa DMG, Reis Junior FB, Lopes AAC, Souza LM, Chaer GM. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. In: Severiano EC, Moraes MF, de Paula AM, editors. Tópicos em Ciência do Solo - Volume X. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2019. p. 1-64.
- Mendonça E, Matos E. Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises. 2. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa; 2017.
- Mierzwa-Hersztek M, Gondok K, Baran A. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth. *Appl Soil Ecol* 2016;105:144-150. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.006>.
- Niaz S, Ijaz SS, Hassan A, Sharif M. Landuse impacts on soil organic carbon fractions in different rainfall areas of a subtropical dryland. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2017;63:1337 –1345. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1280727>.
- Nóbrega RLB, Gusha AC, Torres GN, Lampart G, Amorim RSS, Couto E, Gerold G. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. *PLoS One.* 2017;15:e0236236. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414>.
- Piutti S, Slezack-Deschaumes S, Niknahad-Gharmakher H, Vong PC, Recous S, Benizri E. Relationships between the density and activity of microbial communities possessing arylsulfatase activity and soil sulfate dynamics during the decomposition of plant residues in soil. *Eur. J. Soil Biol.* 2015;70:88–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.07.007>.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2023. Available from: <http://www.R-project.org/>.
- Rahmanian M, Khadem A. The effects of biochar on soil extra and intracellular enzymes activity. *Biomass Conversion and Biorefinery.* 2023;14:21993–22005. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04330-6>.
- Sá JCM, Lal R, Cerri CC, Lorenz K, Hungria M, Carvalho PCF. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environ Int.* 2017;98:102–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>.
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Oliveira JB, Coelho MR, Lumbreras JF, Cunha TJF. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2006.
- Silva BO, Moitinho MR, Panosso AR, Oliveira DMS, Montanari R, Moraes MLT, Milori DMBP, Bicalho ES, Scala Junior N. Implications of converting native forest areas to agricultural systems on the dynamics of CO2 emission and carbon stock in a Cerrado soil, Brazil. *J Environ Manage.* 2024;358:120796. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120796>.
- Silva CA, Cerri CEP, Andrade CA, Martin-Neto L, Bettiol W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In Bettiol W, Silva CA, Cerri CEP, Martin-Neto L, Andrade CA,

editores. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa. 2023. p. 17-48.

Simansky V, Horák J, Lukac M. Addition of Biochar and Fertiliser Drives Changes in Soil Organic Matter and Humic Substance Content in Haplic Luvisol. *Land*. 2024;13: 481. <https://doi.org/10.3390/land13040481>.

Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel EE, Bol R. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Adv Agron*. 2010;105:47-82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9).

Speratti AB, Johnson MS, Sousa HM, Torres GN, Couto EG. Impact of Different Agricultural Waste Biochars on Maize Biomass and Soil Water Content in a Brazilian Cerrado Arenosol. *Agronomy*. 2017;7:1-19. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030049>.

Tabatabai MA. Soil enzymes. In: Weaver RW, Angle S, Bottomley P, Bezdicek D, Smith S, Tabatabai MA, Wollum A, editors. *Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties*. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America; 1994. p.775-833.

Teodoro MS. Confecção de Compostos Orgânicos em Parnaíba, PI. Teresina: Embrapa;2016. (Comunicado Técnico, 238). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1055970>.

Vogado RF, Souza HA, Sagrilo E, Brito LCR, Matias SSR, Teixeira Neto ML, Oliveira Junior L, Andrade HAF, Leite LFC. Soil organic carbon stocks and fractions under integrated systems and pasture in the Cerrado of Northeast Brazil. *Catena*. 2024;243: 108196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108196>.

Zhang Y, Ma W, Sun X, Jiang J, Li D, Tang G, Xu W, Jia H. Biochar Aged for Five Years Altered Carbon Fractions and Enzyme Activities of Sandy Soil. *Land*. 2023;12:1645. <https://doi.org/10.3390/land12081645>.

Zolin CA, Matos ES, Magalhães CAS, Paulino J, Lal R, Spera ST, Behling M. Short-term effect of a crop-livestock-forestry system on soil, water and nutrient loss in the Cerrado-Amazon ecotone. *Acta Amazon*. 2021;51:102-112. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202000391>.